

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Motivy a dielektrika na Cu a Al substrátech**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan FOUĐ**  
Osobní číslo: **E14B0090P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Motivy a dielektrika na Cu a Al substrátech**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou kovových substrátů a uveďte jejich parametry.
2. Zpracujte rešerši past určených pro tisk na Cu a Al substráty.
3. Navrhněte testovací motivy pro ověření elektrických a mechanických vlastností substrátů kov - dielektrikum - kov.
4. Na navržených vzorcích otestujte jejich vlastnosti.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. PAVELKA, Jiří, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk a LETTL, Jiří. Výkonová elektronika. Vyd. 3., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.
2. Blank, T.; Leyrer, B.; Maurer, T.; Meisser, M.; Bruns, M.; Weber, M., "Copper thick-film substrates for power electronic applications," Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), 2014 , vol., no., pp.1,6, 16-18 Sept. 2014 doi: 10.1109/ESTC.2014.6962860
3. Elektronické informační zdroje


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Hlína


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na motivy a dielektrika na Cu a Al substrátech. V práci jsou popsány typy substrátů pro výkonovou elektroniku, používané materiály u IMS substrátů, aditivní metody nanášení past a řešení dielektrických a vodivých past použitelných na Cu a Al substrátech.

## **Klíčová slova**

výkonová elektronika, kovové substráty, hliníkový substrát, substrát, síťotisk, šablonový tisk, pasta, hliník, měď, vodivá vrstva, dielektrická vrstva, tepelná vodivost, měření substrátů

**Abstract**

This bachelor thesis is aimed at motives and dielectrics on Cu and Al substrates. The work deals with the descriptions of substrate-types for power electronics, used materials on IMS substrates, additive methods of applying pastes and search of the dielectrics and conductive pastes useable on the Cu and Al substrates.

**Key words**

power electronic, insulated metal substrate, aluminium substrate, substrate, screen printing, stencil printing, paste, aluminium, copper, conductive layer, thermal conductivity, measuring of substrates

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Jan Foud

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Hlínovi za cenné profesionální rady, konzultace, připomínky a odborné vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA</b> .....	<b>11</b>
1.1 SUBSTRÁTY PRO VÝKONOVOU ELEKTRONIKU .....	11
1.1.1 DBC.....	11
1.1.2 TPC.....	12
1.1.3 IMS.....	13
1.1.4 FR4.....	15
1.2 MATERIÁLY POUŽITÉ U IMS SUBSTRÁTŮ .....	16
1.2.1 Základová deska.....	16
1.2.1.1 Měď.....	17
1.2.1.2 Hliník.....	18
1.2.2 Dielektrická vrstva.....	19
1.2.2.1 Oxid hlinitý.....	19
1.2.2.2 Nitrid hliníku .....	20
1.2.2.3 Oxid berylnatý .....	20
1.2.2.4 Epoxidová pryskyřice.....	21
1.2.3 Vodivá vrstva.....	21
1.2.3.1 Stříbro.....	21
1.2.3.2 Měď.....	22
<b>2 METODY NANÁŠENÍ PAST</b> .....	<b>23</b>
2.1 SÍTOTISK .....	23
2.1.1 Síta.....	24
2.1.2 Rámy.....	25
2.2 ŠABLONOVÝ TISK.....	25
2.3 TĚRKA.....	26
<b>3 SÍTOTISKOVÉ PASTY</b> .....	<b>27</b>
3.1 DIELEKTRICKÉ PASTY PRO AL A CU SUBSTRÁTY.....	27
3.2 VODIVÉ PASTY NA AL A CU SUBSTRÁTY .....	28
3.3 REŠERŠE PAST NA CU A AL SUBSTRÁTY .....	29
3.3.1 Dielektrické pasty.....	29
3.3.2 Vodivé pasty.....	31
3.4 VÝROBCI PAST PRO CU A AL SUBSTRÁTY.....	33
3.4.1 Heraeus.....	33
3.4.2 ESL ElectroScience.....	33
3.4.3 Fraunhofer.....	33
3.4.4 DuPont.....	33
<b>4 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>34</b>
4.1 MĚŘENÍ MIKROSKOPEM.....	35
4.2 PŘÍPRAVA SUBSTRÁTŮ NA MĚŘENÍ.....	37
4.3 MĚŘENÍ.....	39
4.4 NAMĚŘENÉ A DOPOČÍTANÉ HODNOTY .....	40
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>46</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>I</b>



## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na motivy a dielektrika na Cu a Al substrátech.

Text bakalářské práce je rozdělen na čtyři části. První část se věnuje popisu výkonové elektroniky, popisu substrátů pro výkonovou elektroniku, mezi které patří DBC, TPC a kovové substráty (IMS), a popisu materiálů používaných na kovových substrátech. Druhá část se věnuje metodám, které slouží k nanášení aditivních vrstev substrátů. Mezi tyto aditivní metody patří sítotisk a šablonový tisk. Třetí kapitola se věnuje sítotiskovým pastám, především dielektrickým a vodivým pastám, které jsou určeny pro tisk na Cu a Al substrátech. V této části jsou tyto pasty od třech výrobců podrobně rozebrány. Poslední čtvrtá část se věnuje praktické části. Praktická část je zaměřena na měření hodnot na hliníkových substrátech.

## Seznam symbolů a zkratk

$C$ [F].....	Kapacita
$d$ [m] .....	tloušťka dielektrické vrstvy
$E_p$ [V. m <sup>-1</sup> ] .....	Elektrická pevnost
$G$ [S.m <sup>-1</sup> ].....	Elektrická vodivost
$I$ [A] .....	Elektrický proud
$l$ [m] .....	Délka
$R$ [Ω].....	Elektrický odpor
$S$ [m <sup>2</sup> ] .....	Plocha
$t$ [min].....	Čas
$t$ [°C].....	Teplota
$tg \delta$ [-].....	ztrátový činitel
$U$ [V].....	Elektrické napětí
$U_p$ [V] .....	Průrazné napětí
$\gamma$ [K <sup>-1</sup> ].....	Koeficient teplotní roztažnosti
$\epsilon_r$ [-].....	Relativní permitivita
$\epsilon_0$ [F. m <sup>-1</sup> ] .....	Permitivita vakua
$\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ].....	Tepelná vodivost
$\rho$ [Ω.m] .....	Rezistivita nebo měrný elektrický odpor
DBC .....	Direct Bonded Copper (Přímé bondování mědi)
FR4 .....	Fire Retardant 4 (Zpomalovač hoření 4)
IGBT .....	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
IMS .....	Insulated Metal Substrate (Izolovaný kovový substrát)
LED .....	Light-Emitting Diode (Dioda emitující světlo)
TPC.....	Thick Printed Copper (Tisk tlusté vrstvy mědi)

# 1 Výkonová elektronika

Výkonová elektronika představuje spojení mezi mechanikou, elektronikou a řídicí technikou. Výkonová elektronika využívá především polovodičové součástky, které jsou schopné spínat velké výkony. Mezi součástky výkonové elektroniky patří výkonová dioda, tranzistory a tyristory. Mimo polovodičové součástky zde najdou využití například výkonové odpory. Tyto součástky nacházejí využití ve výkonových spínačích, které jsou základním prvkem v měničích výkonové elektroniky. Měniče výkonové elektroniky dělíme na usměrňovače, střídače, stejnosměrné měniče a střídavé měniče. V dnešní době se výkonová elektronika využívá v aplikacích od jednotek wattů po aplikace, které využívají megawatty. [1-2]

## 1.1 Substráty pro výkonovou elektroniku

Úloha substrátů pro výkonovou elektroniku je vytvoření elektrického obvodu, který má zároveň chladičí části s dobrou tepelnou vodivostí. Ve srovnání se substráty používané v mikroelektronice musí být tyto substráty schopné pracovat ve vyšších teplotách (až 200 °C), přenášet vyšší proudy a poskytnout izolaci pro vyšší napětí (až několik tisíc voltů). [37]

Technologie používané ve výkonové elektrotechnice jsou:

- DBC - Direct Bonded Copper
- TPC - Thick Printed Copper
- IMS - Insulated Metal Substrate

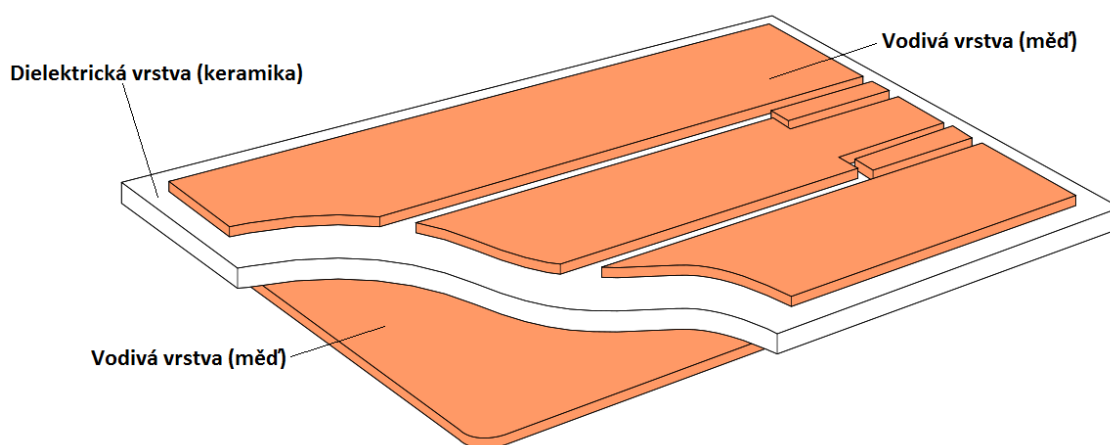
### 1.1.1 DBC

DBC je zkratka pro Direct Bonded Copper, což v překladu znamená přímé bondování mědi. DBC substráty jsou jedny z nejpoužívanějších substrátů ve výkonových modulech. Tyto substráty se vyznačují vynikající elektrickou izolací, dobrou mechanickou pevností, nízkou elektrickou kapacitou, výbornou tepelnou vodivostí, nízkým koeficientem teplotní roztažnosti a odolností proti korozi. [3-4, 37]

Základem DBC substrátu je keramický substrát, na který je z jedné nebo z obou stran vázaná velmi čistá měď ve formě měděné fólie. Jednotlivé vrstvy jsou znázorněny na obr. 1.1. Na vrchní vrstvě mědi je obvykle vypálený nebo vyleptaný plošný spoj, který

utváří elektrický obvod, na spodní straně se většinou nechává rovný plát mědi. Proces vázání vrstev probíhá při řízeném zahřívání mědi a keramického substrátu v atmosféře dusíku, který obsahuje přibližně 0,003 % kyslíku. Zahřívání probíhá až do teploty 1065 °C. Používanými keramickými substráty jsou korund, nitrid hliníku a oxid berylnatý. Korund neboli oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který je díky nízké ceně hojně využíván, ale není dobře tepelně vodivý ( $20 - 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a je značně křehký. Koeficienty tepelné roztažnosti oxidu hlinitého  $8,1\cdot 10^{-6} - 8,4\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a nitridu hliníku  $3\cdot 10^{-6} - 4,5\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  jsou přibližně stejné jako koeficient roztažnosti křemíku  $4\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , čímž je zajištěna odolnost proti cyklickému teplotnímu namáhání (vydrží až 50 000 cyklů). Nitrid hliníku (AlN) je dražší než korund a má mnohem lepší tepelné vlastnosti ( $> 170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Oxid berylnatý (BeO) má dobré tepelné vlastnosti ( $265 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), ale příliš se nepoužívá, protože jeho prášek je toxický. [3-6, 10, 37-38]

DBC keramické substráty jsou v dnešní době hojně využívány a používají se například v automobilovém a leteckém průmyslu, v solárních komponentách, pro IGBT tranzistory nebo pro laserové systémy. [3]



Obr. 1.1 DBC substrát (překresleno z [37])

### 1.1.2 TPC

TPC je zkratka pro Thick Printed Copper, což v překladu znamená „tisk tlusté vrstvy mědi“. TPC substráty vznikly jako substráty pro výkonovou elektroniku s vysokou spolehlivostí pro použití v drsných podmínkách (agresivní a žíravé chemikálie, extrémně vysoké nebo nízké teploty, mechanicky namáhané obvody). Tyto substráty reagují na nedostatky u DBC substrátů, které byly v tepelné a mechanické spolehlivosti a nemožnosti tvorby různých tloušťek mědi na jednom substrátu. TPC substráty se vyznačují

vysokou spolehlivostí, vynikající tepelnou vodivostí, mechanickou stabilitou substrátu, vysokou proudovou zatížitelností. Oproti DBC substrátům mají TPC substráty výrazně vyšší odolnost proti cyklickému teplotnímu namáhání. [8-9]

Jedná se o aditivní technologii, jejímž základem je keramický substrát, na který je sítotiskem nanесena vrstva měděné pasty, která se následně 10 minut suší při teplotě 125 °C a nakonec je vypalována v atmosféře dusíku při teplotách 900 °C až 925 °C. Tloušťka měděné vrstvy se dá zvolit od 20 μm do 300 μm v závislosti na požadované proudové zatížitelnosti a může mít rozdílnou tloušťku v různých částech vodivého motivu. Požadované tloušťky se dosahuje pomocí opakování popsanych kroků (sítotisk, sušení, vypalování). Keramické substráty se využívají jako elektrická izolace a jejich vysoká tepelná vodivost dokáže spolehlivě odvést teplo vzniklé průchodem proudu. Pro technologii TPC se využívají tyto keramické substráty: korund neboli oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ), nitrid hliníku (AlN), zirkonový tvrzený oxid hlinitý (ZTA) a oxid berylnatý (BeO). [8-9]

TPC substráty se využívají v automobilovém a leteckém průmyslu, pro laserové systémy nebo pro výrobu LED modulů (osvětlení), solárních modulů, usměrňovačů a spínaných měničů napětí. [8-9]

### 1.1.3 IMS

IMS je zkratka pro Insulated Metal Substrate, což v překladu znamená izolovaný kovový substrát. Tento substrát má lepší mechanickou odolnost než keramické substráty. Ve srovnání s FR4 substráty má daleko lepší tepelnou vodivost. Nízká tepelná vodivost představuje problém při velkých výkonech, kdy není ztrátové teplo odvedeno a dochází k degradaci desky. Kovové substráty ze všech výkonových substrátů odvádí nejlépe teplo. [10, 37]

Základem IMS substrátu je tlustá vrstva hliníku, mědi nebo různých slitin hliníku. Tato vrstva slouží jako nosná vrstva a zároveň odvádí teplo. Tloušťka základní desky se pohybuje mezi 0,5 – 9 mm. Volba tloušťky základní desky je přímo úměrná tepelné kapacitě substrátu a tím i odvodu tepla. Používanějším materiálem je hliník nebo jeho slitiny, který má sice nižší tepelnou vodivost než měď, ale zato je lehčí a levnější. Měď se

využívá u substrátů, u kterých potřebujeme přenášet vyšší výkony, pro svou vyšší tepelnou vodivost ( $395 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), která umožní lepší chlazení substrátu. Nejpoužívanějšími slitinami na bázi hliníku jsou hliník s hořčíkem (AlMg<sub>2,5</sub>) a hliník s hořčíkem a křemíkem (AlMg<sub>1</sub>SiCu). Slitina AlMg<sub>1</sub>SiCu má dobré antikoroziční vlastnosti a má také lepší tepelnou vodivost ( $167 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) než slitina AlMg<sub>2,5</sub> ( $138 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Při přepočtu na celý substrát zvyšuje slitina AlMg<sub>1</sub>SiCu celkovou vodivost substrátu oproti slitině AlMg<sub>2,5</sub> pouze o 0,8 %. Používanějším základem substrátu IMS je AlMg<sub>2,5</sub> kvůli lehčímu opracování a tváření. Nosná deska se často připojuje pomocí teplovodivé pasty ke chladiči, který ještě lépe odvádí teplo. [10, 12, 38, 43]

Další vrstvou substrátu je dielektrická vrstva o tloušťce 35-150  $\mu\text{m}$ . Dielektrická vrstva se nanáší většinou metodou sítotisku na základní desku ve formě dielektrické pasty, která je následně vypalována. Úkolem této vrstvy je izolovat vodivé cesty od základové kovové desky. Dielektrická vrstva musí splňovat vlastnosti na dobrou tepelnou vodivost a velký elektrický odpor. Tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí  $1 - 6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a rezistivita v rozmezí  $1,2\cdot 10^{12} - 1,2\cdot 10^{13} \Omega\cdot\text{m}$ . Koeficient teplotní roztažnosti dielektrické vrstvy by měl být co nejnižší, aby nedocházelo k natahování a smršťování vrstvy a tím i nižší životnosti celého substrátu. Dielektrická vrstva je založena na bázi epoxidové pryskyřice plněné částicemi práškové keramiky. Částičky práškové keramiky se používají z materiálů, které mají dobrou tepelnou vodivost z důvodu zvýšení celkové tepelné vodivosti dielektrické vrstvy, protože samotná epoxidová pryskyřice má nízkou tepelnou vodivost ( $0,682 - 1,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Používanými keramickými materiály, které se smíchávají s epoxidovou pryskyřicí, jsou korund neboli oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nitrid hliníku (AlN) a oxid berylnatý (BeO). Dielektrická vrstva by měla být co nejtenčí, protože dielektrická vrstva má z celého kovového substrátu nejhorší odvod tepla. [10, 31]

Ve srovnání se substrátem FR4 má dielektrická vrstva u IMS substrátů 3 – 20krát větší tepelnou vodivost. Elektrický odpor dielektrické vrstvy oproti FR4 je 1,5 – 2krát větší. [10]

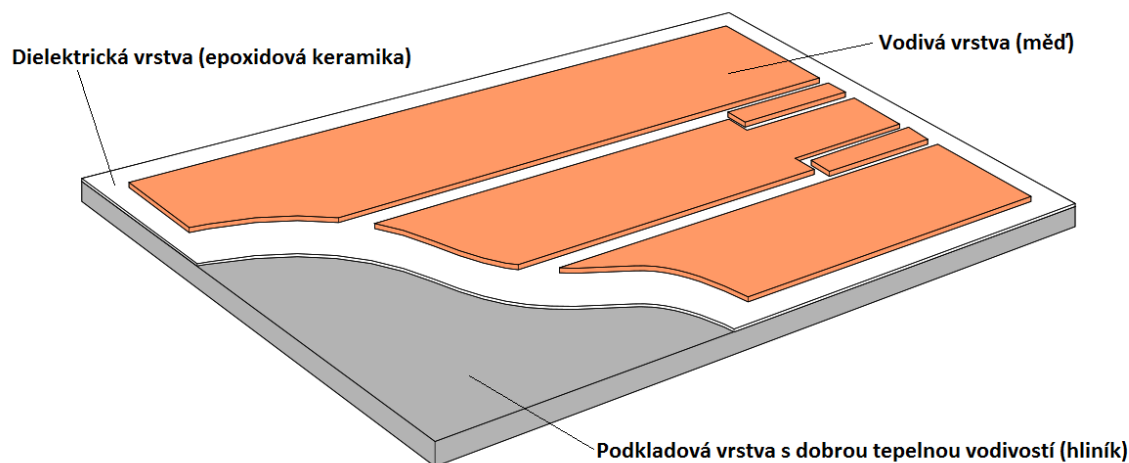
Poslední vrstvou je vodivá vrstva, která je nanášena na dielektrické vrstvě a slouží k vodivému propojení jednotlivých komponentů. Vodivá vrstva je tvořena měděnou fólií nebo nanášenou vodivou pastou metodou sítotisku, která je následně vypalována. Používané vodivé pasty jsou stříbrné nebo měděné z důvodu vysoké elektrické vodivosti

těchto materiálů. Tloušťka vodivé vrstvy je 35  $\mu\text{m}$  – 105  $\mu\text{m}$ . Znázornění jednotlivých vrstev u IMS substrátu je vidět na obr. 1.2. [10]

Průrazné napětí dielektrické vrstvy se pohybuje v rozmezí 1,5 – 8 kV a je úměrné tloušťce dielektrické vrstvy. Po překročení této hranice může dojít k průrazu dielektrické vrstvy a k vyřazení celého systému a tím i k nevratnému poškození substrátu. Důležité je také zamezit prudkým výkyvům v pracovních teplotách. Prudké výkyvy pracovních teplot mohou mít za následek vznik prasklin v dielektrické vrstvě a může dojít k průrazu této vrstvy. [10]

U IMS substrátů je možné použít i vícevrstvé struktury tak, že se na každou vodivou vrstvu opět aplikuje další vrstva dielektrické vrstvy. Při tvorbě vícevrstvé struktury je důležitým parametrem tepelná roztažnost materiálů. [10]

Izolované kovové substráty používáme tam, kde je potřeba přenášet velké výkony a zároveň zajistit dobrý odvod tepla. Konkrétní případ použití jsou výkonové LED zařízení. [11-12]



Obr. 1.2 IMS substrát (překresleno z [37])

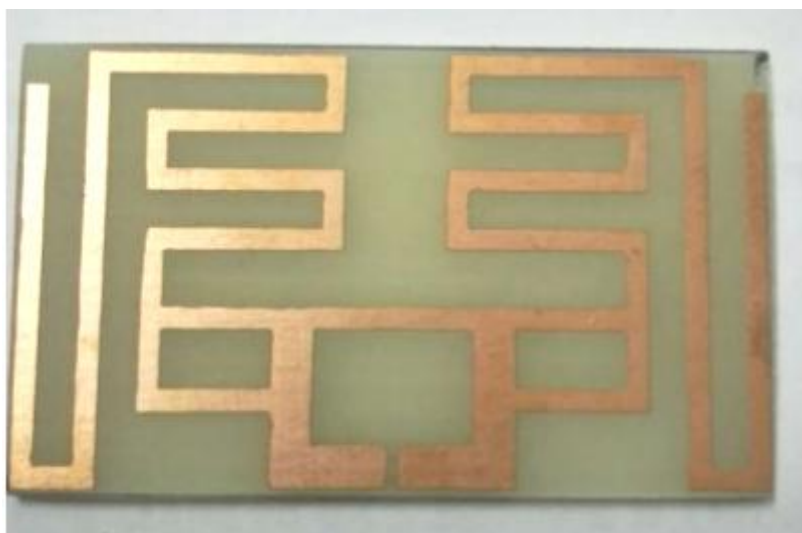
#### 1.1.4 FR4

FR4 (Fire Retardant) znamená třídu označení, která je přiřazena ke sklolaminátovým epoxidovým deskám s plošnými spoji. FR4 slouží jako podkladová deska, na které je z jedné nebo z obou stran natištěn vodivý motiv či je nanesena měděná folie, na kterou se vyleptá požadovaný motiv. Jedná se o kompozitní materiál, který se skládá ze skelných

vláken spojených epoxidovou pryskyřicí, která funguje jako pojivo. Výsledná deska je nehořlavá a má dobré izolační vlastnosti. Desky odolávají teplotě do 120 °C, po překročení této teploty dochází k roztavení desky, ale nikoliv ke vzniku plamenů. FR4 substráty najdou využití při tvorbě spínačů, relé, transformátorů. Nejčastěji se používají ve slaboproudé elektronice například jako základová deska v počítačích. [13-15]

Příklad desky FR4 s nanesenou vodivou vrstvou je vidět na obr. 1.3.

Ve srovnání s keramickými substráty mají substráty FR4 daleko horší tepelnou vodivost ( $0,8 - 1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), což vede k přehřívání míst na desce a ke snižování životnosti instalovaných součástek, zejména polovodičů. [14-15]



Obr. 1.3 Substrát FR4 s měděným vodivým motivem (převzato z [39])

## 1.2 Materiály použité u IMS substrátů

Jak již bylo řečeno, IMS substráty se skládají ze základové vrstvy, dielektrické vrstvy a vodivé vrstvy. Nejdůležitější vlastností materiálů použitých u IMS substrátů je tepelná vodivost, která by měla být co nejvyšší. Kovové substráty musí splňovat hlavně podmínku pro dobrou tepelnou vodivost, a proto je kladen důraz na použití dobře tepelných materiálů ve vodivé a v především dielektrické vrstvě.

### 1.2.1 Základová deska

Základová deska u IMS substrátů je tvořena tlustou vrstvou hliníku, mědi nebo různých slitin hliníku.



### 1.2.1.1 Měď

Měď je chemický prvek s označením Cu, který patří do 11. skupiny periodické tabulky prvků. Měď se získává ze sulfidické rudy, která zpravidla obsahuje pouze 1 % mědi. Ze sulfidické rudy se měď získává pražením, tavením a besemerací. Měď má červenou barvu a krystalizuje v krychlové plošně centrované mřížce. Má vynikající tepelnou ( $395 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a elektrickou vodivost ( $59,6\cdot 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ). S výskytem nečistot v mědi a s růstem teploty klesá elektrická vodivost. Rezistivita mědi je  $0,0162\cdot 10^{-6} \text{ }\Omega\cdot\text{m}$ , což znamená, že má měď velmi malý elektrický odpor. Měď se vyznačuje také dobrou zpracovatelností, vysokou svařitelností a odolností vůči korozi. Odolnost vůči korozi dále zesiluje v oxidačních prostředích, ve kterých se měď pokrývá tenkou vrstvou sloučenin. Tyto sloučeniny jsou tvořeny oxidy, uhličitany sulfidy, chloridy a sírany a chrání měď před další korozi. Působení sloučenin na povrchu mědi upravuje také její barvu patinou nebo měděnkou. Naopak neblahé účinky na odolnost vůči korozi má přítomnost síry, která korozi u mědi vyvolává. Měď se z 55 % používá na výrobu měděných výrobků a ze 45 % se používá na výrobu slitin. Čistá měď se používá na výrobu drátů, sdělovacích vodičů, silnoproudých kabelů, vinutí točivých a netočivých strojů. Mimo oblast elektrotechniky se měď používá například na výrobu okapů nebo na vrchní opláštění střech a kostelních věží, na kterých lze dobře vidět zelenou barvu měděnky. Mezi slitiny mědi patří mosazi a bronzy. Mosaz je označení pro slitinu mědi a zinku (Cu + Zn). Všechny ostatní slitiny mědi s výjimkou mosazí se označují jako bronzy. Měď se rozděluje dle mechanických vlastností na měkkou, polotvrdou a tvrdou. Měkká měď má pevnost menší než  $30 \text{ kg}/\text{mm}^2$  a vyrábí se z ní silové a sdělovací vodiče a vinutí elektrických strojů. Polotvrdá měď má pevnost  $30 - 36 \text{ kg}/\text{mm}^2$  a vyrábí se z ní rotorové vinutí turboalternátorů. Tvrdá měď má pevnost až  $40 \text{ kg}/\text{mm}^2$  a vyrábí se z ní kontakty spínačů a lana vedení pro venkovní použití. [16-20, 43]

Pro výrobu vodičů se používá elektrovodná měď, která má čistotu mědi 99,9 % – 99,97 %. Tato měď se vyznačuje velmi vysokou vodivostí a velmi dobrou odolností vůči korozi. Elektrovodná měď se označuje jako E Cu. Pro použití v plošných spojích se používá vysoce čistá elektrovodná měď s čistotou 99,999 %. [17]

Nevýhoda mědi je vodíková nemoc mědi, která vzniká při žíhání mědi při vysokých teplotách (nad  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ), kdy vodík difunduje do mědi. Vodík pak v mědi reaguje s oxidy,

což způsobí vznik vodní páry, která není schopná difuze, a proto dochází k tlaku molekul H<sub>2</sub>O na okolí a mohou vzniknout prasklinky v mědi. K tomuto problému dochází, když je obsah O<sub>2</sub> větší než 0,003 %. K zabránění tohoto jevu se musí se žíhání mědi provádět ve vakuu nebo používat tzv. bezkyslíkatá měď (obsah kyslíku do 0,003 %). Bezkyšlíkatá měď se používá ve vakuové elektrotechnice při výrobě vysílacích elektronek. [16-17]

### 1.2.1.2 Hliník

Hliník je chemický prvek s označením Al, který patří do 13. skupiny periodické tabulky prvků. Hliník se získává elektrolýzou z taveniny bauxitu a kryolitu při teplotě 950 °C, kdy se na katodě vylučuje hliník. Hliník má bílou barvu a krystalizuje v krychlové plošně centrované mřížce. Má vynikající tepelnou ( $229 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) a dobrou elektrickou vodivost ( $37,7\cdot 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ). S výskytem nečistot v mědi a s růstem teploty klesá elektrická vodivost. Rezistivita hliníku je  $0,0267\cdot 10^{-6} \Omega\cdot\text{m}$ , což znamená, že má hliník velmi malý elektrický odpor. Čistý hliník se vyznačuje malou pevností, značnou měkkostí a dobrou tvárností. Při nízkých teplotách hliník nekřehne, ale naopak se zlepšují jeho elektrické a mechanické vlastnosti (pevnost, tažnost, pružnost). Ačkoliv má hliník pouze 60 % elektrické vodivosti mědi, tak má díky nižší hustotě 3x nižší hmotnost než měď, proto najde uplatnění zejména ve vodičích pro venkovní použití s přenosem vysokých napětí. Hliník je na vzduchu velmi stálý, protože při kontaktu se vzduchem se na jeho povrchu vytvoří tenká nevodivá vrstvička oxidu hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tato vrstvička se vyznačuje také tvrdostí. Vrstvička Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> chrání hliník před korozi a degradací materiálu. Nevýhoda hliníku je jeho sklon k tečení za studena, který se projevuje hlavně v zásuvkách, kdy hliník pod kontaktem „vyteče“ a tím vznikne mezera, ve které je špatný elektrický kontakt a proto se musí kontakty průběžně dotahovat. Této nevýhodě se dá předejít použitím domácích rozvodů z mědi. [16-17, 21-24, 43]

Obvyklá čistota hliníku je 99,5 %, kde hlavními nečistotami je železo a křemík. V elektrotechnice se většinou používá elektrovodný hliník, který se značí E Al a má čistotu 99,99 – 99,9999 %. Elektrovodný hliník se získává rafinací čistého hliníku. Tento proces lze opakovat a tím tak dosáhnout téměř 100% čistoty hliníku. Elektrovodný hliník se používá k výrobě vodičů na venkovní vedení pro nízké, vysoké i velmi vysoké napětí. Tyto vodiče se zpevňují ocelovým lanem, které slouží jako nosný prvek, protože hliník je křehký. Vodiče s nosným ocelovým lanem se označují jako AlFe. Dále se elektrovodný

hliník používá na výrobu vinutí elektrických strojů (transformátory, klece rotorů asynchronních motorů), folii na svitkové kondenzátory, mikrodrátků pro mikroelektroniku a chladičů elektrických zařízení. [16-17, 21]

Z většiny vyrobeného hliníku se dále vyrábí další slitiny, ze 47 % se hliník používá pro výrobu slévárenských slitin a z 15 % pro výrobu tvářených slitin. Slitiny se vyrábí z důvodu zvýšení mechanické pevnosti a snížení tečení za studena. Většina takto získaných materiálu slouží ke konstrukčním účelům. [16-17]

Tab. 1.1 Slitiny hliníku a jejich značení [40]

Označení skupiny	Materiály použité na slitinu
1000	Obsah hliníku 99%, čistý hliník s malým procentem nečistot
2000	Hliník s mědí
3000	Hliník s manganem
4000	Hliník se silikonem
5000	Hliník s hořčíkem
6000	Hliník s hořčíkem a silikonem
7000	Hliník se zinkem
8000	Hliník s ostatními prvky, většinou s lithiem

## 1.2.2 Dielektrická vrstva

Dielektrická vrstva u IMS substrátů je na bázi epoxidové pryskyřice plněná částicemi práškové keramiky. Používanými keramickými materiály, které se smíchávají s epoxidovou pryskyřicí, jsou korund neboli oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nitrid hliníku ( $\text{AlN}$ ) a oxid berylnatý ( $\text{BeO}$ ).

### 1.2.2.1 Oxid hlinitý

Oxid hlinitý neboli korund má chemický vzorec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Je to pevná látka patřící k oxidové keramice. Oxid hlinitý je nejrozšířenější izolační materiál z oblasti oxidové keramiky. Vlastnosti oxidu hlinitého jsou vysoká tvrdost, pevnost, odolnost proti korozi, vysoká provozní teplota bez poškození materiálu (1000 – 1500 °C), vysoká teplota tání (2030 °C), křehkost, vysoká rezistivita ( $1 \cdot 10^{12}$  -  $1,2 \cdot 10^{13}$   $\Omega \cdot \text{m}$ ). Relativní permitivita je v rozmezí 9,1 - 9,8 [-] při frekvenci 1 MHz. Koeficient teplotní roztažnosti je  $8,1 \cdot 10^{-6}$  –  $8,4 \cdot 10^{-6}$   $\text{K}^{-1}$ . I přes nižší tepelnou vodivost (20 – 30  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) je u kovových substrátů používán díky nízké ceně. Hodnoty se liší v závislosti na čistotě oxidu hlinitého, nečistoty mohou být Si, Ca, Mg. U kovových substrátů se používá oxid hlinitý o čistotě 94 – 99,5 %. [5,10,17]

Oxid hlinitý je bílý prášek, který se vyrábí ze sloučeniny bauxitu nebo se dá rovnou vytěžit ve formě přírodního korundu. Spékání oxidu hlinitého probíhá při teplotách 1600–1800 °C v atmosféře vodíku. Oxid hlinitý najde využití v substrátech pro výkonovou elektroniku, při výrobě brusných materiálů a kotoučů, v balistické ochraně nebo při výrobě žáruvzdorných kelímků. [10,17]

### 1.2.2.2 Nitrid hliníku

Nitrid hliníku má chemický vzorec AlN. Je to pevná látka patřící do technických keramických materiálů. Vlastnosti nitridu hliníku jsou vysoká tvrdost, pevnost, chemická odolnost, vysoká provozní teplota bez poškození materiálu (800 °C), vysoká teplota tání (2200 °C), vysoká rezistivita ( $>1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ ). Relativní permitivita je 9 [-] při frekvenci 1 MHz. Koeficient teplotní roztažnosti je  $3 \cdot 10^{-6} - 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Má vysokou tepelnou vodivost ( $>170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Díky výborným elektroizolačním vlastnostem a vysoké tepelné vodivosti je hojně využíván jako dielektrická vrstva u kovových substrátů. [6, 10]

Nitrid hliníku je bílý až světle žlutý prášek, který se vyrábí nitridací hliníku. Spékání oxidu hlinitého probíhá při teplotách 1600 – 1800 °C v atmosféře vodíku. Nitrid hliníku najde využití v substrátech pro výkonovou elektroniku, u DBC a TPC substrátů se používá jako nosná vrstva. [7, 10]

### 1.2.2.3 Oxid berylnatý

Oxid berylnatý má chemickou vzorec BeO. Je to pevná látka patřící do technických keramických materiálů. Vlastnosti oxidu berylnatého jsou vysoká tvrdost, pevnost, odolnost proti korozi, žáruodolnost, vysoká provozní teplota bez poškození materiálu, vysoká teplota tání (2507 °C), vysoká rezistivita ( $>1 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ ). Relativní permitivita je 6,6 [-] při frekvenci 1 MHz. Koeficient teplotní roztažnosti je  $5 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Má vysokou tepelnou vodivost ( $265 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). I přes své výborné elektroizolační vlastnosti a vysokou tepelnou vodivost není oxid berylnatý moc používán, protože jeho prášek je toxický, karcinogenní a při vdechnutí prudce jedovatý. V pevné formě je oxid berylnatý bezpečný, ale už by se neměl dále nijak opracovávat, aby nedocházelo k uvolňování nebezpečných částic a prachu. Je to jeden z nejdražších materiálů používaných v keramických substrátech. Důvodem je nákladná výroba, kdy se musí

s práškem z důvodu jeho nebezpečnosti pracovat velmi opatrně a dodržovat bezpečnostní postupy. [10, 61]

Oxid hlinitý je bílý nebo bezbarvý prášek, který se vyrábí žháním berylnatých sloučenin nebo zapalováním beryllia v kyslíku. Oxid hlinitý najde využití v substrátech pro výkonovou elektroniku, při výrobě raketových motorů nebo při výrobě součástek pro mikrovlnou a rentgenovou techniku. [10, 61]

#### 1.2.2.4 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice je materiál syntetického původu patřící mezi reaktoplasty. Nevytvrzená epoxidová pryskyřice je ve formě viskózní lepkavé kapaliny. Vytvrzená epoxidová pryskyřice je pevná látka, jejíž vlastnosti jsou tvrdost, křehkost, tepelná a chemická odolnost. Tepelná vodivost u vytvrzených epoxidových pryskyřic je velmi malá v rozmezí  $0,682 - 1,038 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . [31, 62]

Epoxidová pryskyřice je čirý materiál, jak v tekutém stavu, tak po vytvrzení. Vyrábí se polykondenzací epichlorhydrinu a bisfenolu A. Vytvrzení epoxidové pryskyřice se provádí přidáním tvrdidla, které je většinou založené na formaldehydové pryskyřici. Vytvrzování se provádí za pokojové nebo zvýšené teploty, která vytvrzení urychlí. Vytvrzením vznikají mezi jednotlivými molekulami chemické vazby. Epoxidové pryskyřice se nejčastěji používají jako lepidlo nebo pojivo, do kterého se přidávají další materiály, například částičky keramiky u dielektrických past určených pro kovové substráty nebo u sklolaminátových vláken při výrobě kompozitních materiálů. [62]

#### 1.2.3 Vodivá vrstva

Vodivá vrstva u IMS substrátů je tvořena stříbrnou nebo měděnou vrstvou.

##### 1.2.3.1 Stříbro

Stříbro má chemickou značku Ag, je to kov, který má bílou barvu a má vysoký lesk. Mezi jeho vlastnosti patří dobrá tvářitelnost, lze z něj vytepat plátky o tloušťce 0,005 mm, chemická odolnost, odolnost proti korozi. Mezi kovy patří k nejlepšímu elektrickému a tepelnému vodiči. Elektrická vodivost stříbra je  $63.10^6 \text{ S.m}^{-1}$ , tepelná vodivost stříbra je  $418 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  a rezistivita je  $0,0152.10^{-3} \Omega.\text{m}$ . [16-17, 43-44]

Stříbro se v zemské kůře nachází ve sloučeninách. Ze sloučenin se stříbro vyrábí pomocí kyanidového loužení stříbrných rud. Čistění stříbra, s přísadou zlata či platiny, na ryzí stříbro se provádí elektrolytickou rafinací. Stříbro se využívá k výrobě pojistek, kontaktů, vodivých částí, slitin, pájek nebo šperků. U kovových substrátů se stříbro používá jako materiál na vodivou vrstvu z důvodu největší elektrické vodivosti ze všech kovů. [16-17, 63]

### **1.2.3.2 Měď**

Vlastnosti mědi jsou popsány v bodě 1.2.1.1.

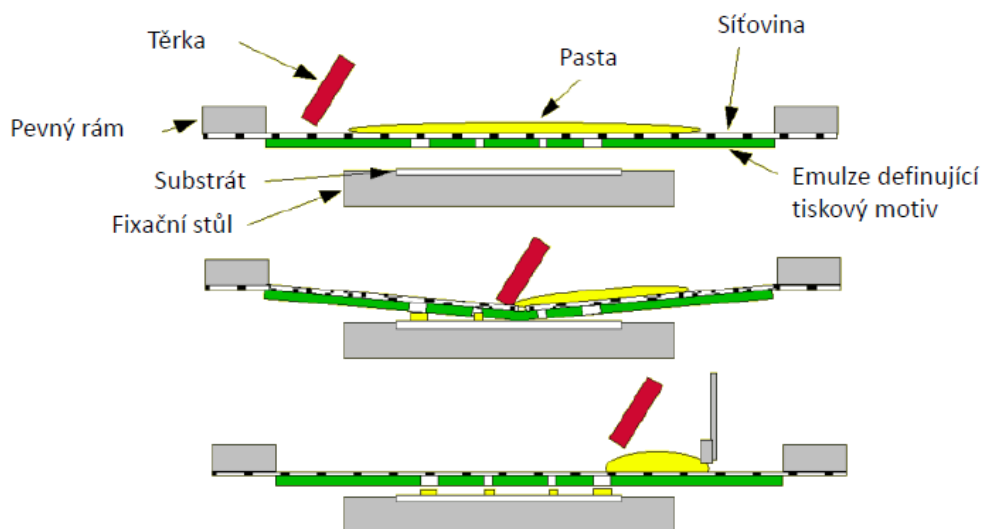
## 2 Metody nanášení past

### 2.1 Sítotisk

Sítotisk funguje na principu aditivního nanášení barvy nebo pasty přes síto na podkladový materiál. Technologie sítotisku se používá při velkoformátovém tisku, potisku fólií, tisku na textil, v elektrotechnice na desky plošných spojů a všude tam, kde potřebujeme větší nános materiálu na podkladový materiál. Obecně se sítotisk dělí na grafický, umělecký, textilní, technický a speciální. Pro uskutečnění sítotiskové technologie potřebujeme síťovinu napnutou na rámu s vytvořenou tiskovou šablonou, nanášený materiál a zařízení umožňují přenos aditivního materiálu k podkladovému materiálu. Sítotiskové zařízení mohou být ruční, poloautomatické a automatické. Princip sítotisku je znázorněn na obr. 2.1. [25-28]

Sítotiskové šablony tvoří fotocitlivá emulze, která zakryje ta oka síta, kudy nechceme protlačit vodivou pastu a naopak oka, kudy máme protlačit pastu, zůstanou nezakrytá. Sítotiskové šablony dělíme na přímé, nepřímé a kombinované. U přímé šablony je fotocitlivá emulze nanesena na síto, poté se přiloží požadovaný motiv vytisknutý na folii a následně dojde k exponování a nakonec k vyvolání. Po vyvolání vzniknou na sítu „cesty“, kudy se dá protlačit vodivá pasta. U nepřímé šablony se používá fotocitlivá emulze v listovém provedení. Tento list se nejprve zpracuje fotoprocem a následně se aplikuje na síto. U kombinované šablony se používá fotocitlivá emulze v listové formě. List se nejprve aplikuje na síto a následně se zpracuje fotoprocem. Nejvyšší životnost mají přímé šablony a to až 100 000 tisků. Kombinované šablony mají životnost 60 000 – 80 000 procesů a nepřímé 2000 – 4000. [25-26]

V elektrotechnice využíváme sítotisk při tvorbě desek plošných spojů kvůli hospodárnosti a výkonnosti. Technologie sítotisku nejprve sloužila pro nanášení leptuvzdorných rezistů, dnes se používá k nanášení pájecích past, fotorezistů, lepidel, servisních potisků (obrysy, značky) a dalších aditivních vrstev. [25-28]



Obr. 2.1 Princip sítotisku (převzato z [26])

### 2.1.1 Síta

Síta pro sítotisk se vyrábí z tkaniny, která je natahována na sítotiskové rámy. Správné natažení síta na rám je důležitým faktorem, který ovlivňuje výslednou kvalitu tisku. Tato síta slouží k přenosu aditivního materiálu na desku plošného spoje, který se protlačí skrz neuzavřené otvory síta těrkou. Základní materiál pro sítotisková vlákna jsou buď syntetická vlákna (polyamid, polyester), pokovená nebo kovová vlákna. Zvolení vhodné síťoviny ovlivňuje výsledný obrazec, proto je nutné zvolit vhodný materiál na síto podle požadovaných parametrů. Důležitými parametry síta je počet vláken na cm, velikost otvorů, pružnost, materiál a tloušťka vláken. Požadované parametry na výsledný tisk je ostrost a jemnost motivů, struktura povrchu, přesnost, tloušťka naneseného materiálu a velikost částic pasty. Z důvodu zaručení správné funkčnosti síta je nutné, aby byla velikost otvorů síta 2,5 - 3krát větší než velikost částic pasty. [25-26, 30]

Nejrozšířenější aplikací na výrobu síta jsou polyesterová vlákna, která mají dobrou pružnost, pevnost v tahu a schopnost udržet si své napnutí i při delším používání. Polyamidová vlákna mají větší pružnost než polyesterová vlákna a jsou vhodná pro aplikace, kde nevádí větší protažení vlákna, proto se hodí na nerovné povrchy a mají dobrou odolnost vůči abrazivním látkám. Nevýhodou polyamidových vláken je, že se nesmí použít barvy na bázi vody, protože při kontaktu s vodou může dojít k bobtnání těchto vláken. Kovová vlákna mají rozměrovou stabilitu, ale nemají skoro žádnou pružnost, což klade těžší podmínky na nastavení tisku, především vzdálenosti síta od desky a tlaku na těrku. Pokovená polyesterová vlákna mají základ v polyesterovém vlákně,



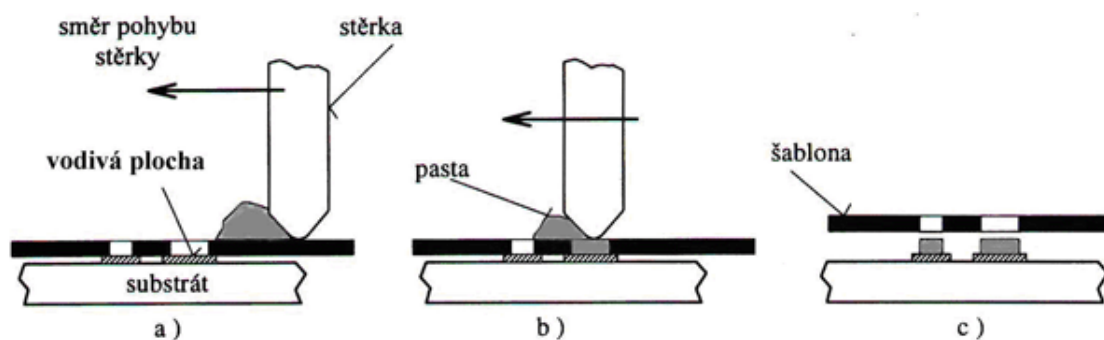
na který je galvanicky nanášena velmi tenká vrstva kovu. Tato vlákna mají větší pružnost než kovová vlákna a současně vyšší pevnost v tahu než polyesterová vlákna. [25-26, 30]

### 2.1.2 Rámy

Rámy slouží ke správnému upevnění síta a k dokonalému napnutí. Nejčastějším materiálem pro výrobu ráků jsou hliník a ocel. Rámy se vyrábí z trubek nebo profilů, které se svařují do pravých úhlů. Dříve se k výrobě ráků používalo dřevo, ale od toho bylo z důvodu nízké životnosti upuštěno. Hliníkové rámy mají oproti ocelovým rákům výhodu v nižší hmotnosti a delší životnosti díky antikoročním vlastnostem, a proto jsou více využívány. [25-26, 30]

## 2.2 Šablonový tisk

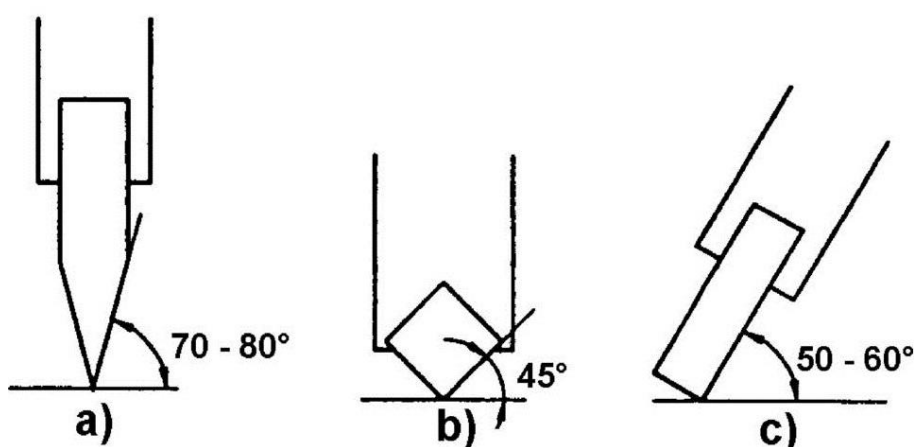
Princip šablonového tisku je podobný jako u sítotisku, pouze místo síta používáme šablonu s předem vyřezanými otvory pro umístění vodivé pasty, která se umísťuje rovnou na substrát a sejme se po aplikaci vodivé pasty. Vodivá pasta se aplikuje stejně jako u metody sítotisku těrka. Těrka se přímo pohybuje po šabloně. Princip šablonového tisku je znázorněn na obr. 2.2. Tloušťka pasty je přímo úměrná tloušťce šablony, proto musíme předem znát tloušťku vodivé cesty a k tomu zvolit dostatečně tlustou šablonu. Díky předem připravené šabloně lze také dosáhnout přesnějšího přenášeného motivu. Nevýhodou šablonového tisku je, že nelze tisknout uzavřené motivy. Šablony se vyrábí z mosazi, mědi, nerezové oceli nebo plastů. Nejpoužívanějším materiálem na výrobu šablony je mosaz díky snadnému leptání. Šablony můžeme vyrábět buď laserovým vyřezáváním, leptáním nebo galvanoplastikou. Nejpoužívanější technikou je leptání díky levné technologii. Hotové šablony jsou usazovány do ráků. Rozšířená je i bezrámová technologie, kde jsou šablony pomocí speciálních držáků rovnou připevněny k tiskacímu stroji bez použití ráků, tím se zefektivňuje výroba a snižují se náklady. [25-26]



Obr. 2.2 Šablonový tisk (převzato z[41])

## 2.3 Těrka

Těrka slouží k rovnoměrnému rozetření a k protlačení pasty sítím nebo šablonou, čímž dojde k vytvoření vodivých cest na desce plošného spoje. Nanášení pasty těrku může být manuální nebo automatické, kdy těrku řídí stroj. Důležité předpoklady ke správnému nanesení pasty závisí na rovnosti povrchu, přítlaku, rychlosti posuvu a úhlu mezi těrku a šablonou. Materiál, který se používá k výrobě terek, je pryž nebo kov. Pryž je používána kvůli pružnosti, levné výrobě a použití na šablonách s nedokonale rovným povrchem. Pryžové těrky nejsou vhodné pro použití na šablonách se širokými otvory, protože dochází k nabírání pasty z otvorů šablony. U kovových šablon tento nedostatek odpadá. Kovové těrky jsou odolnější vůči opotřebenosti a dokáže se s nimi nanést velmi rovnoměrná vrstva pasty. Nevýhodou kovových terek je vyšší cena a větší opotřebenosti šablon z důvodu tření kovu kovem. Těrku přikládáme na síto vždy tak, aby se dotýkala síta pouze hranou těrky. Tvar hrany těrky může být obdélníkový, se skoseným profilem (z jedné nebo z obou stran) nebo zakulacený. Tvary hran terek s nanášecími úhly jsou na obr. 2.3. [25-26, 29]



Obr. 2.3 Různé tvary terek s naznačenými nanášecími úhly a) se skoseným profilem, b) se čtvercovým profilem, c) s obdélníkovým profilem (převzato z [42])

### 3 Sítotiskové pasty

Vodivé pasty používané při tvorbě desek plošných spojů jsou tvořené kuličkami, pojivem a případně ještě plnivem. Kuličky jsou speciálně odlévané ve vakuu a jsou veliké 20 až 45 mikronů. Tyto kuličky musí mít dokonale sférický tvar, aby se daly dobře nanášet metodou sítotisku. Materiál na výrobu kuliček může být cín, měď, stříbro nebo zlato. Pojivo je důležité z důvodu pojivosti pasty a přilnavosti k povrchu. Jako pojivo se používají pryskyřice, které se rozlišují podle tvrzení pasty. Pasty můžeme tvrdit teplem nebo UV zářením. V pastách, které jsou nejprve sušené a poté tvrzené teplem, používáme nejčastěji epoxidové pryskyřice. Při tvrzení pasty pomocí UV zářením používáme pryskyřice tvrditelné UV zářením, kterými jsou například estery kyseliny akrylové, polyetery, uretany. [25, 27]

Při nanášení je důležité, aby byla pasta dokonale promíchaná a tvořila sourodou hmotu. Kuličky musí být dokonale obaleny pojivem a aktivátory, aby nedošlo k oxidaci kuliček. Poměr kuliček a pojiv by měl být přibližně 50%. Důležité také je, aby výsledná pasta měla tixotropní vlastnosti, tzn. při míchání se tuhá pasta rozlévá a při nanášení projde sítím, případně šablonou, pak zavadne a při zvedání šablony na chvíli přejde zpět do tekutého stavu a dojde k dokonalému oddělení šablony od desky a pasta zůstane přilnutá na podkladové desce. Pokud není pasta dobře promíchaná nebo obsahuje špatný poměr kuliček a pojiva může při nanášení a při oddělování šablony docházet k trhání pasty či odtrhnutí od podkladové desky. [25, 27]

Pasty tvrditelné za tepla se nejprve suší. Sušení může probíhat při běžných pokojových teplotách nebo urychleně při teplotách 80 – 150 °C. Suchá pasta se dá odstranit ředidlem, což je využíváno při opravách motivů. Poté následuje vytvrzování past v pecích za zvýšené teploty. [25]

Pasty tvrditelné pomocí UV záření se tvrdí UV zářením v pásmu 250 – 400 nm. [25]

#### 3.1 Dielektrické pasty pro Al a Cu substráty

Jedná se o speciálně vytvořené typy dielektrických past, které jsou uzpůsobené pro použití na kovových substrátech. Dielektrické vrstvy pro Al a Cu substráty jsou tvořeny epoxidovými pryskyřicemi, které jsou plněny částicemi práškové keramiky.

Částečky práškové keramiky se používají z materiálů, které mají dobrou tepelnou vodivost. Tyto materiály by také měly mít nízkou teplotní roztažnost, vysokou rezistivitu a nízkou relativní permitivitu z důvodu snížení, v ideálním případě odstranění kapacity. Používanými keramickými materiály jsou korund neboli oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nitrid hliníku ( $\text{AlN}$ ) a oxid berylnatý ( $\text{BeO}$ ).

Tab. 3.2 Hodnoty tepelné vodivosti, rezistivity, relativní permitivity a koeficientu tepelné roztažnosti u materiálů, které jsou používány v dielektrické vrstvě [5-6, 10, 31]

Materiál	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Rezistivita $\rho$ [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]	Relativní permitivita při 1MHz $\epsilon_r$ [-]	Koeficient teplotní roztažnosti $\gamma$ [ $\text{K}^{-1}$ ]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20 - 30	$1\cdot 10^{12}$ - $1,2\cdot 10^{13}$	9,1 - 9,8	$8,1\cdot 10^{-6}$ - $8,4\cdot 10^{-6}$
$\text{AlN}$	> 170	> $1\cdot 10^{11}$	9	$3\cdot 10^{-6}$ - $4,5\cdot 10^{-6}$
$\text{BeO}$	265	> $1\cdot 10^{13}$	6,6	$5\cdot 10^{-6}$ - $8\cdot 10^{-6}$
Epoxidová pryskyřice	0,682 - 1,038	-	-	-

Dielektrická vrstva je nanášena v tloušťkách 35-150  $\mu\text{m}$ . Tato vrstva musí splňovat vlastnosti na dobrou tepelnou vodivost a velký elektrický odpor. Tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí 1 – 6  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a rezistivita v rozmezí  $1,2\cdot 10^{12}$  -  $1,2\cdot 10^{13}$   $\Omega\cdot\text{m}$ . Výsledná tepelná vodivost dielektrické vrstvy závisí na poměru epoxidu a keramických částicích. Velký elektrický odpor je důležitý při použití vysokého napětí, aby nedošlo k průrazu dielektrické vrstvy a tím i vyřazení funkčnosti celého systému. [10]

### 3.2 Vodivé pasty na Al a Cu substráty

Jedná se o speciálně vytvořené typy vodivých past, které jsou uzpůsobené pro použití na kovových substrátech. Nejčastěji se pro vodivé pasty u Cu a Al substrátů používají stříbrné pasty, které mají lepší elektrickou vodivost než měděné pasty. U měděných past je důležité, aby byly vypalovány v atmosféře dusíku. Důležitým parametrem u vodivých past je vysoká elektrická vodivost, nízká rezistivita a vysoká tepelná vodivost.

Tab. 3.1 Tabulka elektrické vodivosti, rezistivity a tepelné vodivosti u stříbra a mědi při 20 °C [17, 43-44]

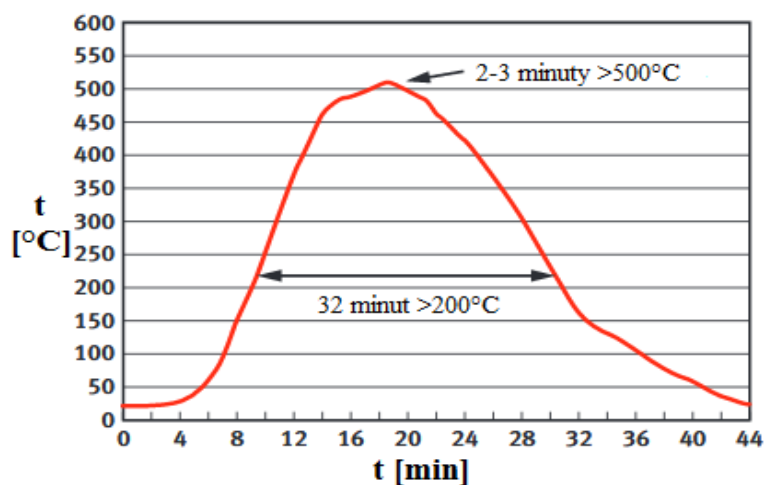
Materiál	Elektrická vodivost $G$ [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Rezistivita $\rho$ [ $\Omega\cdot\text{m}$ ]	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Stříbro	$63\cdot 10^6$	$0,0152\cdot 10^{-6}$	418
Měď	$59,6\cdot 10^6$	$0,0169\cdot 10^{-6}$	395

### 3.3 Rešerše past na Cu a Al substráty

#### 3.3.1 Dielektrické pasty

Porovnání důležitých hodnot u dielektrických past od výrobců ELS Electroscience, DuPont a Heraeus jsou uvedena v tabulce 3.3. Dielektrické pasty se vyrábí v různých odstínech šedé, zelené, béžové. Barva pasty se liší podle výrobce. Nejdůležitější parametry u dielektrické vrstvy jsou elektrický odpor, tepelná vodivost, průrazné napětí a relativní permitivita. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 3.3. Parametry elektrický odpor, tepelná vodivost a průrazné napětí by u dielektrické vrstvy měly být co nejvyšší. Hodnota parametru relativní permitivity by měla být naopak co nejnižší z důvodu dosažení nejnižší kapacity. Průrazné napětí uvedené v tabulkách je vždy vztažené na doporučenou hodnotu tloušťky dielektrické vrstvy. Hodnota relativní permitivity je platná pro frekvenci 1 kHz. Všechny firmy vyrábí ke svým dielektrickým pastám vždy i kompatibilní vodivé pasty.

Po nanesení dielektrické pasty se pasta nechá pár minut zavadnout při pokojové teplotě, poté se suší při zvýšené teplotě, dále se vypačuje při maximální teplotě a nakonec se nechává pozvolna vychladnout. Každý výrobce má jinou celkovou dobu vypalovacího cyklu, maximální teplotu i dobu, kdy působí maximální teplota. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.3. Například u dielektrické pasty DuPont AS100 se nechává pasta 4 minuty zavadnout při pokojové teplotě, poté se suší 10 minut při teplotě cca 150 °C, dále se 2-3 minuty vypaluje při teplotě 500-510 °C a nakonec chladne. Celková doba vypalovacího cyklu u této pasty je 45-50 minut. Průběh vypalovacího cyklu u této pasty je znázorněn na obr. 3.1. [47]



Obr. 3.1 Graf vypalovacího cyklu u dielektrické pasty DuPont AS100 znázorňující závislost teploty na čase. (překresleno z [47])

Tab. 3.3 Porovnání dielektrických past z hlediska kompatibilní verze hliníku, doporučené tloušťky podkladového materiálu, odporu, tepelné vodivosti, průrazného napětí, optimální tloušťky dielektrika po vypálení, maximální teploty při vypalování, doby působení maximální teploty, celkové doby vypalovacího cyklu [45-49]

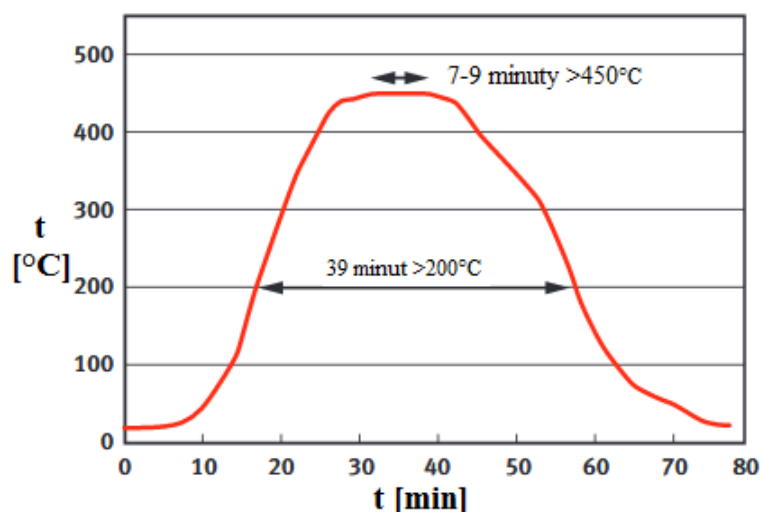
Výrobce	Typové označení	Kompatibilní verze hliníku	Doporučená tloušťka podkladového substrátu [mm]	Odpor [ $\Omega$ ]	Tepelná vodivost [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]	Průrazné napětí [V DC]	Relativní permitivita [-]	Optimální tloušťka dielektrika po vypálení [ $\mu m$ ]	Maximální teplota vypalování [ $^{\circ}C$ ]	Doba maximální teploty [min.]	Celková doba vypalovacího cyklu [min.]	Kompatibilní vodivé pasty
ELS Electroscience	4604-A	Skupina 3000 (3003, 3103)	3	$\geq 10^{10}$	-	$\geq 1500$ /65 $\mu m$	-	65-85	580	10	50-60	ELS 599-E, 9912-K, 903-A, 2312-A-3
ELS Electroscience	4605	Skupina 3000 (3003, 3103)	3	$\geq 10^{10}$	-	$\geq 1500$ /65 $\mu m$	-	65-85	580	10	50-60	ELS 599-E, 9912-K, 903-A, 2312-A-3
ELS Electroscience	4613	Skupina 3000, 5000, 6000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DuPont	AS100	-	-	-	1,6	$\geq 3200$ /35 $\mu m$	-	35	500-510	2-3	45-50	DuPont AS300
Heraeus	IP6075	Skupina 3000, 4000, 5000, 6000	$\geq 1,2$	$> 10^9$	1 - 2	$> 1000$ /25 $\mu m$	$< 20$ při 1 kHz	50-60	550-600	2-20	-	Heraeus C7847, C8829B, C8829D
Heraeus	IP6080	Skupina 3000, 4000, 5000, 6000	$\geq 1,2$	$> 10^9$	-	$> 1000$ /25 $\mu m$	$< 20$ při 1 kHz	50-60	550-600	2-20	-	Heraeus C8829B, C8829D

### 3.3.2 Vodivé pasty

Porovnání důležitých parametrů vodivých past od výrobců ELS Electroscience, DuPont a Heraeus jsou uvedena v tabulce 3.4. Nejdůležitější parametr u vodivých vrstev je rezistivita. Rezistivita by u vodičů měla být, co nejnižší, protože z rezistivity se vypočte odpor, který by měl být také co nejnižší. Tento parametr je uvedený v tabulce 3.4. Hodnota rezistivity v tabulkách je vždy vztažena k optimální tloušťce vrstvy po vypálení, která je uvedena ve stejné tabulce.

Vodivé pasty musí být nanесeny na kompatibilní dielektrickou pastu, obě tyto pasty vyrábí vždy stejná firma.

Po nanесení vodivé pasty se pasta nechá pár minut zavadnout při pokojové teplotě, poté se suší při zvýšené teplotě, dále se vypeče při maximální teplotě a nakonec se nechává pozvolna vychladnout. Každý výrobce má jinou celkovou dobu vypalovacího cyklu, maximální teplotu i dobu, kdy působí maximální teplota. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.4. Například u stříbrné vodivé pasty DuPont AS100 se nechává pasta cca 8 minut zavadnout při pokojové teplotě, poté se suší 10 minut při teplotě cca 150 °C, dále se 7-9 minut vypaluje při teplotě 450 °C a nakonec chladne. Celková doba vypalovacího cyklu u této pasty je 75-90 minut. Průběh vypalovacího cyklu u této pasty je znázorněn na obr. 3.2. [54]



Obr. 3.2 Graf vypalovacího cyklu u vodivé pasty DuPont AS300 znázorňující závislost teploty na čase. (překresleno z [54])

Tab. 3.4 Porovnání vodivých past z hlediska vodivého materiálu pasty, rezistivity, optimální tloušťky dielektrika po vypálení, maximální teploty při vypalování, doby působení maximální teploty a celkové doby vypalovacího cyklu [50-56]

Výrobce	Typové označení	Materiál	Rezistivita [mΩ.m]	Optimální tloušťka po vypálení [μm]	Maximální teplota vypalování [°C]	Doba maximální teploty [min.]	Celková doba vypalovacího cyklu [min.]	Kompatibilní dielektrické vrstvy (pasty)
ELS Electroscience	599-E	Stříbro	3-6/12,5 μm	12,5 ± 2,5	400 - 550	10 - 15	-	ELS 4604-A, ELS 4605
ELS Electroscience	9912-K	Stříbro	< 2,5/11,5 μm	11,5	625 - 930	10	60	ELS 4604-A, ELS 4605
ELS Electroscience	903-A	Stříbro	≤ 2/15 μm	15 – 20	850	-	-	ELS 4604-A, ELS 4605
ELS Electroscience	2312-A-3	Měď	≤ 1,5/70 μm	70 – 75	900 - 980	10 - 12	-	ELS 4604-A, ELS 4605
DuPont	AS300	Stříbro	< 1,3/25 μm	13 – 15	450	7 - 9	75 - 80	DuPont AS100
Heraeus	C7847	Měď	≤ 4/25 μm	18 – 26	550 - 600	5 - 7	-	Heraeus IP6075
Heraeus	C8829D	Stříbro	< 3/12 μm	12 – 20	550 - 570	5 - 7	-	Heraeus IP6075, IP6080



### **3.4 Výrobci past pro Cu a Al substráty**

#### **3.4.1 Heraeus**

Heraeus je technologická skupina se sídlem v Hanau v Německu. Tato firma byla založená v roce 1851. Nyní má společnost 100 poboček ve 38 zemích a přibližně 12 500 zaměstnanců. Zaměřuje se na výrobu materiálových systémů, které najdou využití v telekomunikacích, elektrotechnickém, automobilovém a chemickém průmyslu. Společnost se zaměřuje také na výrobu kovových a keramických substrátů, Thick Print Copper substrátů a Direct Bonded Copper substrátů. [32-33]

#### **3.4.2 ESL ElectroScience**

Firma ELS ElectroScience byla založena v roce 1962 se sídlem ve Philadelphii ve Spojených státech amerických. Dnes má firma vývojová centra a výrobní po celém světě. Společnost se zabývá vývojem a výrobou vodivých past, keramických substrátů a dalších materiálů, které najdou své využití při tvorbě desek plošných spojů. [34]

#### **3.4.3 Fraunhofer**

Fraunhofer je výzkumný ústav se sídlem v Mnichově v Německu. Společnost se zaměřuje na výzkum a vývoj v oblasti aplikovaného výzkumu. V dnešní době má společnost 67 výzkumných ústavů po celém Německu a dohromady zaměstnává 24 500 zaměstnanců. Další výzkumné ústavy vlastní společnost ve Skotsku, v Jižní Americe, v Asii a v USA. [35-36]

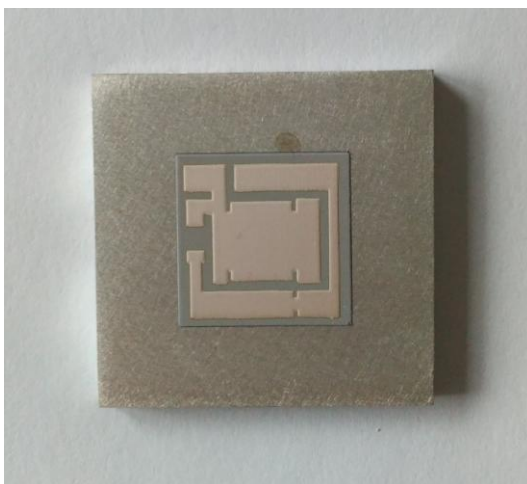
#### **3.4.4 DuPont**

Firma DuPont byla založena v roce 1802 se sídlem ve Wilmingtonu ve státě Delaware ve Spojených státech amerických. Firma vznikla původně jako továrna na střelný prach. V dnešní době je firma jedním z největších výrobců v chemickém průmyslu na světě. Společnost se zaměřuje na výrobu polymerů, barev, chladičů, elektroniky a mnoha dalších odvětví. V této firmě byl vyvinut například neopren, nylon, teflon, kevlar a mnoho dalších široce využívaných materiálů. Dnes společnost působí v 90 státech světa a zaměstnává 52 000 zaměstnanců. V České Republice firma působí v Břeclavi, Praze a ve Smiřicích. [57-59]

## 4 Praktická část

Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na přípravu substrátů k měření a následné měření, dopočítání příslušných hodnot a nakonec porovnání hodnot oproti teoretickým předpokladům. Měřené hodnoty byly kapacita, ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ , proud protékající dielektrickou vrstvou a průrazné napětí. Dopočítané hodnoty jsou relativní permitivita, rezistivita a elektrická pevnost. Měření bylo provedeno na šesti substrátech poskytnutých firmou ELCERAM a.s. Hradec Králové.

První typ substrátu (obr. 4.1) byl zastoupen čtyřmi shodnými substráty, které byly stejné na základové desce ze slitiny hliníku ALMg3-AW-5764, která patří do skupiny slitin hliníku označená jako 6000, o šířce 4 cm, délce 4 cm a výšce 3 mm. Na základové desce z hliníku byla nanесena shodná čtvercová dielektrická vrstva o velikosti 2,1 cm x 2,1 cm. Dielektrická vrstva je tvořena pastou IP6075 od firmy Heraeus o tloušťce přibližně 70  $\mu\text{m}$ . Dielektrická pasta byla vypalována při maximální teplotě 570°, která byla v maximu udržována 8-10 minut. Na dielektrické vrstvě byl nanесený shodný vodivý motiv, který tvoří stříbrná pasta C8829A od firmy Heraeus. Vodivá pasta byla vypalována při maximální teplotě 500°C, která byla v maximu udržována 8-10 minut.



*Obr. 4.1 Substrát 1. typu s nanесenou dielektrickou a stříbrnou vodivou pastou*

Druhý typ substrátu (obr. 4.2) byl zastoupen dvěma shodnými substráty, které byly na stejné základové desce z hliníku se zaoblenými rohy o šířce 6 cm, délce 6 cm a výšce 2,5 mm. Na základové desce z hliníku byla nanесena shodná kruhová dielektrická vrstva o průměru 2,5 cm. Dielektrická vrstva je tvořena pastou IP6075 od firmy Heraeus o tloušťce přibližně 70  $\mu\text{m}$ . Dielektrická pasta byla vypalována při maximální teplotě

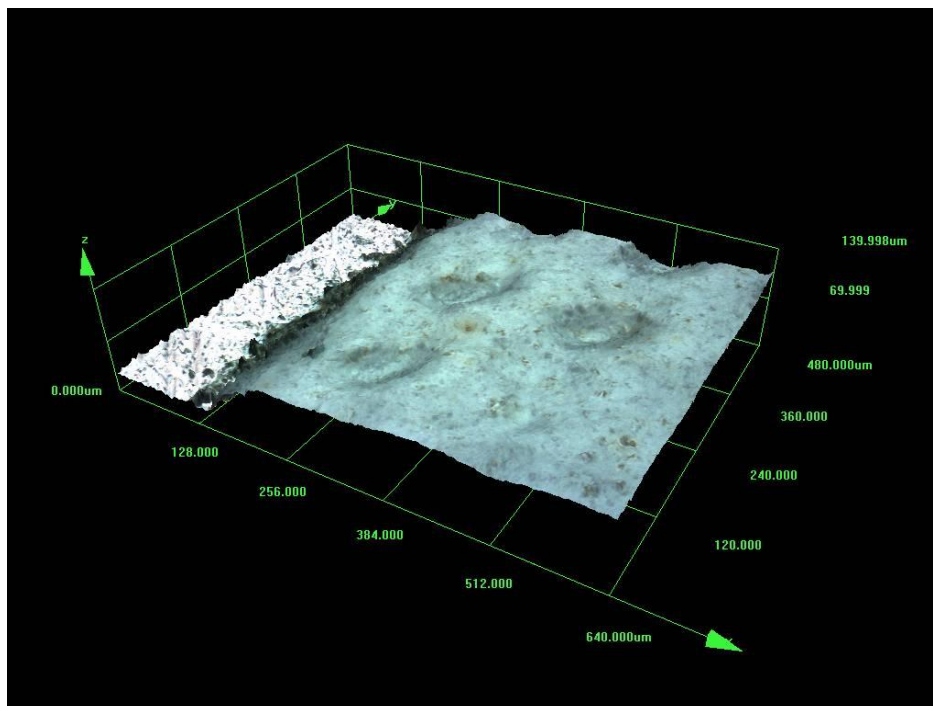
570°C po dobu 15-18 minut. Na dielektrickou vrstvu byla nanesena shodná čtvercová vodivá měděná folie o velikosti 1,5 cm x 1,5 cm.



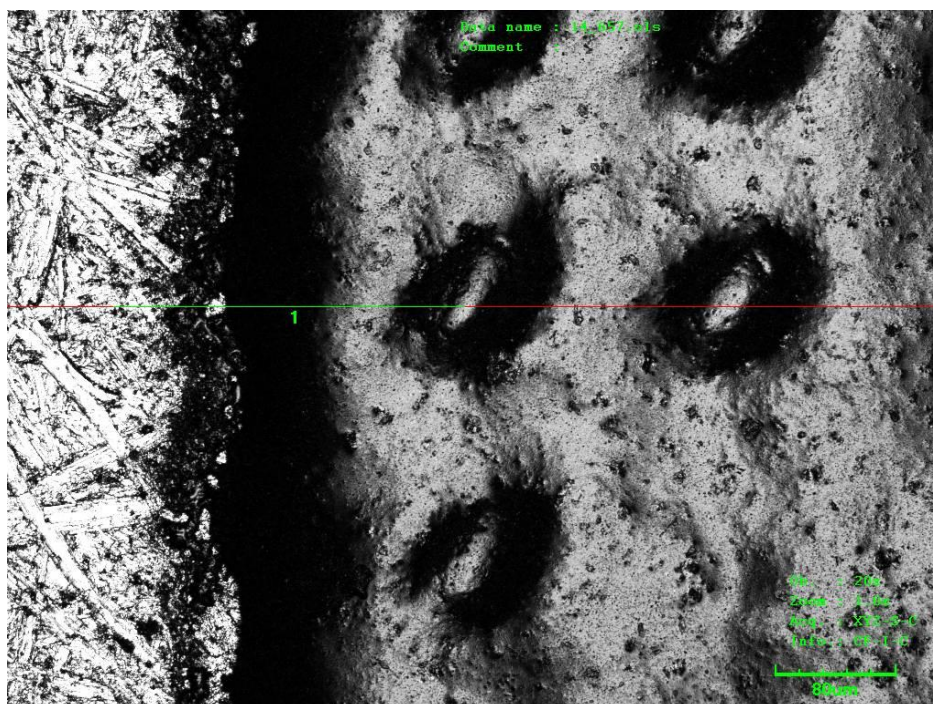
*Obr. 4.2 Substrát 2. typu s nanesenou dielektrickou vrstvou*

#### **4.1 Měření mikroskopem**

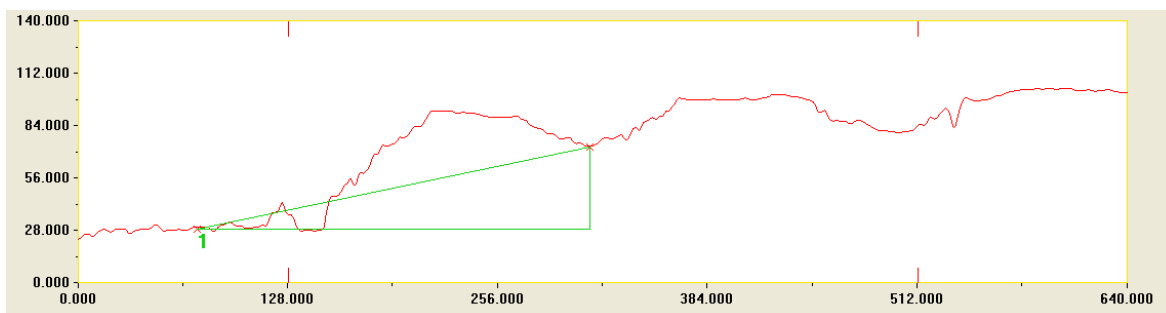
Po provedení měření na substrátech a zhodnocení naměřených výsledků bylo provedeno přeměření dielektrické vrstvy pomocí mikroskopu. K měření a zaznamenání všech snímků byl použit laserový konfokální mikroskop Olympus LEXT 3000. Měřením bylo potvrzeno, že vyrobená dielektrická vrstva byla skutečně 70  $\mu\text{m}$ , ale bylo v ní objeveno velké množství prohlubní. Tyto prohlubně jsou viditelné na obr. 4.3 a 4.4 a způsobily, že dielektrická vrstva nebyla všude o očekávané tloušťce 70  $\mu\text{m}$ , ale v místech prohlubní i o více než 1/3 menší, konkrétně naměřená tloušťka dielektrické vrstvy pod prohlubní byla pouze 42  $\mu\text{m}$  (obr. 4.3). Tyto prohlubně měli šířku přibližně 80  $\mu\text{m}$ .



Obr. 4.3 Detail přechodu ze základové desky tvořené slitinou hliníku ALMg3-AW-5764 na dielektrickou vrstvu s viditelnými prohlubněmi v dielektrické vrstvě, znázorněno ve 3D pohledu



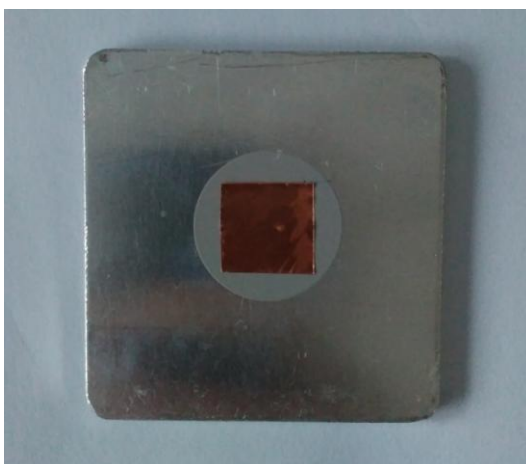
Obr. 4.4 Detail přechodu ze základové desky tvořené slitinou hliníku ALMg3-AW-5764 na dielektrickou vrstvu s viditelnými prohlubněmi v dielektrické vrstvě a se znázorněnou měřicí čarou spektrálního měření



Obr. 4.5 Graf spektrálního měření přechodu ze základové desky tvořené slitinou hliníku ALMg3-AW-5764 na dielektrickou vrstvu s viditelnými prohlubněmi v dielektrické vrstvě, v nejnižším místě byla dielektrická vrstva tlustá pouze 42  $\mu\text{m}$

## 4.2 Příprava substrátů na měření

Před samotným měřením bylo nutné připravit substráty na měření. Tato příprava spočívala v přesném naměření a ustřížení měděné samolepicí folie o rozměrech 1,5 x 1,5 cm. Tato folie byla následně přilepena na druhý typ substrátu na kruhovou dielektrickou vrstvu substrátu z hliníku (obr. 4.6). Substráty prvního typu měly již vodivou vrstvu nanesenou z výroby, k měření byla použita střední část vodivé vrstvy.



Obr 4.6 Substrát 2. typu s přilepenou vodivou vrstvou z měděné folie

Dále bylo nutné přesně změřit všechny rozměry vodivé vrstvy a vypočítat plochu, kterou vodivá vrstva zabírá. Změření plochy vodivé vrstvy je nutné k výpočtu relativní permitivity a rezistivity. Měření bylo provedeno milimetrovým pravítkem. U prvního typu substrátu byla vypočtena plocha měřené části vodivé vrstvy 138  $\text{mm}^2$  a u druhého typu substrátu, který měl na sobě nanesenou měděnou folii, byla vypočtena plocha 225  $\text{mm}^2$ . Vodivá plocha 1. typu substrátu s vypočtenou plochou je znázorněna na obr. 4.7.



### 4.3 Měření

Měření začalo měřením kapacity a ztrátového činitele  $\text{tg } \delta$  u každého substrátu v rozsahu 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz pomocí RLC metru MOTTECH MT 4090. Nejprve byla provedena kalibrace měřicího přístroje naprázdno a nakrátko. Poté byly postupně připojeny jednotlivé substráty k měřicímu přístroji pomocí dvou sond. První sonda byla připojena k připájenému vývodu a druhá sonda byla připojena k podkladové desce ze slitiny hliníku. Nakonec byly hodnoty z měřicího přístroje zaznamenány do tabulky 4.1.

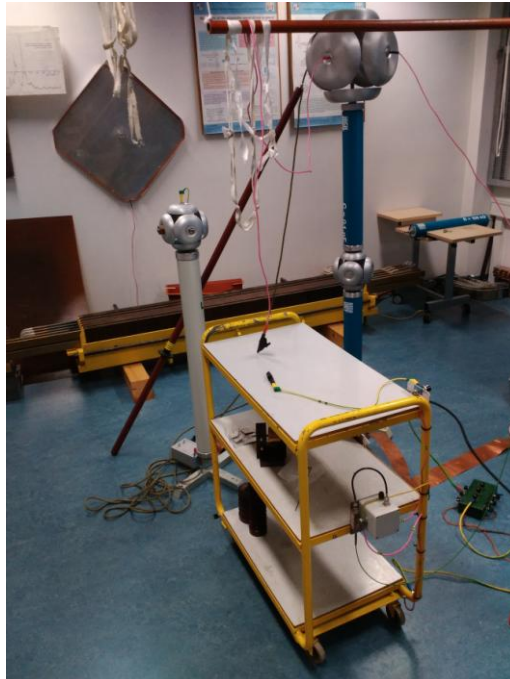
Dále následovalo měření protékajícího proudu přes dielektrickou vrstvu při připojeném stejnosměrném napětí 500 V. K měření byl použit elektrometr KEITHLEY 6517A. Měření probíhalo ve stínícím boxu z důvodu zamezení rušivých vnějších vlivů, které by mohly zkreslit měření, protože měření je velmi náchylné na okolní rušení. Do tohoto boxu byly postupně umístěny jednotlivé substráty a postupně byly připojeny k měřicímu přístroji pomocí dvou vývodů (obr. 4.9). První vývod byl připojen k připájenému vývodu a druhý vývod byl připojen k podkladové desce ze slitiny hliníku. Poté byla krabice uzavřena a na vývody bylo přivedeno stejnosměrné napětí o velikosti 500 V. Následně bylo napětí vypnuto, krabice byla otevřena a došlo k výměně měřeného substrátu. U každého substrátu byla postupně z měřicího přístroje zaznamenána hodnota proudu do tabulky 4.5.



Obr. 4.9 Elektrometr KEITHLEY 6517A s otevřeným stínícím boxem

Posledním měřením bylo měření průrazného napětí ve vysokonapěťové laboratoři (obr. 4.10). Měřené substráty byly postupně připojeny ke zdroji střídavého napětí. Napětí

na zdroji bylo postupně zvyšováno, dokud nedošlo k průrazu dielektrické vrstvy, tento průraz byl doprovázen zvukovým efektem. Napětí, při kterém došlo k průrazu, bylo zaznamenáno do tabulky 4.4. Průraz dielektrické vrstvy byl ještě ověřen „propípnutím“ multimetrem.



Obr. 4.10 Laboratoř pro měření vysokého napětí

Všechna 3 měření byla provedena shodně na všech šesti zkoumaných substrátech prvního i druhého typu.

#### 4.4 Naměřené a dopočítané hodnoty

Z prvního měření byly použity naměřené hodnoty kapacity (tab. 4.1) k dopočítání relativní permitivity  $\epsilon_r$  (tab. 4.2) úpravou vzorce pro výpočet kapacity  $C$ , při známé ploše a délce:

$$C = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * S}{d} [F] \quad (4.1)$$

kde  $\epsilon_0$  [F. m<sup>-1</sup>] - permitivita vakua, jejíž hodnota je 8,85. 10<sup>-12</sup> [F. m<sup>-1</sup>]

$\epsilon_r$  [-] - relativní permitivita

$S$  [m<sup>2</sup>] - plocha vodivé vrstvy

$d$  [m] - tloušťka dielektrické vrstvy



Po úpravě vzorce (4.1), z něhož byla vyjádřena relativní permitivita, vyšlo:

$$\varepsilon_r = \frac{C*d}{\varepsilon_0*S} [-] \quad (4.2)$$

Hodnoty v tabulce 4.1 byly u  $C$  zaokrouhleny na 1 desetinné místo a u  $tg \delta$  na 3 desetinná čísla.

Teoretická hodnota relativní permitivity u dielektrické pasty IP6075 od firmy Heraeus by měla být nižší než 20 [-] při frekvenci 1 kHz. Tato hodnota je uvedena v tabulce 3.3.

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty kapacity a ztrátového činitele  $tg \Delta$  při frekvencích 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz a 100 kHz na všech šesti zkoumaných substrátech

Substrát 1. typ	100 Hz		1 kHz		10 kHz		100 kHz	
	C [pF]	tg $\delta$ [-]	C [pF]	tg $\delta$ [-]	C [pF]	tg $\delta$ [-]	C [pF]	tg $\delta$ [-]
1	282,5	24,090	263,8	2,523	261,5	0,258	259,6	0,026
2	256,2	0,021	250,6	0,011	247,5	0,008	245,7	0,005
3	266,4	0,017	261,9	0,010	259,0	0,008	256,9	0,006
4	265,6	6,830	261,3	0,697	259,2	0,074	257,9	0,011
Substrát 2. typ								
1	165,7	0,112	153,3	0,054	143,1	0,048	133,5	0,051
2	105,1	0,033	100,3	0,035	94,9	0,038	89,7	0,042

Tab. 4.2 Vypočítané hodnoty relativní permitivity dielektrické vrstvy podle vzorce (4.2)

Substrát 1. typ	$\varepsilon_r$ [-]			
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
1	16,19	15,12	14,99	14,88
2	14,68	14,36	14,19	14,08
3	15,27	15,01	14,84	14,72
4	15,22	14,98	14,86	14,78
Substrát 2. typ				
1	5,82	5,39	5,03	4,69
2	3,69	3,53	3,34	3,15

Z druhého měření byly použity naměřené hodnoty protékajícího proudu k dopočítání rezistivity (tab. 4.3). Rezistivita se měří nepřímo, tzn. měří se hodnoty protékajícího proudu při známém napětí a rezistivita se dále dopočítá. Rezistivita byla dopočtena podle dvou vzorců pro výpočet odporu. Nejprve byl vypočten odpor  $R$  podle Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (4.3)$$

kde  $U$  [V] - napětí

$I$  [A] - proud

Do Ohmova zákona byla dosazena hodnota stejnosměrného napětí, při kterém byl měřen protékající proud  $U=500$  V a příslušný protékající proud dielektrickou vrstvou u každého ze zkoumaného substrátu. Poté byla vyjádřena rezistivita  $\rho$  ze vzorce pro výpočet odporu  $R$  při známé délce vodiče, ploše průřezu vodiče a rezistivitě:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega] \quad (4.4)$$

kde  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] - rezistivita

$l$  [m] - tloušťka dielektrické vrstvy

$S$  [m<sup>2</sup>] - plocha vodivé vrstvy

Po úpravě vzorce (4.4), z něhož byla vyjádřena rezistivita  $\rho$  vyšlo:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} [\Omega \cdot m] \quad (4.5)$$

Teoretická hodnota rezistivity u dielektrické pasty IP6075 od firmy Heraeus byla vypočtena z hodnoty odporu z tabulky 3.3 podle vzorce (4.5) po dosazení hodnot plochy vodivé vrstvy a tloušťky dielektrické vrstvy. Tato hodnota u 1. typu substrátu vyšla  $1,97 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$  a naměřená hodnota by měla být vyšší než tato hodnota. U 2. typu substrátu vyšla hodnota  $3,21 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$  a naměřená hodnota by měla být vyšší než tato hodnota.

Tab. 4.3 Naměřené hodnoty protékajícího proudu a vypočítané hodnoty odporu podle vzorce (4.3) a permitivity podle vzorce (4.5)

Substrát 1. typ	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]	$\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]
1	$1,0626 \cdot 10^{-3}$	$4,705 \cdot 10^5$	$9,276 \cdot 10^5$
2	$52,277 \cdot 10^{-12}$	$9,564 \cdot 10^{12}$	$1,886 \cdot 10^{13}$
3	$2,093 \cdot 10^{-9}$	$2,389 \cdot 10^{11}$	$4,710 \cdot 10^{11}$
4	$1,054 \cdot 10^{-3}$	$4,744 \cdot 10^5$	$9,352 \cdot 10^5$
Substrát 2. typ			
1	$0,876 \cdot 10^{-6}$	$5,708 \cdot 10^8$	$1,835 \cdot 10^9$
2	$3,178 \cdot 10^{-6}$	$1,573 \cdot 10^8$	$5,057 \cdot 10^8$

Ze třetího měření byly použity naměřené hodnoty průrazného napětí k dopočítání elektrické pevnosti (tab. 4.4). Elektrická pevnost  $E_p$  byla dopočtena podle vzorce:

$$E_p = \frac{U_p}{d} [V \cdot m^{-1}] \quad (4.6)$$

kde  $U_p$  [V] - velikost průrazného napětí

$d$  [m] - tloušťka dielektrické vrstvy

Teoretická hodnota elektrické pevnosti u dielektrické pasty IP6075 od firmy Heraeus byla vypočtena z hodnoty průrazného napětí z tabulky 3.3 podle vzorce 4.6. Tato hodnota vyšla pro oba typy substráty stejně a to  $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  při použití stejnosměrného napětí. Naměřená hodnota by měla být vyšší než tato hodnota.

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty průrazného napětí a vypočítané hodnoty elektrické pevnosti

<b>Substrát 1. typ</b>	$U_p$ [V]	$E_p$ [kV.mm <sup>-1</sup> ]
1	-	-
2	350	5,00
3	491	7,01
4	-	-
<b>Substrát 2. typ</b>		
1	350	5,00
2	410	5,86

## Závěr

Bakalářská práce se zabývá motivy a dielektriky na Cu a Al substrátech. Práce je rozdělena na čtyři části. Cílem bakalářské práce bylo popsat dielektrické a vodivé pasty použitelné na Cu a Al substrátech a ověření zjištěných teoretických závěrů na navržených vzorcích substrátů při praktickém měření.

V první kapitole je popsáno vysvětlení pojmu výkonová elektronika, její využití, popis výkonových substrátů (DBC, TPC a kovových substrátů), popis sklolaminátové desky FR4 a používané materiály u kovových substrátů. Substráty pro výkonové aplikace používáme tam, kde potřebujeme přenášet velké výkony. Ve druhé kapitole jsou vysvětleny aditivní technologie – sítotisk a šablonový tisk. Ve třetí kapitole jsou popsány sítotiskové pasty, způsob výroby těchto past, nanášení, sušení a vypalování. Tato kapitola se věnuje hlavně vodivým a dielektrickým pastám, které jsou použitelné na Cu a Al substrátech, a rešerši dielektrických a vodivých past od třech výrobců ELS ElektroScience, DuPont a Heraeus. Zpracováno bylo 6 dielektrických a 7 vodivých past. Nelze jednoznačně určit, jaká pasta je na použití nejlepší, záleží na mnoha faktorech, kterými mohou být rozdílná cena, potřebná tepelná vodivost, provozní napětí na substrátu.

Poslední čtvrtá kapitola je věnována praktické části, ve které bylo měřeno šest kovových substrátů na podkladové desce ze slitiny hliníku ALMg3-AW-5764 (čtyři shodné substráty 1. typu a dva substráty 2. typu). Substráty měly nanesenou dielektrickou vrstvu IP6075 od firmy Heraeus o tloušťce přibližně 70  $\mu\text{m}$ . Tloušťka dielektrické vrstvy byla přeměřena laserovým konfokálním mikroskopem. U 1. typu substrátu byla vodivá vrstva tvořena stříbrnou pastou C8829A od firmy Heraeus. U 2. typu substrátu byla vodivá vrstva vytvořena z měděné folie. Cílem této kapitoly bylo porovnat teoretické hodnoty dielektrické vrstvy u kovových substrátů s praktickými hodnotami získanými měřením. Porovnávanými hodnotami byla relativní permitivita, rezistivita a elektrické pevnost. Teoretická hodnota relativní permitivity by měla být nižší než 20 [-] při frekvenci 1 kHz. Teoretická hodnota rezistivity u 1. typu substrátu by měla být větší než  $1,97 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$  a u 2. typu substrátu větší než  $3,21 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ . Teoretická hodnota elektrické pevnosti pro oba typy substrátů by měla být větší než  $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Tyto hodnoty byly porovnávány s vypočtenými hodnotami z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tabulkách 4.2, 4.3, 4.4. Porovnáním bylo zjištěno, že s teoretickými hodnotami souhlasí u všech substrátů

pouze hodnoty relativní permitivity. Rezistivita souhlasí oproti teoretickým hodnotám u substrátu 1. typu č. 2 a 3. U substrátů 1. typu č. 1 a 4 nesouhlasí hodnoty rezistivity oproti teoretickým hodnotám velkým rozdílem a průrazné napětí k výpočtu elektrické pevnosti se nepodařilo naměřit vůbec. U obou substrátů 2. typu nevyšla rezistivita o jeden, respektive o dva řády. Elektrická pevnost u substrátů 1. typu č. 2 a 3 a u obou substrátů 2. typu vyšla o jeden řád nižší než teoretická hodnota. Jedním z důvodů nižší hodnoty elektrické pevnosti u měřených substrátů by mohlo být, že teoretické hodnoty se vztahují ke stejnosměrnému napětí, ale při měření bylo použito střídavé napětí, které má větší destruktivní účinky. Důvodem všech odlišných hodnot oproti teoretickým byly zřejmě prohlubně v dielektrické vrstvě vzniklé při tisku dielektrické pasty, což bylo i ověřeno laserovým konfokálním mikroskopem. Tyto prohlubně způsobily, že dielektrická vrstva nebyla všude o očekávané tloušťce 70  $\mu\text{m}$ , ale v místech prohlubní i o více než 1/3 méně, konkrétně naměřená tloušťka dielektrické vrstvy pod prohlubní byla pouze 42  $\mu\text{m}$ .

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČEROVSKÝ, Zdeněk, Rudolf GRIC a Jiří PAVELKA. *Výkonová elektronika I.* 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-00723-5.
- [2] LEUCHTER, Jan. *Praktikum z výkonové elektroniky* [online]. Brno: Univerzita obrany, 2006 [cit. 2017-06-04]. ISBN 978-80-7231-210-8. Dostupné z: <https://user.unob.cz/leuchter/S3708.pdf>
- [3] *Lepší řízení teploty a menší rozměry v tenkém filmu, silný film designu* [online]. [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: [http://metallized-ceramic.ready-online.com/dbc\\_cs.html](http://metallized-ceramic.ready-online.com/dbc_cs.html)
- [4] *Direct Bond Copper* [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://rogerscorp.com/pes/technology/3/direct-bond-copper.aspx>
- [5] *Oxidová keramika – oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)* [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/aluminum-oxide/>
- [6] *Neoxidová keramika – nitrid hlinitý (AlN)* [online]. [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/aluminum-nitride/>
- [7] *Aluminium nitride* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_nitride](https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_nitride)
- [8] *Technologie Thick Printed Copper* [online]. [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-thick-printed-copper.html>
- [9] *Thick Print Copper Technology Increases Thermal Reliability* [online]. [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.electronicprotectionmagazine.com/main/articles/thick-print-copper-technology-increases-thermal-reliability/>
- [10] GIRAŠEK, Tomáš. Substráty pre výkonovú elektroniku. *Posterus* [online]. 2015, [cit. 2017-03-13]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=18118>
- [11] *IMS (Insulated Metal Substrate) PCBs* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.mbedded.ninja/pcb-design/ims-insulated-metal-substrate-pcbs>
- [12] *Insulated Metal Substrate* [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://pcb.gatema.cz/insulated-metal-substrate/>
- [13] *FR-4* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>
- [14] *Advantages of Converting FR-4 PCB Assemblies to MPT Ceramic Engineered Substrates* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z:

- <http://www.micropt.com/ceramics-vs-fr4.htm>
- [15] *Vlastnosti FR4 Circuit Board Materiál* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.myartve.net/vlastnosti-fr4-circuit-board-material/>
- [16] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [17] Kučerová, Eva. *Elektrotechnické materiály a prostředí*, Dostupné z: *prezentace předmětu KET/Elektrotechnické materiály a prostředí (EMAP)*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2017
- [18] *Měď [Cuprum]* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://nom.wz.cz/KOVY/Med1.htm>
- [19] *3. Elektricky vodivé materiály* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/41103-3-elektricky-vodive-materialy.html>
- [20] *Měď* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9B%C4%8F>
- [21] *HLINÍK A JEHO SLITINY* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.cz/2011/04/321211-hlinik-jeho-slitiny.html>
- [22] *Hlinik a možnosti jeho svařování* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/hlinik-a-moznosti-jeho-svarovani/>
- [23] *Hlinik* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>
- [24] *Hliníkové rozvody* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.elektrikar-praha.cz/index.asp?menu=641>
- [25] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [26] *Sítotisk, Šablonový tisk*, Dostupné z: *prezentace ke cvičení předmětu KET/Technologie elektroniky (TEL)*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2015
- [27] KONEČNÝ, Gustav. *Sítotisk při výrobě desek plošných spojů*. *Svět tisku* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=3806&buxus\\_svettisku=f3f3](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=3806&buxus_svettisku=f3f3)
- [28] THOMA, Patrik. *Sítotisk – technika vhodná pro reklamní účely*. *Svět tisku* [online]. [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=548](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=548)

- [29] THOMA, Patrik. Sítotiskové těrky. Svět tisku [online]. [cit. 2017-03-17].  
Dostupné z:  
[http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=2114&buxus\\_svettisku](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2114&buxus_svettisku)  
=
- [30] THOMA, Patrik. Sítotiskové rámy a síťovina. *Svět tisku* [online]. [cit. 2017-03-18].  
Dostupné z: [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=1717&](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717&)
- [31] *List of thermal conductivities* [online]. [cit. 2017-03-22]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_thermal\\_conductivities](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_thermal_conductivities)
- [32] *About Heraeus* [online]. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z:  
[https://www.heraeus.com/en/group/about\\_heraeus/about\\_heraeus\\_at\\_a\\_glance/about\\_heraeus.aspx](https://www.heraeus.com/en/group/about_heraeus/about_heraeus_at_a_glance/about_heraeus.aspx)
- [33] *Products and Solutions* [online]. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z:  
[https://www.heraeus.com/en/group/products\\_and\\_solutions\\_group/products\\_and\\_solutions\\_group\\_at\\_a\\_glance/products\\_and\\_solutions.aspx](https://www.heraeus.com/en/group/products_and_solutions_group/products_and_solutions_group_at_a_glance/products_and_solutions.aspx)
- [34] *About ESL ElectroScience* [online]. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z:  
<http://www.electroscience.com/about-esl-electroscience>
- [35] *Facts and Figures (February 2017)* [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z:  
<https://www.fraunhofer.de/en/about-fraunhofer/profile-structure/facts-and-figures.html>
- [36] *Fraunhofer Society* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer\\_Society](https://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_Society)
- [37] Power electronic substrate [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_electronic\\_substrate](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_electronic_substrate)
- [38] KOHOUTOVÁ, Petra. *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE, Substráty pro výkonové elektronické aplikace* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z:  
[https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/8264/BP\\_Kohoutova\\_Petra.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/8264/BP_Kohoutova_Petra.pdf?sequence=1)
- [39] *Design and Simulation of Passive UHF RFID Tag* [online]. [cit. 2017-04-15].  
Dostupné z: <https://www.slideshare.net/HaroonAhmed14/fyp-4th-presentation-51902648>
- [40] *Značení hliníku a jeho slitin* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z:  
<http://www.begroup.com/cz/BE-Group-Czech-Republic/Produkty/Hlinik-1/znaeni-hliniku-a-jeho-slitin-v-stav/>

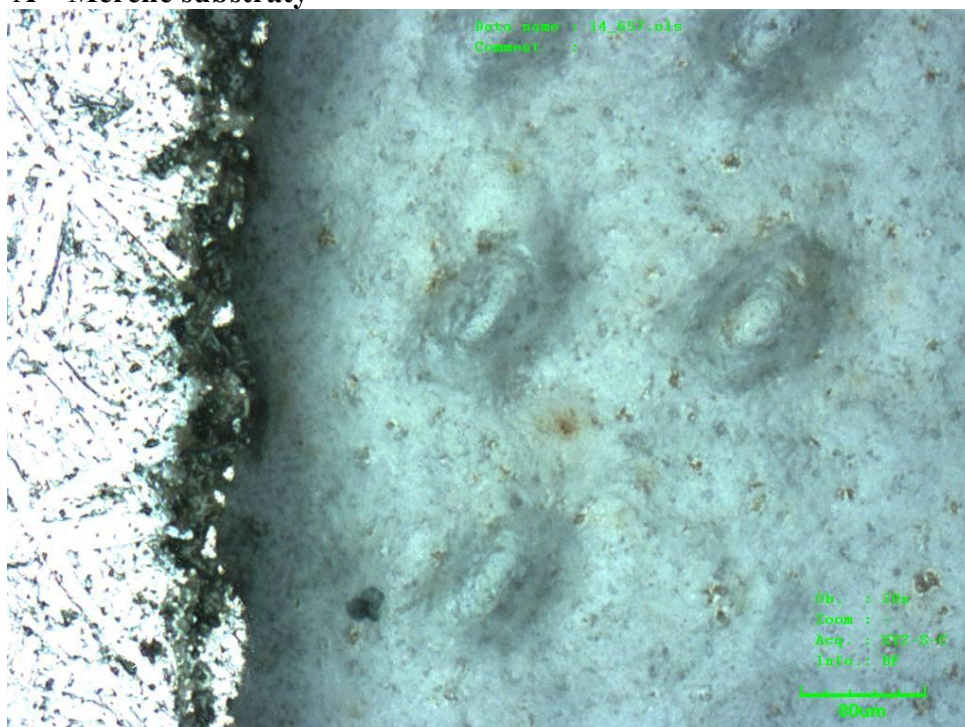


- [41] *Virtuální laboratoř - Depozice materiálů šablonovým tiskem* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/%7Evasko/virtualni%2Dlaborator/sablonovy%2Dtisk/technologie/>
- [42] *Tvary těrek* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [http://docplayer.cz/docs-images/43/6754280/images/page\\_18.jpg](http://docplayer.cz/docs-images/43/6754280/images/page_18.jpg)
- [43] *Tepelná vodivost* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1\\_vodivost](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_vodivost)
- [44] *Rezistivita* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>
- [45] *DIELECTRIC COMPOSITION 4604-A, 4605* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/4605.pdf>
- [46] *4613* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://electroscience.com/node/1284>
- [47] *DUPONT AS100* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/AS100.pdf>
- [48] *Technical Data Sheet: Product Type: Dielectrics, Product Name: IP6075* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: [https://www.heraeus.com/media/media/het/doc\\_het/products\\_and\\_solutions\\_het\\_documents/thick\\_film/data\\_sheets\\_th/Dielectrics\\_IP6075.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/data_sheets_th/Dielectrics_IP6075.pdf)
- [49] *Technical Data Sheet: Product Type: Dielectrics, Product Name: IP6080* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: [https://www.heraeus.com/media/media/het/doc\\_het/products\\_and\\_solutions\\_het\\_documents/thick\\_film/data\\_sheets\\_th/Dielectrics\\_IP6080.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/data_sheets_th/Dielectrics_IP6080.pdf)
- [50] *CERMET SILVER CONDUCTOR 599-E* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/599-E.pdf>
- [51] *CERMET SILVER CONDUCTOR 9912-K* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/9912-K.pdf>
- [52] *CERMET SILVER CONDUCTOR 903-A* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/903-A.pdf>
- [53] *COPPER CONDUCTOR 2312-A-3* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/2312-A-3.pdf>
- [54] *DUPONT AS300* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and->

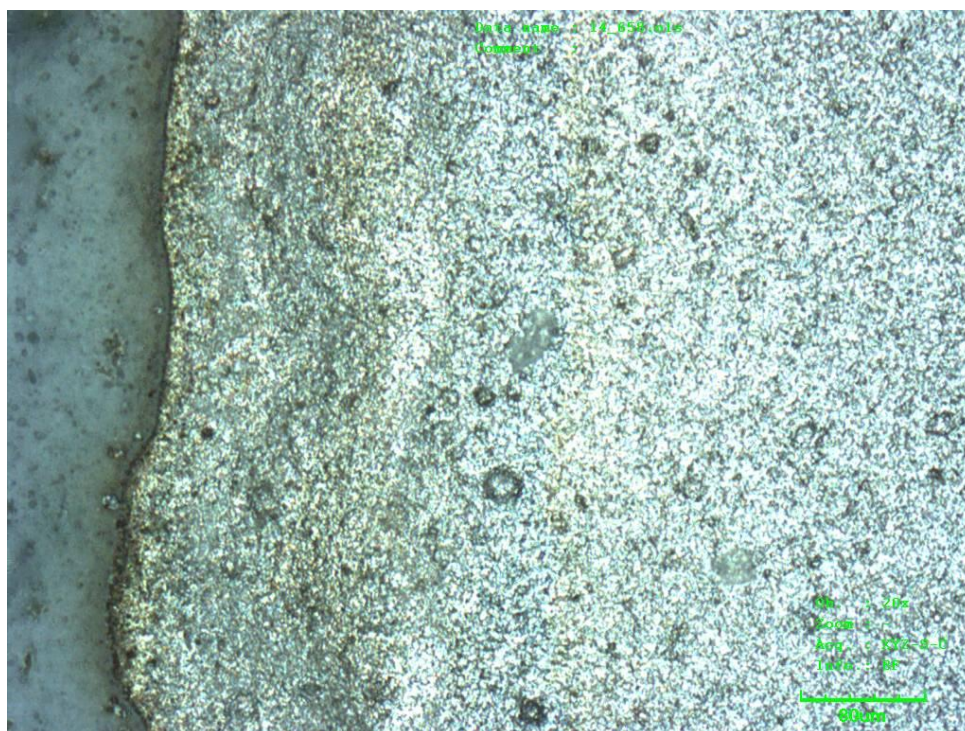
- electrical-materials/documents/prodlib/AS300.pdf
- [55] *Technical Data Sheet: Product Type: Conductors, Product Name: C7847* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z:  
[https://www.heraeus.com/media/media/het/doc\\_het/products\\_and\\_solutions\\_het\\_documents/thick\\_film/data\\_sheets\\_th/Conductors\\_C7847.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/data_sheets_th/Conductors_C7847.pdf)
- [56] *Technical Data Sheet: Product Type: Conductors, Product Name: C8829D* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z:  
[https://www.heraeus.com/media/media/het/doc\\_het/products\\_and\\_solutions\\_het\\_documents/thick\\_film/data\\_sheets\\_th/Conductors\\_C8829D.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/data_sheets_th/Conductors_C8829D.pdf)
- [57] *DuPont* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/DuPont>
- [58] *DuPont* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/DuPont>
- [59] *DuPont: ABOUT US* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z:  
<http://www.dupont.com/>
- [61] *Beryllium oxide* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Beryllium\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Beryllium_oxide)
- [62] *Epoxidová pryskyřice* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1\\_prysky%C5%99ice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice)
- [63] *Stříbro* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/47.html>

## Přílohy

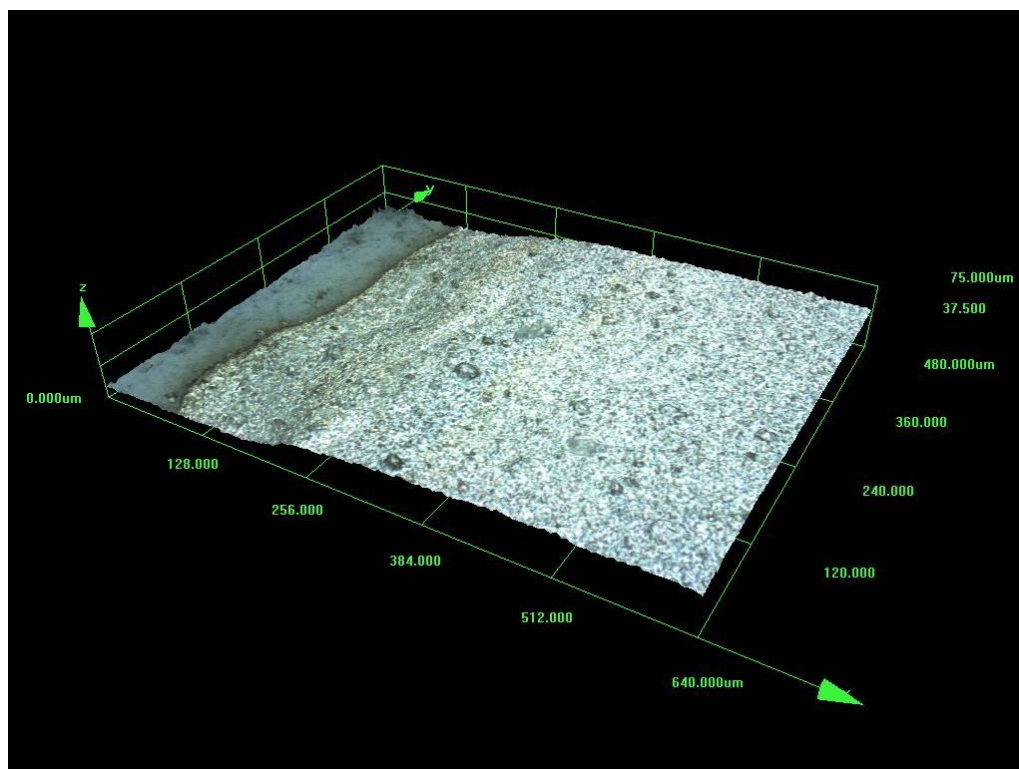
### Přílohy A – Měřené substráty



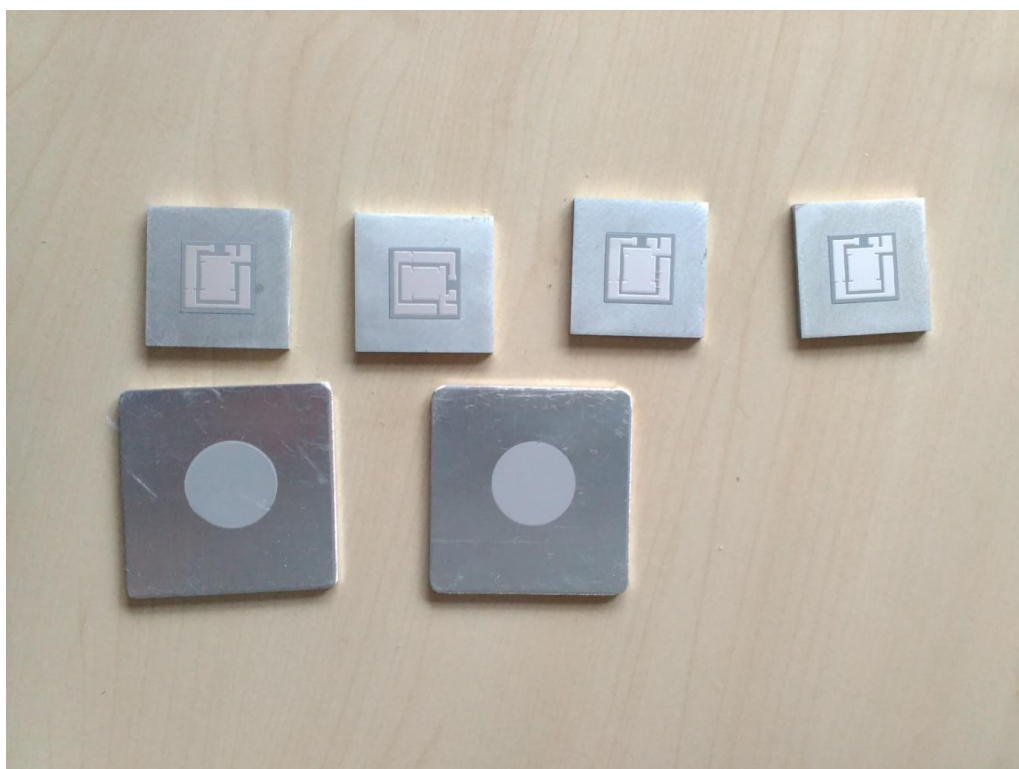
Obr. 1 Detail přechodu ze základové desky tvořené slitinou hliníku ALMg3-AW-5764 na dielektrickou vrstvu s viditelnými prohlubněmi v dielektrické vrstvě



Obr. 2 Detail přechodu z dielektrické vrstvy na vodivou vrstvu tvořenou stříbrem u 1. typu substrátu



Obr. 3 Detail přechodu z dielektrické vrstvy na vodivou vrstvu tvořenou stříbrem u 1. typu substrátu, znázorněno ve 3D pohledu



Obr. 4 Substráty 1. a 2. typu, tak jak přišly z výroby



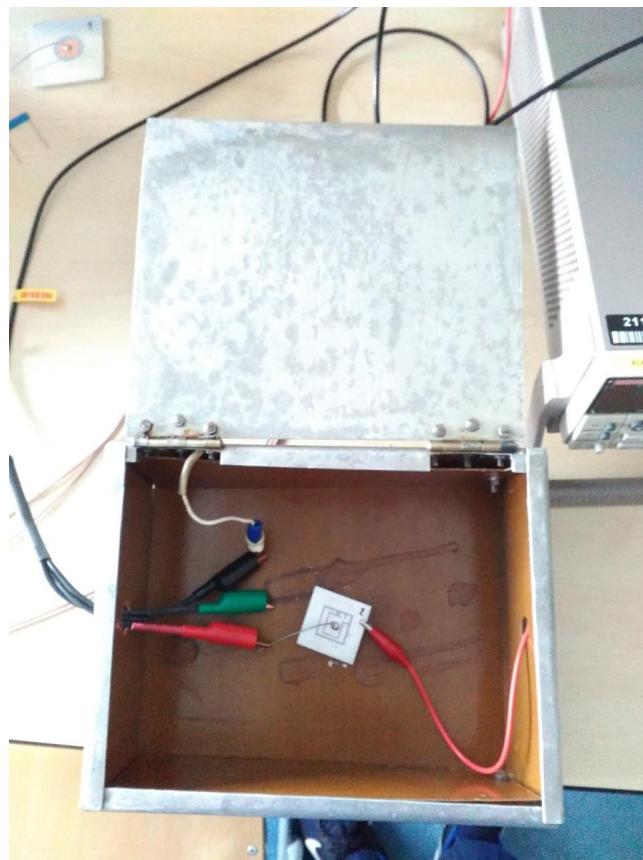
Obr. 5 Substrát 1. typu umístěný na plotýnce, která prohřívala substrát a usnadňovala pájení vývodu



Obr. 6 Měřicí přístroj RLC metr MOTECH MT 4090



Obr. 7 Detail displeje měřicího přístroje RLC metr MOTECHE MT 4090



Obr. 8 Detail připojení substrátu k elektrometru KEITHLEY 6517A ve stínícím boxu



Obr. 9 Elektrometr KEITHLEY 6517A se zavřeným stínícím boxem



Obr. 10 Detail elektrometru KEITHLEY 6517A