

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kovové substráty pro výkonové aplikace

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

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

Jméno a příjmení: **Karel KOCHMAN**
Osobní číslo: **E13B0033K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Kovové substráty pro výkonové aplikace**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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 výkonových substrátů a uveďte jejich klíčové vlastnosti.
2. Zpracujte rešerši se zaměřením na existující typy výkonových substrátů. Věnujte pozornost především substrátům, kde je jejich základna tvořena kovem.
3. Navrhněte vhodné testovací motivy, které umožní ověření základních elektrických a mechanických vlastností substrátů kov-dielektrikum-kov.
4. Otestujte na vybraných vzorcích jejich vlastnosti a porovnejte je s jinými výkonovými substráty.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Pavelka, Jiří, Čerovský 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 Hammarbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na kovové substráty používané ve výkonové elektronice. Konkrétně je v práci řešeno rozdělení jednotlivých typů výkonových substrátů, jejich výroba, požadované základní vlastnosti. Dále jsou řešeny návrhy vzorků pro testování vybraných vlastností substrátů z hlediska teoretického i praktického. V praktické části práce bylo provedeno měření kapacity, elektrické pevnosti, rezistivity a adheze dielektrické vrstvy na vzorcích měď - dielektrická vrstva - natištěná měděná vrstva.

Klíčová slova

Výkonová elektronika, TPC, substrát, keramický substrát, ohebný substrát, kovový substrát, DBC.

Abstract

This thesis is focused on metal substrates used in power electronics. Specifically, the work deals with the distribution of various types of performance substrates, their manufacturing and desired properties. Further suggestions are designed for testing samples of selected substrates properties of substrates in terms of both theoretical and practical. In the practical part of the work was performed capacity measuring, dielectric strength measuring, electrical resistivity measuring and adhesion measuring of the dielectric layer on a substrate of copper - dielectric layer - printed copper layer.

Key words

Power electronics, TPC, substrate, ceramic substrate, flexible substrate metallic substrate, DBC.

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

Karel Kochman

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Hlínovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Elceram a.s. za výrobu vzorků pro měření.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 SUBSTRÁTY VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE	11
1.1 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA	11
1.2 MATERIÁLY PRO VÝROBU VÝKONOVÝCH SUBSTRÁTŮ	11
1.2.1 Anorganické materiály	12
1.2.2 Organické materiály	12
1.3 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA VÝKONOVÉ SUBSTRÁTY	12
2 DRUHY SUBSTRÁTŮ VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE	15
2.1.1 Laminátové substráty	15
2.1.2 Keramické substráty	17
2.1.3 Kovové substráty	21
2.2 SPOLEČNOSTI PRODUKUJÍCÍ SUBSTRÁTY	24
3 NÁVRH TESTOVACÍCH MOTIVŮ	25
3.1 NORMY PRO ZKOUŠKY	25
3.2 NÁVRH VLASTNÍHO MOTIVU	27
4 TESTOVÁNÍ VZORKŮ	29
4.1 MĚŘENÍ PERMITIVITY	31
4.2 MĚŘENÍ REZISTIVITY	32
4.3 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI	35
4.4 MĚŘENÍ ADHEZE	36
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40

Seznam symbolů a zkratek

<i>AMB</i>	Keramický substrát s napájenou vodivou vrstvou
<i>BE</i>	Polyesterová pryskyřice
<i>C</i>	Kapacita dielektrické vrstvy [pF]
<i>CE</i>	Vinylesterová pryskyřice
<i>CEMI</i>	Papírové jádro + skelná tkanina + epoxidová pryskyřice
<i>d</i>	Tloušťka dielektrické vrstvy
<i>DBA</i>	Plátování keramického substrátu hliníkem
<i>DBC</i>	Plátování keramického substrátu mědí
<i>Ep</i>	Elektrická pevnost [V/m]
ε	Permitivita izolační pasty [$F \cdot m^{-1}$]
ε_0	Permitivita vakua [$N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$]
ε_r	Relativní permitivita izolační pasty [-]
<i>FR2</i>	Papír + fenolová pryskyřice
<i>FR3</i>	Papír + epoxidová pryskyřice
<i>FR4</i>	Pryskyřicový substrát se samozhášivou vlastností
<i>GPY</i>	Tkané skelné vlákno + polyimidová pryskyřice
<i>I</i>	Proud [A]
<i>IMS</i>	Izolovaný kovový substrát
<i>l</i>	Délka dielektrické vrstvy [m]
<i>LED</i>	Svítivá dioda
<i>PTFE</i>	Teflonová pryskyřice
<i>R</i>	Odpor dielektrické vrstvy [Ω]
<i>S</i>	Obsah kontaktu [m^2]
<i>TPC</i>	Metoda tisku vodivé vrstvy na keramické jádro
<i>U</i>	Napětí [V]
U_p	Průrazné napětí [V]
λ	Měrná tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
ρ	Rezistivita vnitřní [$\Omega \cdot m$]
ρ_p	Rezistivita povrchová [Ω]
σ	Povrchové napětí [N/mm^2]

Úvod

Předkládaná práce se zabývá substráty používanými ve výkonové elektronice, převážně pak substráty s kovovým jádrem. Text práce je rozdělen na čtyři části. První část se zabývá problematikou a klíčovými vlastnostmi a materiály výkonových substrátů.

V druhé části je popsáno využití substrátů a souhrn používaných substrátů ve výkonové elektronice. Dále popisuje také složení jednotlivých vrstev substrátů a představuje firmy zabývající se problematikou výkonových substrátů.

Třetí část je věnována normám určeným pro měření elektrické pevnosti, vnitřní rezistivity a adheze. V této části je dále popsán návrh vlastních testovacích motivů pro následné laboratorní měření povrchové relativní permitivity, rezistivity, elektrické pevnosti a adheze pasty HERAEUS IP9319D.

Čtvrtá část popisuje přípravu a samotný průběh měření testovacích vzorků. Jsou zde uvedeny výsledky měření a vypočítané hodnoty z měření relativní permitivity, vnitřní rezistivity, dielektrické pevnosti a adheze.

1 Substráty ve výkonové elektronice

1.1 Výkonová elektronika

Výkonová elektronika je velice důležitým podoborem elektroniky, který se zabývá prací s vysokým napětím a proudem. Z tohoto důvodu se na substráty používané při výrobě výkonových součástek klade zvláštní důraz ohledně kvality používaných materiálů [4], [14].

Hlavními trendy v tomto odvětví jsou miniaturizace, snížení váhy, zefektivnění funkčnosti, zvyšování spolehlivosti a v neposlední řadě je kladen důraz na snižování ceny. K dalším trendům patří i vylepšování základních požadavků, jako je vysoká účinnost, dlouhá životnost, nízký vliv na okolí či nízké náklady na údržbu a podobně [1].

Velký vývoj je aktuálně patrný u velmi používaných polovodičových součástek pro výkonovou elektroniku a i zde jsou v platnosti identické trendy jako u celého odvětví výkonové elektroniky. Mezi nejvíce používané komponenty pro výkonovou elektroniku patří například diody, tyristory, různé druhy tranzistorů a podobně [4], [5].

1.2 Materiály pro výrobu výkonových substrátů

Ve výkonové elektronice je úloha substrátů nezastupitelná. Používají se jako základní materiál a tím plní funkci nosné nebo ochranné složky pro výkonové součásti a komponenty. Zajišťují propojení čipů a součástek se systémem a zároveň jejich odizolování od ostatních prvků. Také mohou tvořit aktivní část obvodu. Rovněž se starají o odvod tepla z obvodu a splňují elektrické požadavky na stínění a stabilitu [13]. Nároky kladené na substráty se mění podle konkrétního využití. Mezi hlavní parametry patří:

- Kvalita povrchu
- Chemické složení
- Tepelná vodivost
- Tepelná a mechanická pevnost
- Stabilita
- Minimální pórovitost
- Cena [3]

Základní neboli vstupní materiál pro výrobu substrátu můžeme rozdělit na dvě skupiny. Těmito skupinami jsou anorganické a organické materiály.

1.2.1 Anorganické materiály

- **Keramika** je využívána jako nosná elektroizolační podložka. Nejčastěji se setkáváme s keramikami tvořenými oxidem berylnatým (BeO), oxidem hlinitým (Al_2O_3), nitridem hliníku (AlN), silikon karbidem (SiC) nebo nitridem boru (BN). Mezi výhody keramiky patří dobrá tepelná vodivost, nízké dielektrické ztráty a dobrá chemická odolnost a odolnost proti náhlým změnám teploty. Mezi nevýhody patří vyšší cena, vyšší hmotnost a křehkost materiálů. Další nevýhodou je také toxicita berylnaté keramiky [15], [16].
- **Kovové materiály** – Nejčastěji využívané kovy v elektronických substrátech jsou měď a hliník. Měď má lepší elektrickou i tepelnou vodivost než hliník, ale cena mědi je proti hliníku trojnásobná. Právě cena předurčuje měď pro použití na vodivé části substrátu. Hliník je díky své nižší ceně a hmotnosti využíván jako nosná a zároveň chladič část substrátu [3], [15].

1.2.2 Organické materiály

Jako organické materiály v substrátech nejčastěji používáme pryskyřice. Nejčastěji se jedná o epoxidové pryskyřice, které se používají například v substrátech FR4. Dalšími pryskyřicemi jsou polyimidová, teflonová pryskyřice (PTFE), vinylosterová pryskyřice (CE), polyesterová pryskyřice (BE). Asi největší výhodou těchto materiálů je jejich dostupnost a tím i cena. Další výhodou je pevnost materiálu a nízká hmotnost. Mezi nevýhody patří malá tepelná a chemická odolnost a malá tepelná vodivost [16].

1.3 Základní požadavky na výkonové substráty

Na výkonové substráty je kladeno mnoho náročných požadavků. Mezi základní patří vysoká tepelná vodivost společně s vysokou pracovní teplotou a dielektrická pevnost. Dalšími důležitými požadavky jsou vysoká rezistivita, chemická odolnost a odolnost proti mechanickému namáhání. Nezanedbatelným parametrem jsou také náklady na výrobu substrátů [4].

- **Vysoká tepelná vodivost**

K šíření tepla v substrátech dochází pomocí vedení. K vedení dochází pomocí přímých srážek molekul a chvěním mřížky. Tepelnou vodivost určujeme pomocí součinitele tepelné vodivosti λ . Ten určuje schopnost přesunu energie ve formě tepla určitým druhem materiálu. Využívá se zde druhého termodynamického zákona, který říká, že šíření tepla probíhá od teplejšího konce k chladnějšímu. Vedení tepla substrátem je složitější. Většinou je substrát složen z většího počtu materiálů s různou tepelnou vodivostí, na jejichž spojích může docházet k tepelným mostům a tím pádem k špatnému odvodu tepla. To má za následek degradaci nejen součástek, ale i samotného substrátu. Proto by součinitel tepelné vodivosti λ měl být co nejvyšší [4].

- **Tepelná odolnost**

Substráty ve výkonové elektronice jsou vystavovány vysokým teplotám od samého počátku výroby až po samotný provoz, proto je důležitá jejich tepelná odolnost. Tepelná odolnost určuje rozmezí teplot vhodného použití materiálů. Materiál používaný v tomto rozmezí vykazuje stabilní vlastnosti a vydrží déle. Substráty jsou složeny z více materiálů, které musí mít podobnou tepelnou odolnost, protože celková odolnost substrátu je dána odolností nejslabšího použitého materiálu [14].

- **Elektrická pevnost**

Elektrická pevnost substrátu určuje odolnost proti působení elektrického pole. Pokud je elektrické pole velice intenzivní, může dojít k elektrickému průrazu, který je trvalý. Průraz zapříčiní ztrátu izolační schopnosti a případný zkrat. Jako příklad lze uvést izolovaný kovový substrát. Pokud dojde k průrazu izolační vrstvy, může se jeho chladicí část stát vodičem elektrického proudu a hrozí nebezpečí úrazu. Elektrická pevnost se určí pomocí následujícího vzorce [4].

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (1.1)$$

kde E_p je elektrická pevnost, U_p průrazné napětí a d je tloušťka izolační vrstvy.

- **Vysoký měrný elektrický odpor**

Měrný elektrický odpor (rezistivita) určuje schopnost materiálu vést elektrický náboj. Elektrická vodivost je dána počtem volných elektronů ve struktuře materiálu. Tato struktura je nejvíce ovlivňována teplotou. Právě s rostoucí teplotou narůstá i rezistivita. Další činitelé ovlivňující velikost rezistivity jsou délka a průřez materiálu. Rezistivitu určíme pomocí následujícího vzorce.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}, \quad (1.2)$$

kde R je odpor materiálu, S je průřez materiálu a l je délka materiálu.

V substrátu se využívají materiály s různou velikostí měrného elektrického odporu, a to podle plnění funkce ve struktuře [14].

- **Odolnost proti chemické korozi**

Výrobní proces neboli osazování součástek zahrnuje i použití rozpouštědel, tavidel a dalších agresivních chemických látek. Všechny tyto látky mohou narušit strukturu substrátu. Nejen výrobní proces, ale ani provoz v agresivním prostředí netvoří ideální podmínky pro funkčnost substrátu [14].

- **Cena jednotlivých substrátů**

V současné době se vše odvíjí od ceny výrobku. Aby byl výrobek konkurenceschopný, musí být co nejlevnější. Výrobci na toto reagují snižováním nákladů na výrobu. To má za následek používání nových materiálů, které mohou mít i podstatně horší vlastnosti. Substrát tedy volíme adekvátně k požadovaným vlastnostem [14].

2 Druhy substrátů ve výkonové elektronice

Díky své jednoduchosti a ceně je nejvíce rozšířený laminátový substrát s označením FR4. S vývojem výkonových součástek jsou kladeny na tento substrát vyšší nároky. Proto se vývoj začal ubírat směrem ke keramickým substrátům, které mají mnoho výhod. S rozvojem LED svítidel se také začaly objevovat kovové substráty, které přináší do tohoto odvětví mnoho novinek. Vlastní skupinu tvoří také ohebné substráty [12], [2], [10].

2.1.1 Laminátové substráty

Historicky patří tento druh substrátu k nejstarším a nepoužívanějším. U tohoto typu substrátu se setkáváme s dělením dle flexibility na pevný a ohebný. Nejčastěji je tento substrát označen jako FR. Zkratka FR (Fire Retardant) vyjadřuje samozhášivou vlastnost těchto substrátů. Vzhledem k jeho vlastnostem a nízké ceně lze tento substrát nalézt ve většině výrobků spotřební elektroniky. Proto je snadné tento druh substrátu nalézt ve veškeré spotřební elektronice.

2.1.1.1 Pevný substrát

Základní substrát se skládá ze tří složek (Obr. 1). Těmito složkami jsou výztuž, pojivo a vodivá vrstva. Nejčastěji používanými druhy těchto substrátů jsou FR4, FR1, FR2, CEM1, GPY. Výztuž tvoří kostru celého substrátu. Vlastnosti výztuže určují odolnost v tahu, tlaku a ohybu. Nejčastěji se používá skleněná tkanina, ale je možné použít i rohož nebo papír [15].

Tab. 1 Pevné substráty a jejich vlastnosti[26]

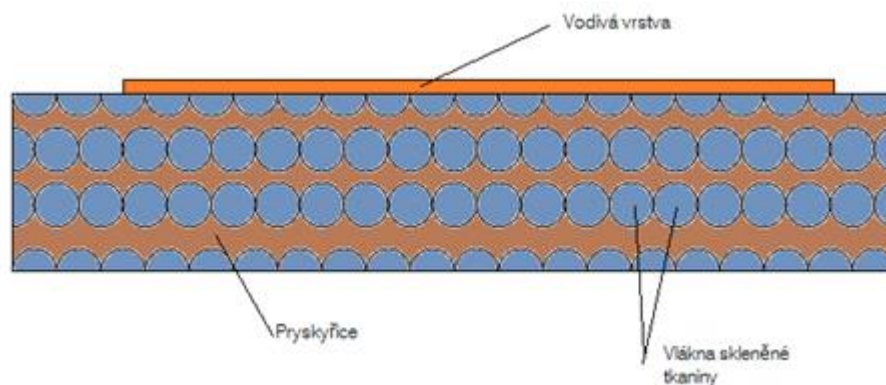
označení	složení	Ep [kV/m]	λ [W/mK]
FR2	papír+fenolová pryskyřice	30	0,24
FR3	papír+epoxidová pryskyřice	30	0,23
CEM1	papírové jádro+skelná tkanina+ epoxidová pryskyřice	40	0,23
FR4	tkané skelné vlákno+ epoxidová pryskyřice	40	0,25
GPY	tkané skelné vlákno+polyimidová pryskyřice	60	0,22

Pojivo spojuje všechny vrstvy substrátu. Zároveň rozloží působení okolních vlivů na výztuž a ochrání ji před poškozením. Obecně se jako pojivo používá pryskyřice. Jedná se o nejuniverzálnější plast používaný v elektronice. Nejznámější je epoxidová pryskyřice, která je díky své tepelné odolnosti a skoro nulové absorpci ideálním izolantem. Výhodou

je také samozhášivá schopnost. Pro ještě lepší vlastnosti se využívají jiné druhy pryskyřic. Například polyamidová s tepelnou odolností nad 200 °C, PTFE používána při vysokých frekvencích do 10 GHz, dále BT s vynikajícími dielektrickými vlastnostmi a další [15], [26].

Vodivá vrstva je nejčastěji tvořena mědí. Ta je nanášena ve formě fólie o tloušťkách 18, 35, 70 μm [26].

Výroba se skládá z impregnování výztuže, odmotávané z role. Impregnování probíhá stříkáním nebo ponořením do pryskyřice. Po impregnaci se pomocí válců odstraní přebytečná pryskyřice a dosáhne se požadované tloušťky. Dalším krokem je částečné vysušení v sušárně a nařezání požadované velikosti desky. Pak nastává proces laminace, kde se na naimpregnované desky přidá měděná fólie a působením tlaku 1500 kPa a teploty kolem 170 °C dojde k vytvrzení a pevnému propojení všech vrstev [16], [26].



Obr. 1 Struktura FR4 [15]

2.1.1.2 Ohebný substrát

V praxi je často kladen požadavek na ohebnost substrátů. Tento požadavek pevné substráty neumožňují, a proto se pro tyto účely používají ohebné (flexibilní) substráty. Další výhodou těchto substrátů je nízká hmotnost. Rozdíl od pevných substrátů je daný strukturou, která postrádá ve většině případech výztuž. Další zásadní rozdíl je v materiálu použitém na pojivo. Jako pojivo se používá polyimid nazývaný Kapton s tepelnou odolností do 450 °C a stálou pracovní teplotou 135 °C. Vyrábí se o síle 25 až 75 μm. Druhým používaným pojivem je polyester nazývaný Mylar. Výhodou je nižší cena. Nevýhodou je nižší pracovní teplota, pohybující se okolo 85 °C, a síla vyráběné desky, která se pohybuje od 75 do 125 μm [15].

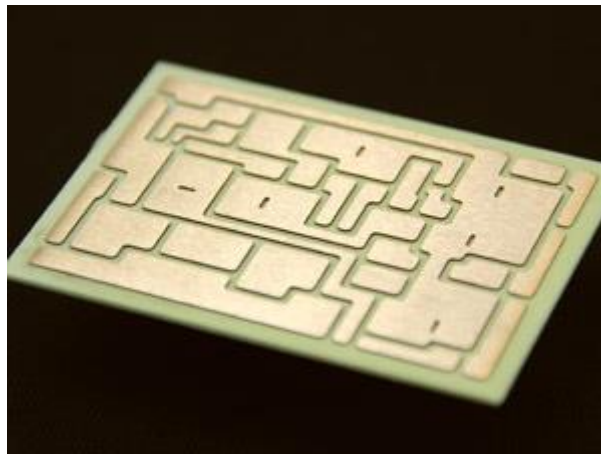
2.1.2 Keramické substráty

S nárůstem požadavků na laminátové substráty dochází ke snižování jejich použitelnosti ve výkonové elektronice. Vývoj se tedy ubírá novými technologiemi, jako jsou keramické substráty. Keramika tvoří nosnou složku, distanční podložku, nebo obalovou část těchto substrátů. Tyto substráty výkonové elektroniky dělíme v závislosti na typu technologie připojování mědi ke keramice. Rozlišujeme 4 základní typy nanášení vodivé vrstvy:

- DBC (Direct Bonded Copper)
- DBA (Direct Bonded Aluminum)
- AMB (Active Metal Brazing)
- TPC (Thick Printed Copper) [17]

2.1.2.1 DBC substráty

Výroba DBC substrátu spočívá ve spojení měděné folie s keramickou deskou (Obr. 2). Měděná folie musí být vysoké čistoty. Síla fólie se odvíjí od typu keramiky. Síla měděné fólie se pohybuje od 0,1 až do 0,8 mm a nanáší se na substrát o síle 0,25 až 0,38 mm [4].



Obr. 2 DBC substrát [32]

Správné spojení mědi s keramikou je zajištěno vznikem eutektické vrstvy po celé ploše měděné folie. Tato vrstva je roztavena za teploty 1065 °C, tato hodnota nesmí být překročena, aby nedošlo k tání čisté mědi. Roztavená eutektická vrstva reaguje s povrchem keramické desky a vznikne silná vazba mezi těmito materiály. Celý proces probíhá v kyslíkové

atmosféře pod stálým tlakem. Vzniklá vazba je odolná do 900 °C, překročením této teploty hrozí oddělení mědi od keramiky [14].

2.1.2.2 DBA substráty

Výroba tohoto substrátu je velice podobná jako u technologie DBC s tím rozdílem, že místo měděné fólie je použita hliníková fólie o vysoké čistotě (99,99%). Síla hliníkové fólie a jádra se opět odvíjí od použité keramiky. Pohybují se v rozmezí 0,2 až 0,4 mm hliníkové fólie a 0,25 až 0,635 mm keramického jádra. U tohoto substrátu dochází ke spojení vrstev při teplotě 610 °C a tlaku 0,4 MPa. Celý tento proces trvá 30 min.

2.1.2.3 TPC substráty

Tato technologie je novinkou posledních let. Byla vyvinuta jako alternativa k technologii DBC, protože DBC substrát není tak tepelně spolehlivý a není možné pomocí této metody selektivně nanášet různé tloušťky vodivé vrstvy. TPC substrát je ve finální podobě stejný jako substrát DBC. Nejčastěji je tento způsob nazýván technologií tlustých vrstev. Zásadní rozdíl mezi těmito typy je v nanášení vodivé vrstvy, která je u TPC nanášena pomocí sítotisku. Sítotiskem (Obr. 3) je možné nanášet vodivou vrstvu na různé druhy materiálů, keramiku, kov i papír. Nejčastěji se této metody využívá právě u keramických substrátů. Povrch desky nemusí být tak rovný, jako například u DBC technologie a vodivé vrstvy se mohou překládat [18].

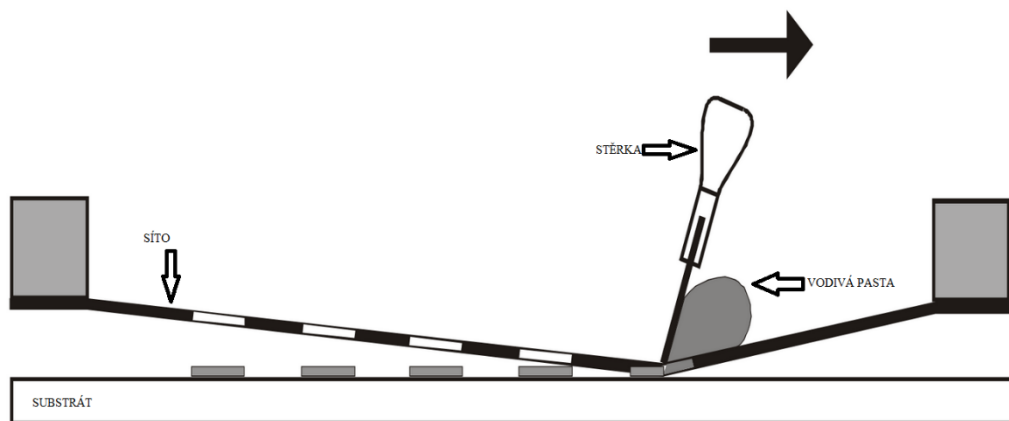
Tisk probíhá pomocí předem připraveného síta s motivem vodivých cest. Vodivé cesty tvoří průchozí místa síta. Mimo vodivé cesty je síto zalepeno vytvrzenou barvou, která zamezuje natisknutí pasty na jiná místa. Vodivé cesty tvoří vodivé pasty protlačené přes síto [4], [18].

Pasta se skládá z několika složek. Funkční složka zajišťuje žádané elektrické vlastnosti. Jako funkční složka se využívají slitiny stříbra s platinou nebo stříbra s paladiem. Nyní se stále častěji využívají pasty s funkční složkou tvořenou mědí, označované jako TPC (Obr. 4). [4] Další složka je technologická, ta zajišťuje viskozitu pasty pro vhodné nanášení a po vypálení vyprchá z pasty. Pojivová složka drží pohromadě části složky funkční a spojuje pastu s nosnou deskou. Využívá se zde oxidů kovů [18].

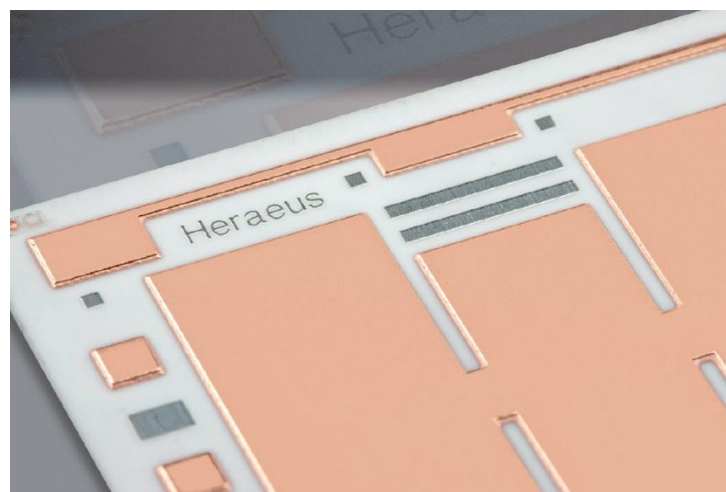
Pasty se dále dělí do skupin dle funkce na vodivé, odporové, izolační a dielektrické. Důležitou vlastností vodivé pasty je skutečnost, že se stává vodivou až po svém vypálení [4].

Protlačená vodivá pasta zanechá na keramickém substrátu vodivý otisk. Pokud vyžadujeme silnější vodivou cestu, musíme proces tisku vícekrát opakovat. Před nanesením další vrstvy je důležité stávající vrstvu vysušit. Doba a teplota sušení je různá, záleží na druhu pasty. Po vysušení můžeme nanést další vrstvu. Tímto způsobem je možno u vodivé pasty s obsahem mědi dosáhnout tloušťky až 300 μm [18].

Takto připravenou vodivou vrstvu je nutno vypálit v peci při teplotě 900 až 925 $^{\circ}\text{C}$, v dusíkové atmosféře za malého přístupu kyslíku.



Obr. 3 Princip sítotisku [29]



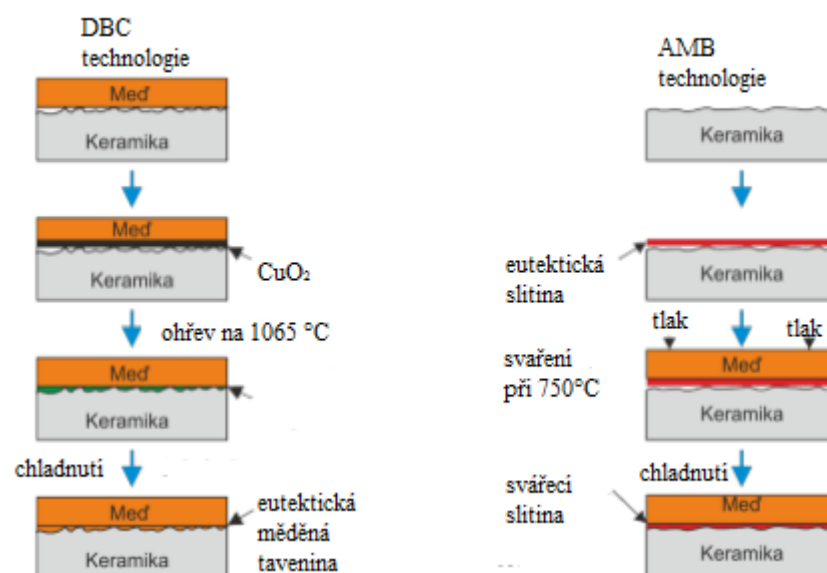
Obr. 4 Vypálená TPC vrstva [30]

2.1.2.4 AMB substráty

Tento typ substrátu kombinuje keramickou složku substrátu ve spojení s vodivou vrstvou, stejně jako u DBC nebo DBA substrátů. Rozdíl tohoto spojení je v eutektické vrstvě. Eutektikum není tvořeno na povrchu měděné folie, ale je samostatnou vrstvou (Obr. 5). Tato vrstva je vkládána mezi měď a keramiku. Na složení této vrstvy závisí celková odolnost substrátu. Nejčastěji je tato slitina složena ze 72 % stříbra a 28 % mědi obohacené titanem, zaručujícím lepší tavení. Titan je nejběžněji používán jako aktivní prvek v komerčních svařovacích slitinách pro technologii AMB. Nejčastěji používaný titan se nahrazuje jinými aktivními prvky, například zirkon, hafnium, chrom, niob a vanad [17].

K tavení této vrstvy dochází při teplotě 750 °C v závislosti na keramice. Po následném zchladnutí dojde ke spojení obou vrstev. Substrát je poté schopen pracovat při teplotě 600 °C bez jakéhokoliv poškození, představující oddělení vodivé vrstvy od keramické. Nejčastěji používané keramiky pro toto spojení jsou AlN (nitrid hliníku), nebo Si₃N₄ (nitrid křemíku). Z těchto dvou se častěji používá nitrid hliníku pro svou chemickou odolnost a tepelnou vodivost. Vodivá část je tvořena mědí o síle až 0,8 mm [2], [3], [17].

Výhodou těchto substrátů je velikostní variabilita (až na minimální hodnoty), odolnost vůči vysokým teplotám, nízký odpor vůči vedení tepla a relativně dlouhá životnost [2].



Obr. 5 Porovnání DBC a AMB technologie [17]

2.1.2.5 Vlastnosti keramických substrátů:

Mezi nejdůležitější vlastnosti keramických substrátů patří dobrá mechanická pevnost, stabilní tvar, dobrá přilnavost, odolnost proti korozi, vynikající elektrická izolace, velmi dobrá tepelná vodivost, tepelná stabilita cyklu. Keramický substrát také může být strukturován stejně jako DPS, nebo IMS.

Silná vrstva mědi umožňuje vyšší proudové zatížení pro stejnou šířku vodiče. Výborná tepelná vodivost poskytuje možnost velmi úzkého balení čipů. To se promítá do vyššího výkonu na jednotku objemu a zvýšení spolehlivosti systémů a zařízení. Vysoké izolační napětí umožňuje použití tenkých dielektrických materiálů (například oxid hlinitý), pro lepší tepelný rozptyl napětí pro vysokoteplotní aplikace.

2.1.3 Kovové substráty

S rozvojem výkonových LED systémů, solárních článků a snížením jejich ceny se v poslední době zvýšil zájem o tyto substráty. Jedná se tedy o substráty s kovovým jádrem. Toto jádro je elektricky vodivé, proto je důležité jádro izolovat od vodivé vrstvy. Častěji používaným názvem je izolovaný kovový substrát ve zkratce IMS. Mají spoustu výhod, v první řadě jejich zvýšenou tepelnou vodivost, protože je substrát tvořen převážně kovem a kovy obecně mají dobrou tepelnou vodivost. Díky zvýšené tepelné vodivosti není potřeba používání dalšího chladičového prvku, jako jsou například chladiče a jiná tepelná rozhraní. Pro zvýšený odvod tepla je možné vytvořit chladičí žebra přímo z kovového jádra. Tyto tepelné vlastnosti umožňují snížení pracovní teploty až o 50 %. Na Obr. 6 je znázorněno porovnání pracovních teplot dvou substrátů [12].



Obr. 6 Porovnání pracovní teploty FR4 vlevo a IMS vpravo [12]

Díky již zmíněným vlastnostem je možné obvody zatěžovat většími proudy a i přes velkou proudovou hustotu procházející obvodem se součástky na desce dokáží chladit. Pracují pak za optimálních podmínek, což ve výsledku prodlužuje životnost nejen

součástek, ale i vodivých cest a tím i celého obvodu. Dobrého odvodu tepla využíváme i při volbě rozměrů desky, která může být menší a i přes větší hustotu součástek se obvod bude pořád dobře chladit. Tím šetříme množství materiálu potřebné k výrobě a rozměry celého výrobku. Další výhodou izolovaného kovového substrátu je jeho mechanická pevnost. Použitím kovu jako nosné části substrátu se dostáváme do výhody oproti keramickým substrátům, které jsou křehké. Keramické substráty není možné tvarovat dle vlastních potřeb tak jako ty kovové. Kovové substráty lze po vybroušení v určitých místech libovolně tvarovat [17], [12].

2.1.3.1 Složení substrátu

Substráty se vyrábějí jednovrstvé nebo vícevrstvé, některé typy jsou kombinovány se substrátem FR4. Jednovrstvý substrát je složen ze tří základních vrstev (Obr. 7). Vodivá vrstva zajišťuje propojení součástek. Nosná kovová vrstva tvoří jádro substrátu a zajišťuje odvod tepla. Třetí vrstvu tvoří izolace mezi vodivou a nosnou kovovou vrstvou [20], [12].



Obr. 7 Složení jednovrstvého IMS [20]

Nosná kovová vrstva

Nosná kovová vrstva tvoří jádro substrátu. Díky kovovému základu získává substrát mnoho výhod. Získá lepší mechanickou pevnost a do určité míry tvarovatelnost. Síla kovového jádra se pohybuje v rozmezí od 0,5 až 5 mm. Nejčastěji používaným kovem je měď nebo hliník. V některých případech je používána nerezová ocel, která vyniká v dobrém elektromagnetickém stínění. Měď má z těchto kovů nejlepší tepelnou vodivost. I přes tuto vlastnost mědi se častěji využívá hliník. Výhodou hliníku je jeho nízká hmotnost a menší tepelná roztažnost, než je u mědi. Další podstatnou výhodou je cenová dostupnost hliníku. Díky těmto vlastnostem je hliník nejčastěji využívaným materiálem pro nosné kovové vrstvy. Přehled kovů používaných jako nosná kovová vrstva v Tab. 2 [21], [17].

Tab. 2 Vlastnosti materiálů [21]

kov	Tepelná vodivost [W/m-K]	Tepelná roztažnost [ppm/K]	Hustota [g/cc]	Modul tuhosti [GPa]
měď C1100	391,1	16,9	8,94	117
hliník 5052	140	25	2,7	25,9
hliník 6061	170	25	2,7	26
hliník 1060	203	23,5	2,7	25,8
nerez. ocel 304	16	16	7,9	200

Vodivá vrstva

Vodivou vrstvu tvoří dobře elektricky vodivý materiál, tudíž materiál s malou elektrickou rezistivitou. Nejrozšířeněji používaným materiálem je měď. Měď s rezistivitou $\rho = 0,0172 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ je druhým nejlépe vodivým materiálem. Lepší rezistivitu má jen stříbro $\rho = 0,016 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, to se díky své ceně využívá jen výjimečně. Další výhodou mědi je její dobrá tepelná vodivost $\lambda = 395 \text{ W/m.K}$, čímž je zaručený dobrý odvod tepla od součástek. Tloušťka vodivé vrstvy je úměrná proudové hustotě. S rostoucí proudovou hustotou narůstá i tloušťka vodivé vrstvy [21], [12].

Izolační vrstva

Izolační vrstva je nejdůležitější součástí substrátu. Zajišťuje elektrické oddělení jádra od vodivých cest. Zároveň musí mít minimální tepelný odpor pro zaručení dobré průchodnosti tepla do kovového jádra substrátu. Nejčastěji používaným materiálem je tepelný pre-preg. Tento materiál díky své vysoké tepelné vodivosti zaručuje správný prostup tepla substrátem. Zároveň zajišťuje dobrou elektrickou izolaci. Tloušťka dielektrické vrstvy se odvíjí od potřebné dielektrické pevnosti. Pohybuje se v rozmezí od 38 do 305 μm . Silná dielektrická vrstva chrání substrát před průrazem vysokým napětím, ale zároveň snižuje tepelnou vodivost. Proto volíme vždy kompromis mezi těmito parametry [17].

2.1.3.2 Výrobní proces

Jako první krok se z hliníkové desky nařežou jádra substrátu o požadovaných rozměrech. Dalším krokem je vrtání, předvrtají se uchycovací a jiné potřebné otvory. Tyto destičky jsou na povrchu pokryty oxidací. Oxidaci je nutno odstranit pro lepší přilnutí dalších vrstev. Tomuto jevu se dá zabránit ochrannou folií na desce hliníku, která se odstraní. Na čisté

kovové jádro je nanášena vrstva dielektrika. Dielektrikum je nanášeno pomocí sítotisku, nebo pomocí lakování, záleží na druhu tvorby vodivých cest [22], [23]. Po nanesení se v případě sítotisku vrstva vypálí při teplotě 580 °C. V případě lakování je vrstva dielektrika vytvrzena pomocí infračervené pece. Po vytvrzení je pomocí laminace, to znamená za velkého tlaku a teploty připevněna vodivá vrstva. U vrstvy dielektrika naneseném sítotiskem je vodivá vrstva nanášena přímo na izolovanou matrici [12], [23].

2.2 Společnosti produkující substráty

V současnosti se výzkumem a výrobou kovových substrátů pro výkonovou elektroniku zabývají hlavně zahraniční společnosti. Společnost Bergquist patří ke světovým lídrům ve vývoji a výrobě tepelně vodivých materiálů. Další je německá firma Hubert Heusner poskytuje keramické substráty s různými druhy metalizací. Další firma je Aurel s.p.a sídlí v Itálii a vyniká technologií tlustých vrstev a výrobou hybridních obvodů. Firma Ventec International Group pochází z Číny, je lídrem ve výrobě kvalitních a výkonných mědi plátovaných laminátů a pre – preg materiálů. Další známou společností je Heraeus původem z Německa patří k předním dodavatelům high-tech průmyslových drahých kovů a speciálních kovových produktů. Je předním výrobcem vodivých lepidel, pájek. Firma LairdTech pochází z Velké Británie a patří také k hlavním výrobcům technologií pro elektroniku.

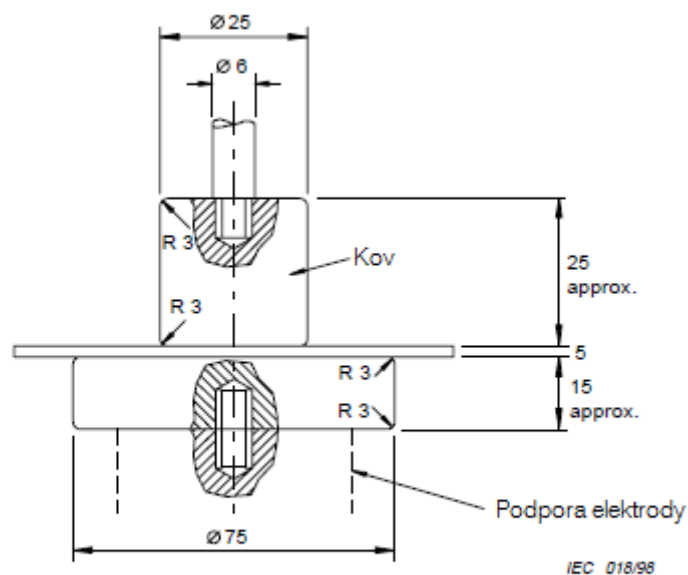
Všechny tyto firmy se zabývají vývojem pro snížení tepelného odporu substrátů, protože proudové zatížení spojů se zvyšuje, a je třeba odvádět přebytečné teplo. Substráty od těchto výrobců nacházejí široké uplatnění v různých průmyslových odvětví vyrábějících například bezdrátové komunikace, senzory, optická vlákna, LED, automobilové elektroniky, počítačové periferie, lékařské a síťová zařízení.

3 Návrh testovacích motivů

Cílem měření bylo zjištění základních materiálových parametrů pasty HERAEUS IP9319D, u které byla měřena elektrická pevnost, vnitřní rezistivita, relativní permitivita a povrchové napětí. Pro tato měření byly navrženy vlastní vzorky dle norem k tomu určených.

3.1 Normy pro zkoušky

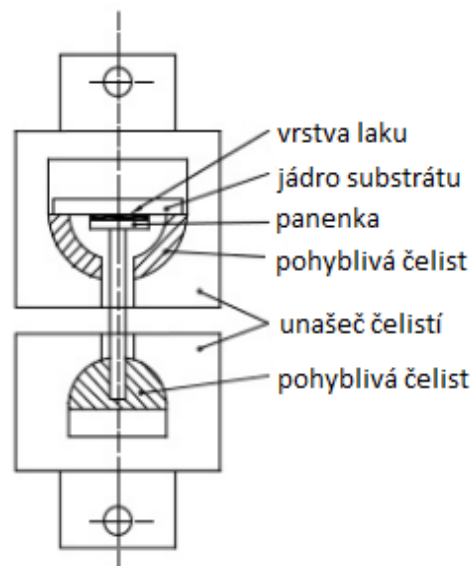
Elektrická pevnost určuje odolnost pasty použité v izolovaném kovovém substrátu proti působení elektrického pole. Kritéria měření elektrické pevnosti udává norma ČSN EN 60243-1 až 3. Měření bude probíhat při frekvenci 48 Hz až 62 Hz při stálé teplotě a tlaku. Musí být zajištěna stejná tloušťka a homogenita vzorku a musí se zamezit přístupu vlhkosti a jiných nečistot. Důležité je měřit kolmo k povrchu, jak je vidět na Obr. 8 s danými rozměry elektrod. Elektrody jsou vyrobeny z nerezové oceli, hladké, čisté a bez porušení [27].



Obr. 8 Rozměry elektrod [27]

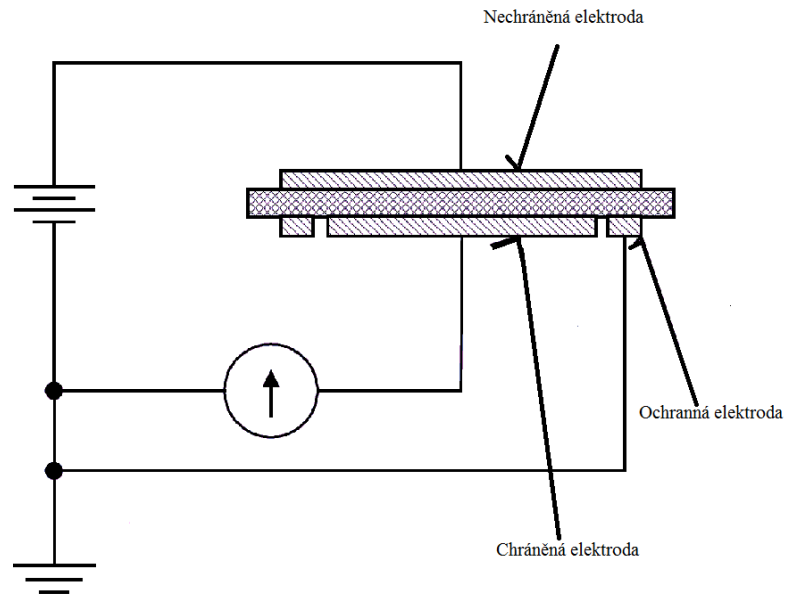
Při tomto testu pevných látek dochází k destruktivnímu průrazu, čímž zjistíme kritickou velikost intenzity elektrického pole [27].

Testování povrchového napětí (Pull-off test) popisuje norma ISO 4624. Měření se provádí na vytvrzeném povlaku při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 5 %. Na povlak se přilepuje panenka, která zajišťuje upevnění vzorku v testovacím mechanismu. Povlak se namáhá tahem v kolmém směru k substrátu. Tah je plynule zvyšován rychlostí nepřekračující 1 MPa/s, do doby odtržení panenky. Odtržením zjistíme kritickou mez v tahu [33].



Obr. 9 Testovací mechanismus [33]

Měření vnitřní rezistivity popisuje zkušební norma ČSN IEC 93. Tato norma ovlivňuje druh a velikost elektrod, doba a velikost připojení, teplota a vlhkost okolí i vzorku. Vzorek má být čtvercového tvaru 100 x 100 mm. Připojení vzorku je zajištěno kovovými elektrodami, jak je znázorněno na Obr. 10. Měření probíhá pomocí stejnosměrného napětí po určitý čas [27].

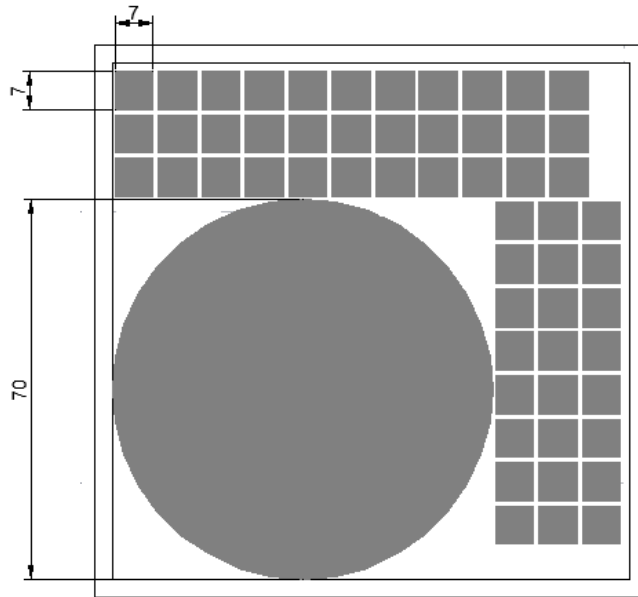


Obr. 10 Zapojení vzorku pro měření vnitřní rezistivity [28]

3.2 Návrh vlastního motivu

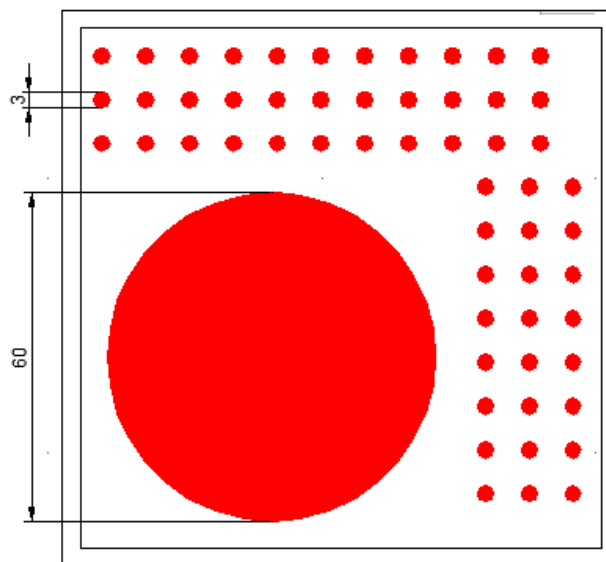
Za pomoci firmy Elceram byl vytvořen vhodný testovací motiv pro naše měření. Rozměr je dán výrobními možnostmi firmy a rozměry použitých elektrod.

Kovové jádro je tvořeno měděným plechem o rozměrech 101,6 x 101,6 mm. Jádro je na jedné straně očištěno pro nanesení izolační vrstvy. Před samotným nanesením izolační vrstvy je pro zlepšení adheze nanesena pasta Heraeus C7403. Izolační vrstva je tvořena dielektrickou pastou HERAEUS IP9319D, která je na měděný plech nanesena sítotiskem. Navržený motiv pro nanesení dielektrické vrstvy je vidět na Obr. 11. Zde je vidět kruh o průměru 70 mm, a čtverce o rozměrech 7 x 7 mm.



Obr. 11 Motiv síta pro nanesení izolační vrstvy

Dielektrická pasta je nanášena postupně ve dvou vrstvách a po nanesení je každá vrstva vysušena. Po vysušení je nanášena vodivá vrstva. Vodivá vrstva je tvořena vodivou pastou Heraeus C7403, nanášenou také pomocí sítotisku. Na Obr. 12 je vidět, že se motiv pro vodivou vrstvu skládá z kruhů o průměru 60 mm a 3 mm.

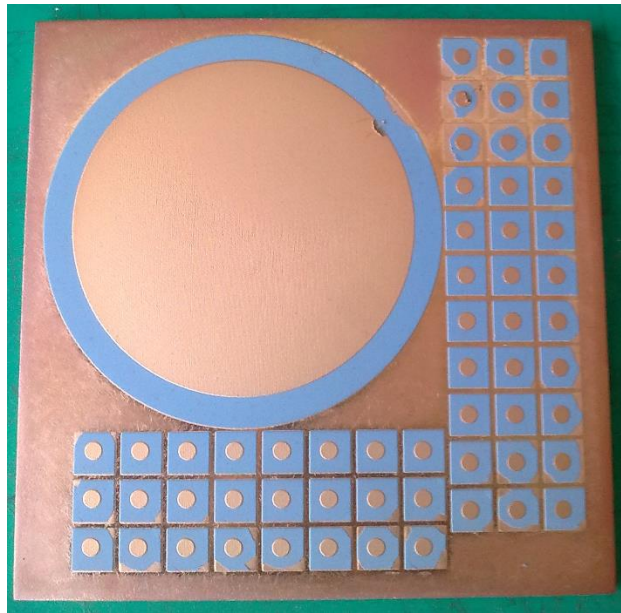


Obr. 12 Motiv síta pro nanesení vodivé vrstvy

Takto připravený substrát se vypálí v peci s dusíkovou atmosférou s určitou koncentrací kyslíku. Vypalování probíhá při teplotě 925 °C. Vysoká teplota zajistí propojení vrstev a jejich vytvrzení. Velký vzorek je určen pro měření kapacity, dielektrické pevnosti a povrchové rezistivity. Malé vzorky jsou určeny pro měření adheze.

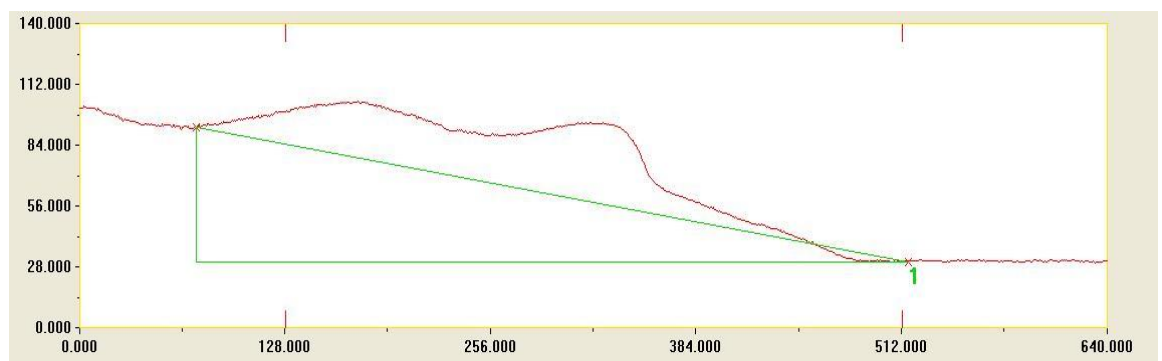
4 Testování vzorků

Pro testování byly použity navržené vzorky. Celkem bylo dodáno 57 vzorků pro měření povrchového napětí a 2 vzoreky pro měření elektrické pevnosti a rezistivity (Obr. 13). Pro lepší připojení do měřících obvodů bylo potřeba na vzorky připájet kontaktní drátky.

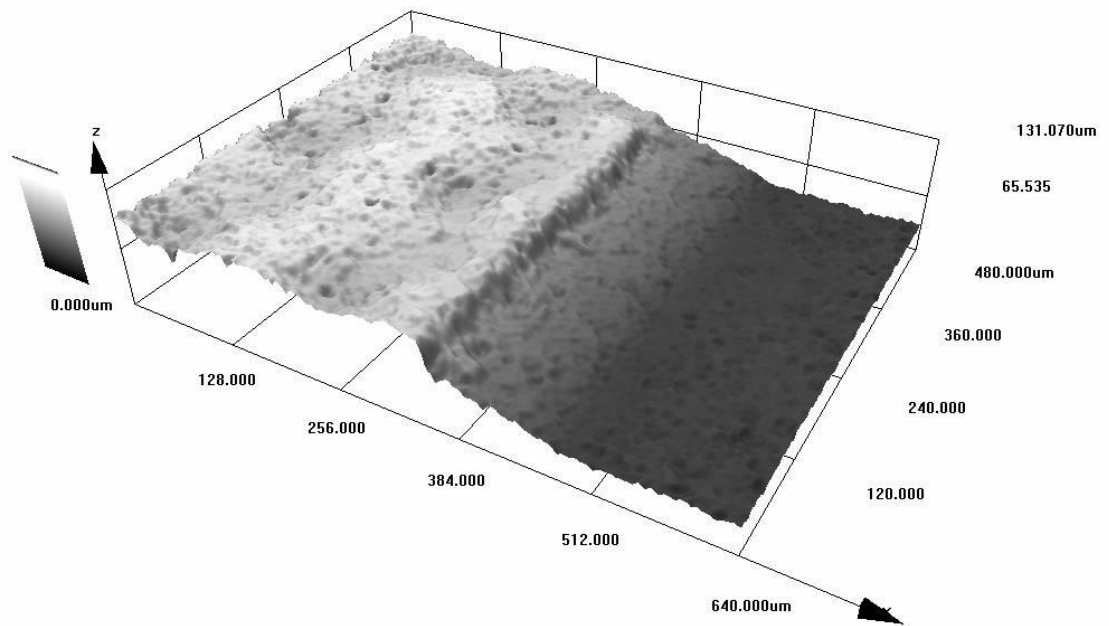


Obr. 13 Testované vzorky

Před samotným pájením bylo nutné změřit tloušťku dielektrické vrstvy. Pro měření dielektrické vrstvy byl použit laserový konfokální mikroskop Olympus LEXT 3000. Z výsledků měření dielektrické vrstvy je patrné, že tloušťka dielektrické vrstvy je 60 μm (Obr. 14).

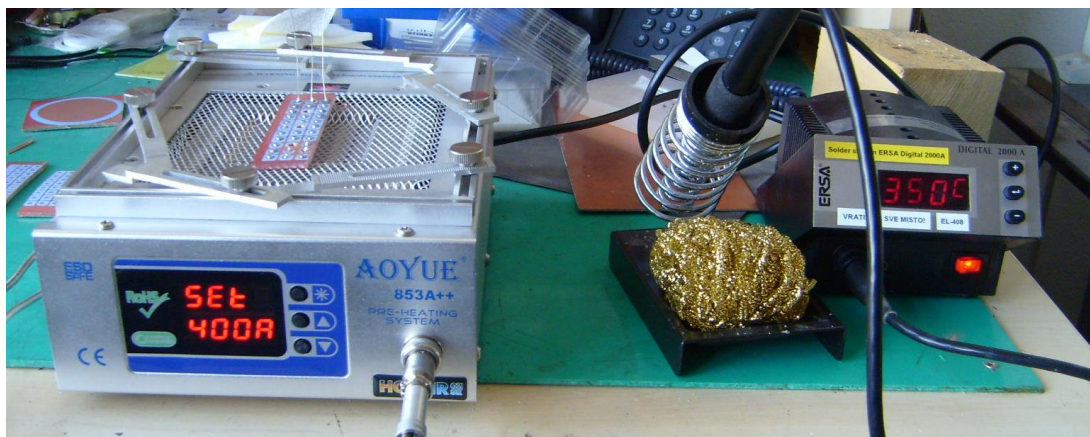


Obr. 15 Vykreslený profil substrátu



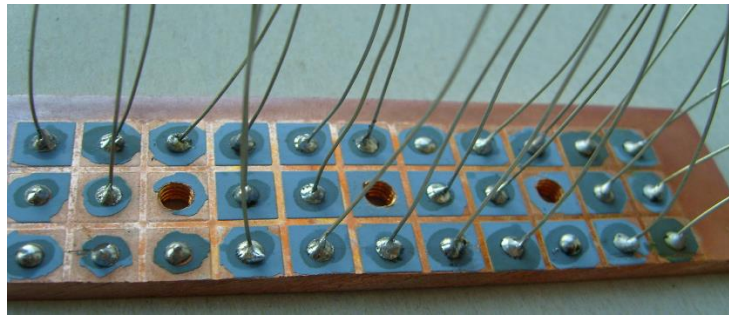
Obr. 16 3D obraz přechodu keramika- dielektrikum

Před samotným pájením byl vzorek rozřezán na části. Pro měření adheze byly ve vzorku vytvořeny závitky k natočení šroubků, k lepšímu uchycení do čelistí. Pro připájení drátků bylo třeba vzorky předehřát na plotýnce a použít tavidlo, pro lepší přilnutí cínu.



Obr. 17 Předehřátí vzorku před pájením

Na Obr. 18 jsou znázorněny vzorky s napájenými kontaktními drátky a otvory pro uchycení pomocí šroubků.



Obr. 18 Připravený vzorek k testování

4.1 Měření permitivity

Na připravených vzorcích byla změřena kapacita dielektrické vrstvy. Měření probíhalo pomocí LCR metru KEYSIGHT E4980A (Obr. 19). Kapacita dielektrické vrstvy byla pro větší přesnost měřena na čtyřech frekvencích 100 Hz, 1 KHz, 10 KHz a 100 KHz. Naměřené kapacity a výsledné permitivity jsou zapsány v Tab. 3.



Obr. 19 LCR metr KEYSIGHT E4980A

Celkovou permitivitu vypočteme pomocí vzorce 3.1, do kterého dosadíme naměřené hodnoty. Kapacitu jsme zvolili při frekvenci 100 KHz a vynásobíme délkou izolační vrstvy $d = 60 \mu\text{m}$ a celé to vydělíme průřezem $S = 7,1 \text{ mm}^2$. Relativní permitivitu vypočteme vydělením celkové permitivity permitivitou vakua $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, dle vzorce 3.2.

$$\epsilon = \frac{C \cdot d}{S} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.2)$$

Tab. 3 Měření permitivity

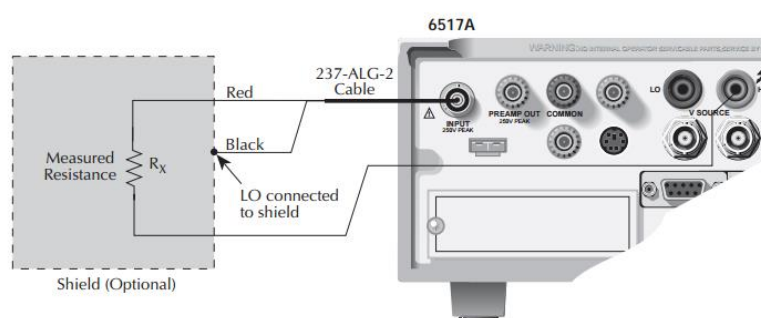
vzorek	C[pF] při 100 Hz	C[pF] při 1 KHz	C[pF] při 10 KHz	C[pF] při 100 KHz	$\varepsilon[10^{-12} \cdot F/m]$	$\varepsilon_r[-]$
1	7,25	6,86	6,77	6,67	56,65	6,40
2	8,12	8,00	7,89	7,80	66,24	7,48
3	7,91	7,78	7,70	7,63	64,80	7,32
4	8,27	8,18	8,09	8,03	68,20	7,71
5	8,92	8,84	8,73	8,69	73,80	8,34
6	9,05	8,95	8,84	8,81	74,82	8,45
7	8,51	8,43	8,35	8,31	70,57	7,97
8	8,61	8,54	8,43	8,42	71,51	8,08
9	9,01	8,91	8,78	8,77	74,48	8,42
10	9,16	9,07	8,96	8,94	75,92	8,58
11	8,51	8,42	8,32	8,35	70,91	8,01
12	8,89	8,77	8,65	8,63	73,29	8,28
13	8,38	8,31	8,22	8,19	69,55	7,86
14	8,83	8,69	8,58	8,54	72,53	8,20
15	9,12	8,99	8,89	8,86	75,24	8,50
16	9,29	9,11	8,93	8,91	75,67	8,55
17	8,61	8,48	8,39	8,37	71,08	8,03
18	9,12	8,93	8,81	8,82	74,90	8,46
19	9,09	8,99	8,87	8,86	75,24	8,50
20	8,39	8,31	8,25	8,23	69,89	7,90
21	8,39	8,32	8,26	8,25	70,06	7,92
22	8,94	8,79	8,67	8,64	73,38	8,29
průměr	8,65	8,53	8,43	8,40	71,31	8,06

4.2 Měření rezistivity

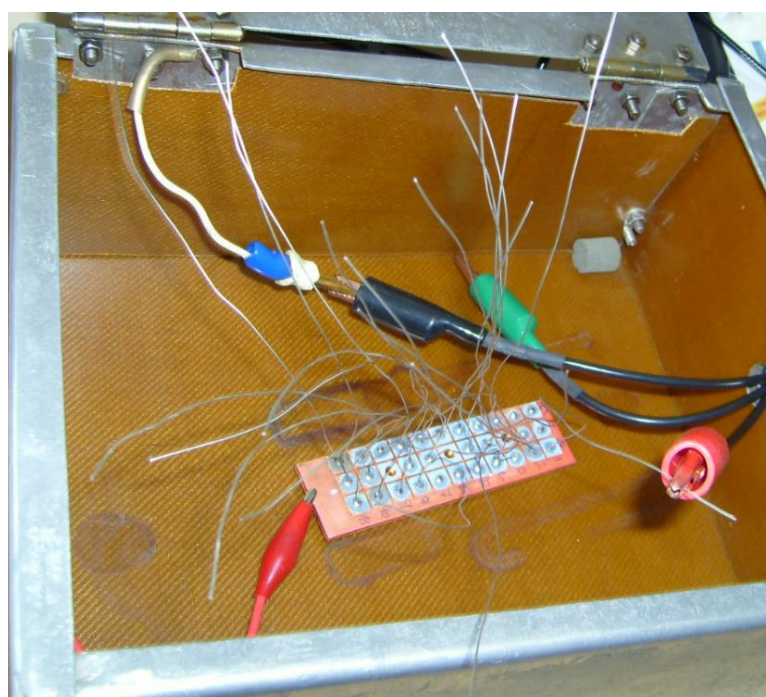
Další měření bylo měření rezistivity dielektrické vrstvy. Pro měření malých vzorků byl použit elektrometr KEITHLEY 6517A a stínící box (Obr. 20), měření probíhalo nepřímou voltampérovou metodou. Vzorky byly připojovány k elektrometru (Obr. 21) za jednotlivé kontakty ve stínícím boxu (Obr. 22). Hodnoty proudů byly odečítány při stejnosměrném napětí elektrometru 500 V. Pro měření velkých vzorků byl použit opět elektrometr KEITHLEY 6517A s testovací komorou KEITHLEY 8009 (Obr. 23). Touto metodou jsme přímo zjistili vnitřní a vnější rezistivitu (Tab. 5).



Obr. 20 Elektrometr KEITHLEY 6517A se stínícím boxem



Obr. 21 Schéma zapojení [31]



Obr. 22 Zapojení vzorku v boxu

Naměřené hodnoty proudu a napětí využijeme v nepřímé metodě pro výpočet odporu dielektrické vrstvy a následně pro výpočet vnitřní rezistivity dielektrické vrstvy. Délka dielektrické vrstvy vzorků je rovna 60 μm . Obsah dielektrické vrstvy vzorků je 7,065 mm^2 . Pro výpočet byly použity tyto vzorce:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.3)$$

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (3.4)$$

Tab. 4 Naměřené hodnoty pro výpočet rezistivity

vzorek	I [μA]	R [T Ω]	ρ [$10^{14} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$]
1	13,02	38,402	4,5219
2	13,54	36,928	4,3482
3	2,13	234,742	27,6408
4	1,53	326,797	38,4804
5	1,17	427,35	50,3205
6	105	4,762	0,5607
7	13,64	36,657	4,3163
8	128	3,906	0,46
9	13,48	37,092	4,3676
10	162	3,086	0,3634
11	1070	0,467	0,055
12	204000	0,002	0,0003
13	153	3,268	0,3848
14	115000	0,004	0,0005
15	74000	0,007	0,0008
16	11,24	44,484	5,238
17	207	2,415	0,2844
18	102	4,902	0,5772
19	75	6,667	0,785
20	48	10,417	1,2266
21	224000	0,002	0,0003
22	245000	0,002	0,0002
průměr	39278,17045	55,5618	6,5424

Tab. 5 Naměřené hodnoty rezistivity velkých vzorků

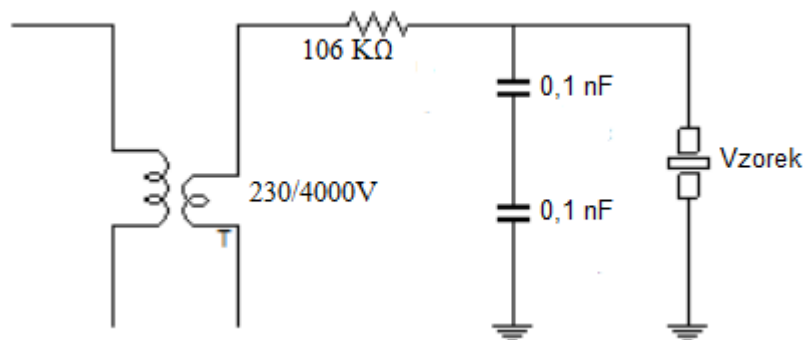
vzorek	ρ [$10^{12} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$]	ρ_p [$10^8 \cdot \Omega$]
1	4,17	1,204
2	3,89	1,604
průměr	4,03	1,404



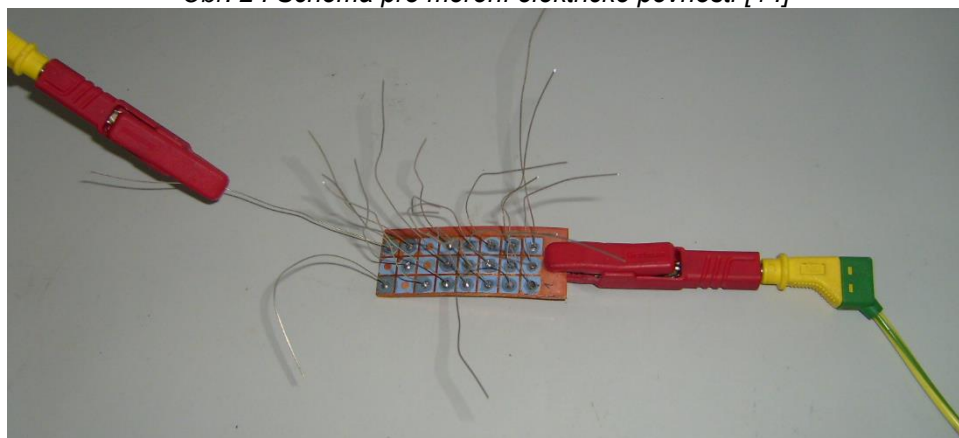
Obr. 23 Testovací komora Keithley 8009 [34]

4.3 Měření elektrické pevnosti

Pro změření elektrické pevnosti byly vzorky postupně zapojovány do obvodu, který je znázorněn na Obr. 24, řízeným řídicím pultem SIEMENS SIMATIC OP17. Vzorky 1-22, byly připojeny za kontaktní drátek a nosnou kovovou část (Obr. 25).



Obr. 24 Schéma pro měření elektrické pevnosti [14]



Obr. 25 Zapojení vzorku

Vzorky byly měřeny při střídavém napětí, které řídicí pult plynule zvyšoval na napětí průrazu U_p . Tloušťka d je u všech vzorků stejná a to 60 μm . Elektrickou pevnost E_p vypočítáme z následujícího vzorce:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (3.5)$$

Tab. 6 Elektrická pevnost

vzorek	U_p [V]	E_p [V/mm]
1	470	7833
2	370	6167
3	425	7083
4	425	7083
5	380	6333
6	410	6833
7	375	6250
8	420	7000
9	410	6833
10	380	6333
11	375	6250
12	430	7167
13	380	6333
14	280	4667
15	400	6667
16	385	6417
17	430	7167
18	311	5183
19	280	4667
20	370	6167
21	425	7083
22	410	6833
průměr	388	6470

4.4 Měření adheze

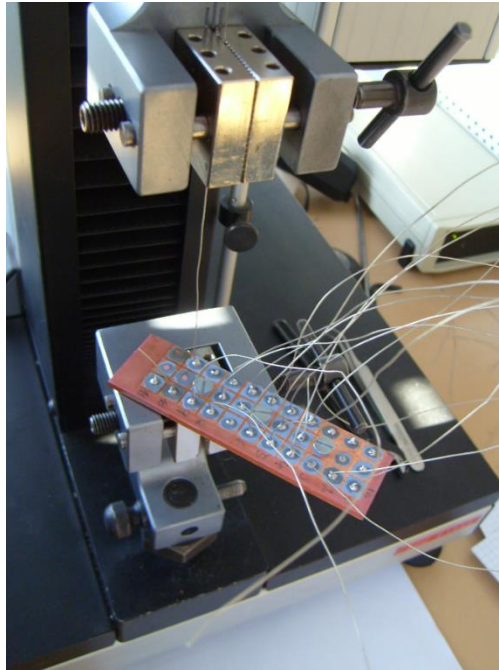
Měření adheze probíhalo metodou Pull off, tato metoda způsobí odtržení vodivé vrstvy od nosného substrátu. Odtržením zjistíme pevnost izolační pasty v tahu. Odtržení probíhalo na trhacím zařízení Labor Tech řízeném počítačem (Obr. 26). Pro změření, bylo nutné opatřit vzorky šrouby pro lepší uchycení do čelistí. Následně bylo nutné nastavení pohybu čelistí $v = 50 \text{ mm/min}$ a vypnutí pohybu při poklesu síly $F = 1 \text{ N}$. Do takto nastaveného zařízení

byly postupně připojovány všechny vzorky (Obr. 27). Odtrháním vodivých vrstev byla u vzorků zjištěna kritická mez síly v tahu (F). Plocha izolační vrstvy byla u všech vzorků $7,065 \text{ mm}^2$. Z kritické meze je pomocí rovnice 3.6 vypočítáno povrchové napětí (Tab. 7).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.6)$$



Obr. 26 Trhací zařízení Labor Tech



Obr. 27 Vzorek v trhacím zařízení

Tab. 7 Povrchové napětí

vzorek	F [N]	σ [N/mm ²]
1	84,10	11,90
2	89,04	12,60
3	61,64	8,73
4	116,47	16,49
5	109,92	15,56
6	73,06	10,34
7	174,03	24,63
8	150,20	21,26
9	165,74	23,46
10	139,06	19,68
11	151,42	21,43
12	131,98	18,68
13	44,01	6,23
14	53,35	7,55
15	54,35	7,69
16	49,96	7,07
17	82,01	11,61
18	72,37	10,24
19	70,89	10,03
20	47,89	6,78
21	49,80	7,05
22	25,63	3,63
průměr	90,77	12,85

Závěr

V první části bakalářské práce jsou uvedeny materiály používané pro výrobu výkonových substrátů a jejich výhody a nevýhody. Dále je v první části sepsán přehled klíčových vlastností výkonových substrátů, mezi které patří vysoká elektrická pevnost, vysoká tepelná vodivost, tepelná odolnost, velký měrný elektrický odpor, chemická odolnost a cena.

V druhé části je zpracována rešerše zaměřená na používané typy výkonových substrátů, jejich vlastnosti, složení jednotlivých vrstev výkonových substrátů a způsoby výroby. Kovové substráty nejsou zpracovány tak podrobně, protože jejich využívání je poměrně nové. V této části se také nachází souhrn firem zabývajících se výrobou výkonových substrátů.

Ve třetí části byly navrženy dva testovací vzorky. První pro ověření dielektrické pevnosti a vnitřní rezistivity kov-dielektrikum-kov. Druhý je navržen pro ověření adheze vzorku kov-dielektrikum-kov. Také byly navrženy motivy sít pro výrobu těchto vzorků pomocí sítotisku.

Ve čtvrté části byla změřena permitivita, dielektrická pevnost, vnitřní rezistivita a povrchové napětí navržených vzorků. Vypočtená celková permitivita byla použita pro výpočet relativní permitivity, relativní permitivita se pohybovala v rozmezí (6,4-8,55). Vnitřní rezistivita byla změřena s velkými rozdíly proudů. Chyba mohla být dána různými kontaktními drátky s různým úbytkem napětí a kontaminací dielektrické vrstvy cínem. Měřením dielektrické pevnosti bylo zjištěno, že dielektrická pasta odolá střídavému napětí, až 470 V. Průměrná hodnota elektrické pevnosti byla 6470 V/mm. Porovnáním měření zjistíme, že rezistivita byla měřena při větším napětí, než je elektrická pevnost vzorků. Tento jev je způsoben použitím střídavého napětí při měření elektrického průrazu. Střídavé napětí má totiž silnější degradační schopnost než napětí stejnosměrné. Měřením odolnosti v tahu bylo zjištěno průměrné povrchové napětí 12,85 N/mm².

Z výsledků všech měření by mělo být patrné, že byly použity vzorky stejných rozměrů. Odlišnosti mohou být dány horší kvalitou zpracování, nebo nestejnorodou strukturou izolační vrstvy. Nestejnorodá struktura izolační vrstvy je způsobena kontaminací vrstvy cínem. Cín ve vrstvě zapříčiní snížení rezistivity, a tím se zvýší lokální vodivost. V horším případě dojde ke zkratování vodivých vrstev. Kvůli této velké kontaminaci cínem nemohli být použity velké vzorky pro měření elektrické pevnosti a kapacity.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. Výkonová elektronika. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007, 201 s. ISBN 80-010-2094-0.
- [2] BLANK, T., B. LEYRER, T. MAURER, M. MEISSER, M. BRUNS a M. WEBER. Copper thick-film substrates for power electronic applications: Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC). 10.1109/ESTC.2014.6962860. 2014.
- [3] ŠAVEL, Jozef. Elektrotechnologie: Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice. Praha: BEN, 2007. ISBN 978-80-7300-1.
- [4] HROMADKA, Karel. Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice. [online]. Plzeň, 2015, 2015-11-25 [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: http://www.fel.zcu.cz/uredni_desky/UD_PhD/Probihajici_SDZ_a_obhajoby/Autoreferaty/150924_autoreferat_Hromadka_Karel.pdf. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
- [5] Výkonové elektronické součástky. [online]. 2000 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00014/index.html>
- [6] Ceramic Substrates. [online]. 2013 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://blog.rogerscorp.com/2013/03/07/power-electronic-substrates-turn-to-silicon-nitride-to-ensure-reliability-high-efficiency-and/>
- [7] Thick Copper Conductor Pastes. Circuits Components. [online]. 2013 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/broschueren/Heraeus_Thick_Copper_Conductor_Pastes.pdf
- [8] ČEJKA, Marek. Optimalizace tvorby tenkých vrstev kovových materiálů. [online]. 2014 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85267
- [9] Hubert Heusner. Ceramic substrates. Dcb-substrate.com [online]. 2014 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.dcb-substrate.com/distributor/index.php?page=772402243&f=1&i=772402243>
- [10] Tong Hsing: Výkonové substráty [online]. 2014 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: http://metallized-ceramic.ready-online.com/dpc_cs.html

- [11] PODANÝ, Pavel. Studium vlivu předdepozičních procesů na vlastnosti progresivních tenkých vrstev [online]. s. 38 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:
http://www.ateam.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_podany.pdf
- [12] NCAB group. Insulated Metal Substrate. [online]. 2011 [cit. 2015-11-23] Dostupné z:
http://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2015/10/07-NCAB_Group_Seminars_IMS_2_0_150930.pdf
- [13] SZENDIUCH, Ivan. Pouzdření v elektronice. [online]. 2012 [cit. 2015-11-23] Dostupné z:
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty(Bc).pdf)
- [14] KOHOUTONÁ, Petra. Substráty pro výkonové elektronické aplikace. [online]. Plzeň, 2015, [cit. 2016-3-3]. Dostupné z:
https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/8264/BP_Kohoutova_Petra.pdf?sequence=1
- [15] STARÝ, Jiří. Plošné spoje a povrchová montáž. [online]. Brno, 2011, [cit. 2016-3-10]. Dostupné z:
http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL_11_L_BPSM_Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf
- [16] Printed Circuit Board. Chris Cavette [online]. [cit. 2016-3-10]. Dostupné z:
<http://www.madehow.com/Volume-2/Printed-Circuit-Board.html>
- [17] GIRAŠEK, Tomáš. Substráty pro výkonovou elektroniku. [online]. 2015 [cit. 2016-3-13]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=18118>
- [18] PERSONS, Ryan. Thick Print Copper Technology Increases Thermal Reliability. [online]. 2015 [cit. 2016-3-13]. Dostupné z:
<http://www.electronicprotectionmagazine.com/main/articles/thick-print-copper-technology-increases-thermal-reliability/>
- [19] POLEDNÍK, Tomáš. Vodivé vrstvy realizované na nízkoteplotní keramice. [online]. 2012 [cit. 2016-3-15]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56848
- [20] AUREL s.p.a. IMS Technology. [online]. [cit. 2016-11-25] Dostupné z:
http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/catalogs/aurel_ims_insulated_metal_substrates.pdf
- [21] Henkel Electronics Materials. Thermal Clad. [online]. 2013 [cit. 2016-11-25] Dostupné z:
http://www.bergquistcompany.com/pdfs/techLibrary/tclad_2013_web_fullguide.pdf

- [22] BENMAJOR, Eduardo. The PCB Magazine. [online]. 2013, [cit. 2016-3-25].
Dostupné z: <http://www.magazines007.com/emag/pub/PCB-Mar2013/fscommand/PCB-Mar2013.pdf>
- [23] ElectroScience. [online]. [cit. 2016-3-25]. Dostupné z:
<http://electroscience.com/thickfilmonal.html>
- [24] KOBLÍŽEK, Vilém. Elektrická pevnost izolačních folií. Úloha 5 [online]. [cit. 2016-3-25]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_5.pdf
- [25] TURUNEN, Markus P. K. MARJAMAKI, Pekka, PAAJANEN, Matti, LAHTINEN, Jouko, KIVILAHTI, Jorma K. Pull-off test in the assessment of adhesion at printed wiring board metallisation/epoxy interface. [online]. [2004-2-7]. [cit. 2016-3-27].
Dostupné z: <http://lib.tkk.fi/Diss/2004/isbn9512272385/article2.pdf>
- [26] HRAŠNA, Michal. Prehľad základných plátovaných materiálov na výrobu DPS. [online]. [2012-4-7]. [cit. 2016-3-27]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:7333/prehľad-zakladnych-platovanych-materialov-na-vyrobu-dps>
- [27] International Electrotechnical Commission [online]. [1998]. [cit. 2016-4-27].
Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:7333/prehľad-zakladnych-platovanych-materialov-na-vyrobu-dps>
- [28] ČSN IEC 93: Metody měření vnitřní a povrchové rezistivity tuhých elektroizolačních materiálů. ČNI, Praha 1993.
- [29] Elektronická učebnice. Metoda průtisku [online]. [cit. 2016-5-27]. Dostupné z:
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1791>
- [30] Heraeus Thick copper Conductor Pastes [online]. [cit. 2016-5-27]. Dostupné z:
https://www.heraeus.com/media/media/het/doc_het/products_and_solutions_het_documents/thick_film/Brochure_Heraeus_Thick_Copper_Conductor_Pastes.pdf
- [31] Keithley Instruments, Inc. [online]. Users Manual [cit. 2016-5-27]. Dostupné z:
<http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/7293199.PDF>
- [32] Tong Hsing, Elektronik industries. [online]. [cit. 2016-5-30]. Dostupné z:
<http://www.theil.com/en/product/Substrate-Manufacturing-Services-Direct-Bonded-Copper-Substrate-DBC/DBC-02-2.html>
- [33] International Standard, Paint and varnishes-Pull-off test for adhesion. [online]. [cit. 2017-3-20]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/ariiedps/iso-4624-2002pulloff-test-for-adhesion>

- [34] Test Fixtures. In: Keithley [online]. [cit. 2017-3-20]. Dostupné z:
<http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/TestFixtures.pdf>