

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostika desek plošných spojů

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

Jméno a příjmení: **Martin FRIDRICHOVSKÝ**
Osobní číslo: **E11B0112P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostika desek plošných spojů**
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 :

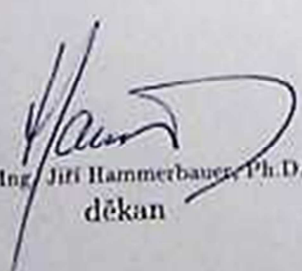
1. Seznamte se s problematikou výroby desek plošných spojů, zaměřte se především na nové trendy v této oblasti.
2. Proveďte rešerši metod testování kvality desek plošných spojů.
3. Porovnejte jednotlivé metody především z hlediska kvality, časové a finanční náročnosti a navrhněte optimální řešení zadaného problému.
4. Pomocí vybraných metod proveďte diagnostiku desek plošných spojů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

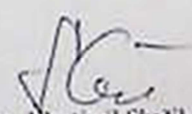
1. ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.
2. HAMÁČEK, Aleš. Vliv návrhu a technologie výroby desek plošných spojů na spolehlivost elektronických zařízení [disertační práce]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 68 s.
3. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Hromádka
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na diagnostiku desek plošných spojů. V práci jsou popsány základní materiály pro výrobu substrátů, metody výroby a propojovací struktury desek plošných spojů. Dále práce obsahuje rešerši metod testování kvality substrátů a desek plošných spojů. V experimentální části jsou provedeny a zhodnoceny zkoušky adheze, proudové zatížitelnosti a rezistivity vybraných substrátů.

Klíčová slova

Deska plošného spoje, substrát, testování, keramika, skloepoxid.

Abstract

The bachelor thesis is focused on the diagnosis of printed circuit boards. The thesis describes the basic materials for the production of substrates, methods of production and interconnection structures of the PCB. The work includes research of methods for testing the quality of substrates and printed circuit boards. The experiment is focused on the performance of tests and evaluation of adhesion, current-carrying capacity and resistivity of selected substrates.

Key words

Printed circuit board, substrate, testing, ceramics, glass-epoxy.

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 6.6.2014

Martin Fridrichovský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hromadkovi, za velkou ochotu, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 SUBSTRÁTY PRO DPS.....	11
1.1 VLASTNOSTI SUBSTRÁTŮ	11
1.1.1 Elektrické vlastnosti	11
1.1.2 Tepelné vlastnosti.....	11
1.1.3 Mechanické vlastnosti	12
1.1.4 Chemické vlastnosti	12
1.2 DRUHY A POUŽITÍ SUBSTRÁTŮ	12
1.3 ORGANICKÉ SUBSTRÁTY	13
1.3.1 Epoxidové substráty	13
1.3.2 Fenolické substráty	14
1.3.3 Kompozitové substráty	14
1.3.4 Výkonové substráty	14
1.3.5 Ohebné substráty	15
1.3.6 3D substráty.....	16
1.4 KERAMICKÉ SUBSTRÁTY.....	16
1.4.1 Korundová keramika (Al_2O_3).....	16
1.4.2 Aluminium-nitridová keramika (AlN)	17
1.4.3 Beryliová keramika (BeO)	17
1.4.4 DBC substráty.....	18
1.5 KOVOVÉ SUBSTRÁTY	19
2 DRUHY PLOŠNÝCH SPOJŮ	20
2.1 JEDNOVRSTVÉ PLOŠNÉ SPOJE	20
2.1.1 Technologie sítotisku a leptání.....	20
2.1.2 Technologie fotoprocesu a leptání	20
2.2 DVOUVRSTVÉ PLOŠNÉ SPOJE.....	20
2.2.1 Aditivní technologie	21
2.2.2 Subtraktivní technologie	21
2.2.3 Semiaditivní technologie.....	21
2.2.4 Pokovení desky (Panel plating).....	21
2.2.5 Pokovení motivu (Pattern plating).....	22
2.3 VÍCEVRSTVÉ PLOŠNÉ SPOJE	22
2.3.1 Prepreg	23
2.4 NEROVINNÉ PLOŠNÉ SPOJE.....	23
2.5 PLOŠNÉ SPOJE PRO SMT	24
3 TESTOVÁNÍ KVALITY	24
3.1 METODY TESTOVÁNÍ SUBSTRÁTŮ	24
3.1.1 Pevnost v odtrhu	24
3.1.2 Pevnost v ohybu	26
3.1.3 Odolnost vůči oblouku	26
3.1.4 Izolační odpor.....	27
3.1.5 Teplotní šok.....	28
3.1.6 Proudová zatížitelnost.....	28
3.1.7 Zkoušky tvrdosti	29
3.1.8 Elektrická pevnost	31
3.2 METODY TESTOVÁNÍ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	31
3.2.1 Vnitroobvodové testování.....	31
3.2.2 Automatická rentgenová kontrola (AXI).....	31

3.2.3	<i>Laserová zkouška</i>	32
4	EXPERIMENT	33
4.1	TESTOVACÍ VZORKY	33
4.2	PEVNOST V ODTRHU	33
4.3	PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST	34
4.4	REZISTIVITA	36
	ZÁVĚR	38
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39

Seznam symbolů a zkratek

AXI	Automatic x-ray inspection (automatická rentgenová kontrola)
BGA.....	Ball grid array (pouzdra pro povrchovou montáž s kuličkovými vývody)
BT	Bismaleimide triazine
DBC	Direct bonded circuit (přímé spojování s mědí)
DPS	Deska plošného spoje
FR-4	Flame retardant (žáruvzdorný substrát)
HAL	Hot air leveling (technologie ošetření vrstvy mědi)
ICT.....	In circuit test (vnitroobvodový test)
PI.....	Polyimid
PTFE	Polytetrafluorethylene
ZM	Základní materiál

Úvod

Historicky první použitelné desky plošných spojů se objevily během druhé světové války ve Velké Británii. Se zvyšující se hustotou spojů a součástek byly jednovrstvé desky postupně nahrazovány oboustrannými a poté vícevrstevnými substráty. Roku 1961 byly poprvé použity pokovené otvory pro propojení obou stran substrátu. Dnešní trend vyžaduje výkonové substráty, které jsou schopné odolávat zvýšenému mechanickému namáhání a zároveň zvládat vysoké teploty při velkém proudovém namáhání.

Testování desek plošných spojů zajišťuje jakost a kvalitu funkce elektronických aplikací a je nedílnou součástí výrobního procesu DPS. Hlavním cílem této práce je uvést přehled zkušebních metod testování kvality základního materiálu, substrátů desek plošných spojů a praktické otestování substrátů se základním keramickým materiálem (Al_2O_3) a skloepoxidovým materiálem (FR-4), dle vybraných zkušebních metod. K dosažení tohoto cíle je v první kapitole vysvětlen pojem substrátu desky plošného spoje, uvedeny nejpoužívanější druhy a jejich základní vlastnosti. Následující kapitola je věnována plošným spojům a technologiím výroby plošného spoje. Hlavní kapitola je určena řešení zkušebních metod, ve které jsou uvedeny vybrané mechanické, elektrické a tepelné zkoušky základního materiálu a substrátu DPS. V praktické části je proveden experiment, při kterém byly různé typy substrátů vystaveny zkoušce v odtrhu plošného spoje, proudovému namáhání vodivého motivu a byla porovnána rezistivita měděné pasty keramického substrátu s tabulkovými hodnotami mědi.

1 Substráty pro DPS

Substrát plošného spoje se skládá z výztuže, dielektrika a vodiče. Základní materiál (ZM) jakožto nosič vodivého motivu slouží k montáži elektronických součástek, mechanických prvků, odvodu ztrátového tepla a určuje výsledné vlastnosti DPS. V praxi se používají ve formě pevné, ohebné a kombinované (např. organický substrát s kovovým výztužným jádrem), podle konečné funkce obvodu. [1], [2]

1.1 Vlastnosti substrátů

Pro správnou funkci plošného spoje musí substrát obsahovat kvalitní izolant pro zajištění odizolování vývodů součástek, odvodu tepla a udržení provozní teploty na součástkách i substrátu, vodivý obrazec pro rozvod elektrických signálů a musí být odolný vůči mechanickému, tepelnému a chemickému namáhání. [9]

1.1.1 Elektrické vlastnosti

Mezi hlavní elektrické vlastnosti bezesporu patří vnitřní a povrchová rezistivita. V některých aplikacích mohou jejich hodnoty dosahovat až $10^{15} \Omega$. Další významné vlastnosti dielektrika substrátů jsou relativní permitivita a tangenta ztrátového činitele. Tyto parametry hrají významnou roli převážně v aplikacích, které pracují s vysokou frekvencí. I přes trend nižších napětí musíme brát v potaz i elektrickou pevnost materiálu. Důležité vlastnosti vodivých struktur substrátů jsou vodivost (resp. měrný elektrický odpor), vzájemná indukčnost a kapacita motivů a odpor vodičů. [1], [4], [9]

1.1.2 Tepelné vlastnosti

Se zvyšující se integrací součástek u povrchové montáže jsou větší výkony navrženy na podstatně menší ploše. Spolehlivost a funkce součástek jsou ovlivněny provozní teplotou, a proto především u výkonových aplikací potřebujeme zajistit odvod tepla. Ten můžeme realizovat kombinací všech tří podob sdílení tepla (vedení, proudění a sálání). Vedení tepla se využívá u aplikací, kde nestačí proudění vzduchu. Odvod tepla sáláním se příliš nevyužívá kvůli nižším provozním teplotám elektroniky. [1]

1.1.3 Mechanické vlastnosti

Důležité mechanické vlastnosti substrátů desek plošných spojů jsou pevnost, stálost rozměrů, rovinnost, odolnost vůči výrobním a provozním prostředím a nehořlavost. U povrchové montáže, kde kontakt mezi součástkou a substrátem je velmi tenký, je důležitá vlastnost tepelná roztažnost neboli kompatibilita roztažností součástky a substrátu. Součástky mohou být na plošný spoj připájeny nebo lepeny. Největší pnutí je vyvinuto na pájku, která je měkčí než součástka a základní materiál. Mechanická pevnost se odvíjí od použité pájky (olovnatá, bezolovnatá), povrchové úpravy spoje a klimatických podmínek. Pájka je namáhána smykem, tahem a stříhem. Pnutí můžeme zmírnit například volbou materiálu substrátu s podobným koeficientem tepelné roztažnosti, jako má pájená součástka a volbou substrátu nebo spoje se schopností pojmout rozměrové difference. [8], [9]

1.1.4 Chemické vlastnosti

Během výroby a osazování součástek jsou používány rozpouštědla, tavidla, pomocné pájecí prostředky a další chemické látky, proti kterým musí být substrát odolný. U vodivého motivu je důležitá odolnost proti korozi.

1.2 Druhy a použití substrátů

I přes nespočet druhů materiálů a výrobních technologií se některé z nich staly ve svých aplikacích nepostradatelnými. Hlavními vlastnostmi pro jejich úspěch jsou cena a spolehlivost. Substrát se skládá nejčastěji z jednostranně nebo oboustranně plátovaného dielektrika vodivou fólií. Toto dielektrikum je tvořeno pojivem a výztuží. Pojivo zmírňuje působení vnějších vlivů na výztuž substrátu a chrání ji před mechanickým namáháním a účinky chemikálií. Pojivo se nejčastěji skládá z pryskyřičného základu například fenolická pryskyřice pro impregnaci papíru nebo epoxidová pryskyřice pro impregnaci papíru a skla. Jako výztuž se používá buničitý papír a skelná tkanina. Vodivý motiv fólie je tvořen z elektrolytické nebo tvářené mědi. Přehled složení základního materiálu viz *tab. 1*. [1], [2], [4]

1.3 Organické substráty

Organické substráty mohou být ohebné a neohebné. Jelikož podstatou organických materiálů jsou látky jako ropa (dříve „živé“ látky), tak pojivo ohebných substrátů se skládá z termoplastů, zatímco neohebné substráty využívají termosety. Neohebné organické substráty jsou dnes vyráběny z 90% z fenolické a epoxidové pryskyřice.

1.3.1 Epoxidové substráty

Epoxidové substráty se staly nejvíce využívaným základním materiálem pro dnešní elektrotechniku. Jejich nejznámější zástupce s označením FR-4 má mnohem lepší vlastnosti než fenolické substráty a je tedy i dražší. Výroba probíhá z etylenchlorhydrinu a bisfenolu A. Jako výztuž je zde použita skleněná tkanina nebo rohož. Substrát FR-4 se nadále vyvíjí a je i dnes využitelný pro současné potřeby například automobilového průmyslu [1]. [9]

Tab. 1 Přehled vlastností epoxidových substrátů [2]

Vlastnosti	FR-2	FR-3	FR-4	CEM-1
Povrchový izolační odpor [Ω]	$1 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$
Vnitřní izolační odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$2 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$
Relativní permitivita při 1 MHz [-]	4,7	4,9	4,7	4,7
Ztrátový činitel při 1 MHz [-]	0,047	0,041	0,019	0,031
Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]	105	110	150	130
Součinitel tep. roztažnosti [$\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$]	14-20	12-20	14-24	16-18
Cenový faktor FR-4=1	0,5	0,65	1	0,85

Při výrobě skloepoxidového dielektrika se skelná tkanina ponořuje do ponořovací nádoby a impregnuje. Poté se ve vertikální poloze suší a kalibruje ve válcových lisech na zadanou tloušťku. Po vytvrzení pryskyřice se list nazývá prepreg. List prepregu nesmí být lepkavý a musí být opět změkčitelný při laminaci. Během samotné výroby laminátu se na sebe naskládají prepregy a separační listy, vloží se do lisu a za zvýšené teploty a tlaku se vytvrdí. Díky obdélníkovému tvaru můžeme určit směr skelné tkaniny nebo papíru. Skloepoxidové substráty se vyznačují nižší navlhavostí, rozměrovou stálostí, dobrými elektrickými a mechanickými vlastnostmi. Mezi nevýhody patří horší obrobiteľnosť a delaminace. [1]

1.3.2 Fenolické substráty

Při výrobě se papír impregnuje v horizontální poloze a je bezkontaktně přidržován vzduchovým polštářem. Impregnovaný papír se poté lisuje za zvýšené teploty, vytvrzuje a plátuje měděnou fólií. Obsah pryskyřice fenolických laminátů je 35 %, 45 % a 58%. Mezi výhody fenolických substrátů patří nízká cena, elektrické vlastnosti. Nevýhodou je navlhavost a nízká odolnost proti elektrickému oblouku. [1], [5]

1.3.3 Kompozitové substráty

Základem kompozitových substrátů je papír a sklo. Nejpoužívanější kompozitní substrát je CEM-1. Základní materiál je tvořen z epoxidem impregnovaného celulóзовého papíru, který je z obou stran pokrytý skloepoxidovým prepregem. Vzhledem k nižší ceně, dobré obrobiteľnosti a stále rozměrové stabilitě může být CEM-1 u jednovrstvých aplikací upřednostněn před substrátem FR-4. Dále se můžeme setkat se substrátem CEM-3, který má jádro ze skelné rohože. [1]

1.3.4 Výkonové substráty

Substráty pro vyšší výkony definují dvě základní vlastnosti, vyšší provozní teplota a nízká relativní permitivita.

Polyimidový substrát

Tento substrát má nejvyšší hodnoty skelného přechodu 260 °C a výbornou chemickou odolnost. Jako výztuž je zde použita skleněná tkanina nebo aramidové vlákno. Díky své odolnosti vůči teplotě a spolehlivosti nalézá využití například v leteckých aplikacích. [1], [2]

BT-epoxidový substrát

BT-skloepoxidový laminát je alternativní substrát, který se svými vlastnostmi řadí mezi skloepoxid a sklopolyimid. Substrát je tvořen směsí pryskyřice z bismaleimid-triazinu a epoxidu. Tento substrát se využívá u spotřební elektrotechniky a pro testování čipů před montáží. [1], [9]

Kyanátesterový substrát

Kyanátesterový základní materiál má při vysokém podílu pryskyřice velmi nízkou relativní permitivitu a je vhodný pro velmi rychlé obvody se strmým průběhem signálu.

Tento materiál může být pro svou vysokou teplotní odolnost používán až do 230 °C. [2]

Polytetrafluoretylénový substrát

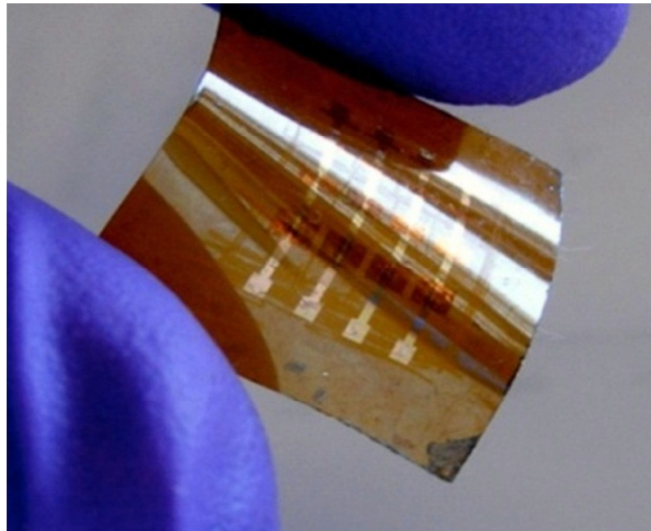
Polytetrafluoretylénový substrát má dielektrikum vyrobené z PTFE a ze skelné výztuže. Je používán pro své výborné elektrické vlastnosti ($\epsilon_r \approx 2,3$). Je typický pro mikrovlnné obvody a aplikace až do několika GHz. [1]

Tab. 2 Přehled vlastností výkonových substrátů [2]

Vlastnosti	Polyimid	PTFE
Povrchový izolační odpor, [Ω]	$5,5 \cdot 10^{15}$	10^{14}
Vnitřní izolační odpor, [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$5,4 \cdot 10^{14}$	10^{14}
Relativní permitivita při 1 MHz, [-]	3,5	2,3
Ztrátový činitel při 1 MHz, [-]	0,9	0,1
Teplota skelného přechodu, [$^{\circ}\text{C}$]	260	75
Koeficient lineární tep. roztažnosti, [$\text{m} \cdot \text{mK}^{-1}$]	$80 \cdot 10^{-8}$	$45 \cdot 10^{-8}$
Cenový faktor FR-4=1	6,7	>10

1.3.5 Ohebné substráty

Tento typ substrátů nemá výztuž, jejich pojivo je tvořeno z pryskyřic stejně jako u pevných substrátů a vodivý motiv může být naplátován jednostranně nebo oboustranně. Nejčastěji používaným materiálem pro ohebné substráty je poly-pyromellitic-imid (nazývaný Kapton) a polyester (nazývaný Mylar). Vyrábí se především v tloušťkách 25 a 50 μm a jejich lepení se provádí akryláty nebo epoxidy. I přes jejich horší rozměrovou stabilitu a obtížné pokovení otvorů je jejich využití v budoucnosti mnohem častější. [2], [9]



Obr. 1 Nanostruktura na ohebném substrátu Kapton [6]

1.3.6 3D substráty

Moderní trendy vyžadují nejrůznější tvary finálních výrobků, a tak se přizpůsobují i nosné substráty desek plošných spojů. 3D substrát můžeme vyrobit ohybem nevytvrzeného substrátu a poté ho vytvrdit, nebo podle formy a vstříkovacího lisu. Pro výrobu 3D substrátů se používají vysokoteplotní termoplasty nebo termosety upravené o plniva. Tyto substráty umožňují integrování pasivních součástek do objemu substrátu. Jejich využití se naskýtá u desek s nižší hustotou součástek a velkými komponenty. [1], [4]

1.4 Keramické substráty

Přírodní suroviny mají vysoké množství nečistot, kvalita substrátů je tedy závislá na úrovni čištění. Technologie výroby keramických substrátů jsou lití nebo válcování. Materiály na neorganické bázi se zpravidla používají ve spojení s technologií tlustých nebo tenkých vrstev a jsou ideální pro vývodové nebo bezvývodové nosiče čipů. Výhodou je, že tenkovrstvé nebo tlustovrstvé rezistory je možno připojovat přímo na podložku a zapuštěné kondenzátorové vrstvy, což vede k vyšší hustotě osazení a spolehlivosti. Opravitelnost takové podložky je však omezená. [1], [9]

1.4.1 Korundová keramika (Al_2O_3)

Nejčastěji využívaný keramický substrát je oxid hlinitý neboli alumina, jež se vyznačuje vlastnostmi, jako jsou výborná mechanická pevnost, vysoká odolnost proti korozi, nízká

tepelná vodivost (provozní teplota bez mechanického zatížení až 1500 °C) a relativní permitivita nepřekračuje hodnotu 12. Technologie výroby aluminy se dále vyvíjí a vyrábí se v několika stupních čistoty například 91%, 96%, 99,5% a 99,6% koncentrace Al₂O₃. [1], [9]

1.4.2 Aluminium-nitridová keramika (AlN)

Aluminium-nitridový substrát má velmi dobrou tepelnou vodivost 170 W.mK⁻¹, která je srovnatelná s kovy a nahrazuje toxickou beryliovou keramiku. Dále se vyznačuje mimořádně vysokou tvrdostí (srovnatelnou s diamantem), vysokým měrným odporem, dobrou chemickou odolností a vysokou teplotou tání 2 300 °C. Způsob opracování je velmi obtížný a tvar musí být určený již před výpalem. [9]

1.4.3 Beryliová keramika (BeO)

Další významný keramický substrát je z oxidu berylnatého, jež se vyznačuje při teplotách od 20 °C do 400 °C až 7x větší tepelnou vodivostí než má oxid hlinitý. Nevýhodou berylia je jeho vysoká toxicita v práškové formě, ale i přesto se v praxi vyskytují jeho modifikace. [1]

Hlavní výhody keramických substrátů jsou dobrá tepelná vodivost, nové technologie a přizpůsobení se roztažnosti keramických součástek. Mezi nevýhody patří velká relativní permitivita, mechanické namáhání a vysoká cena. [1], [9]

Tab. 3 Přehled vlastností keramických substrátů z oxidu hlinitého [1]

Vlastnosti	91 % Al ₂ O ₃	96 % Al ₂ O ₃	99,6 % Al ₂ O ₃
Hustota, [g.cm ⁻²]	3,72	3,75	3,85
Modul pružnosti, [kg.cm ⁻² ·10 ⁶]	3,16	3,09	3,8
Rezistivita při 25°C, [Ωcm]	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Relativní permitivita při 1 MHz, [-]	10,3	9,5	9,9
Ztrátový činitel při 1 MHz, [%]	0,5	0,04	0,01
Součinitel tep. Roztažnosti [ppm.K ⁻¹]	7,3	7,1	6,5
Tepelná vodivost při 20 °C, [W.mK ⁻¹]	13	26	35

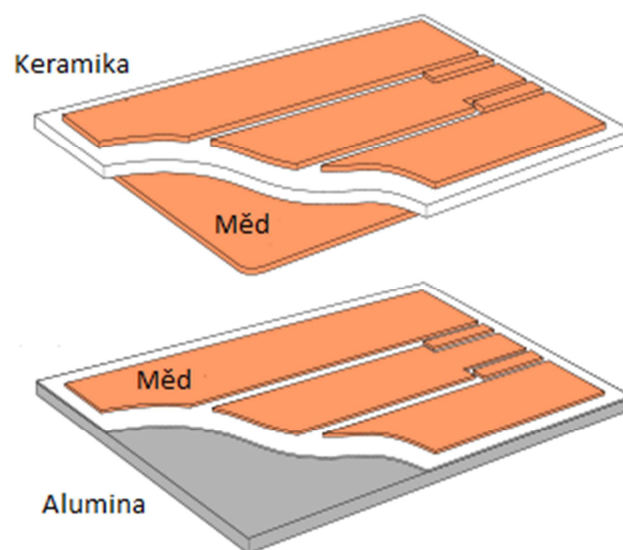
Keramické substráty se nejčastěji využívají k výrobě hybridních integrovaných obvodů a pro jejich výbornou tepelnou vodivost se jejich budoucnost spojuje s konstrukcí multičipových modulů. [5]

Tab. 4 Porovnání keramických substrátů [5]

Vlastnosti	AlN	99,5 % Al ₂ O ₃	99 % BeO
Tepelná vodivost, [W.mK ⁻¹]	170	37	250
Součinitel tep. Roztažnosti, [ppm.K ⁻¹]	4,5	6,6	5
Elektrická pevnost, [kV.mm ⁻¹]	12	9	14
Rezistivita, [Ω.mm]	> 10 ¹³	7·10 ¹³	10 ¹⁴
Ztrátový činitel při 100 MHz, [-]	7,20	0,08	0,04
Relativní permitivita při 100 MHz, [-]	9-10	10	6,6

1.4.4 DBC substráty

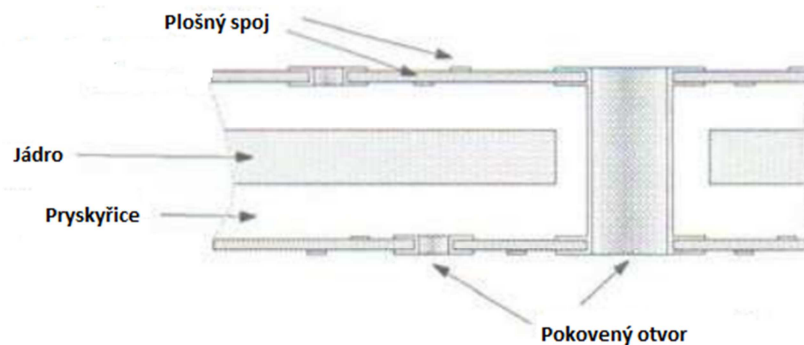
Substráty vyrobené technologií Direct bonded copper jsou běžně využívány pro aplikace výkonové elektrotechniky. Za posledních deset let byly pro výrobu výkonových substrátů přínosem hlavně díky vysoké proudové kapacitě vodičů, výborné tepelné vodivosti, vysokému koeficientu teplotní délkové roztažnosti a velmi vysokému izolačnímu odporu. Charakteristickým znakem DBC substrátu jsou tlusté vrstvy mědi o šířce (0,15 – 0,65) mm se silnou adhezí ke korundové keramice a AlN. Nízký koeficient roztažnosti substrátů umožňuje pájet větší plochy vodičů na měděný povrch, aniž by došlo k selhání spoje. Se zvyšujícími se nároky na teplotní a mechanické namáhání v automobilovém průmyslu je vyvíjen nový druh DBC substrátu, který má o 35% silnější vrstvu mědi, zatímco základní keramický materiál je užší o 20%, například vrstva mědi o tloušťce 0,4 mm je bondována na 0,32 mm keramice. Je tedy snaha o výrobu výkonných substrátů s malou hmotností, které jsou spolehlivé při vysokých teplotách a mechanickém namáhání. [3], [17], [18]



Obr. 2 Ukázky struktur DBC substrátů [18]

1.5 Kovové substráty

Substráty skládající se z dielektrikem povrchově ovrstveného kovového jádra nebo kovové sítě. Jako základní materiál je možné použít měď nebo hliník. Hliník je výhodný kvůli malé hmotnosti, chemické odolnosti a nízké ceně. Měď se používá pro vysokou hodnotu elektrické vodivosti a odolnosti proti korozi. Kovové substráty mají výhodné tepelné vlastnosti a pro neomezené rozměry a cenu smaltované oceli mohou být kovové substráty použity místo keramických substrátů ve výkonových aplikacích. Dielektrikum se na jádro nanese máčením, postříkem nebo elektroforeticky a poté se během několika minut vypálí při teplotě 900 °C. Nebo může být na jádro přilepen organický substrát (skloepoxid, sklopolyimid), nejlépe z obou stran pro omezení prohýbání substrátu vlivem změn teplot. [1], [9]



Obr. 3 Ukázka substrátu s elektricky izolovaným jádrem [9]

2 Druhy plošných spojů

Pojem plošný spoj je v elektrotechnice používán pro mechanické upevnění a zároveň pro vodivé spojení elektronických součástek. Z hlediska historie můžeme plošné spoje rozdělit na jednovrstvé, oboustranné, vícevrstvé plošné spoje a struktury s jádrem.

2.1 Jednovrstvé plošné spoje

Jednovrstvé plošné spoje jsou nejjednodušší formou plošného spoje. Pro vytvoření vodivých motivů se nejčastěji využívá sítotisk nebo fotoprocés. Mají pouze jednu vrstvu propojovacích vodičů a není zde zapotřebí pokovených otvorů. Jednovrstvé plošné spoje se osazují klasickými vývodovými součástkami nebo technologií SMT. [1]

2.1.1 Technologie sítotisku a leptání

Jedná se o techniku tvorby obrazců a jejich následného přenosu na substrát. Materiál se nastříhá na přířezy, které jsou větší než výsledná deska alespoň o 1 centimetr a jsou do nich vyvrtány technologické otvory pro uchycení desek ve výrobních a kontrolních aplikacích. Poté je deska důkladně chemicky i mechanicky očištěna od prachu, mastnot a úlomků. V dalším kroku je deska vysušena a metodou sítotisku nanese leptuodolný rezist, který nám určí tvar výsledného vodivého motivu. Po vytvrzení rezistu následuje odleptání mědi, která nebyla ochráněna leptuodolným rezistem. Před mechanickým opracováním se z vodivých motivů smyje leptuodolný rezist a deska se opláchne a vysuší. [1]

2.1.2 Technologie fotoprocésu a leptání

Zde se povrch desky ovrství fotocitlivým lakem – fotorezistem a skrz filmovou matici se na desku vystaví obrazec vodivého motivu a následně se vyvolá. Další procesy jsou stejné jako u sítotisku, leptání, odstranění fotorezistu, umytí a vysušení. [5]

2.2 Dvouvrstvé plošné spoje

U těchto plošných spojů je kladen důraz na elektrické spojení mezi oběma stranami substrátu, mechanické vlastnosti (pro opětovné vložení vývodů součástek) a cenu. Nejčastěji

se k propojení obou stran využívá pokovených otvorů a samotné desky jsou vyráběny aditivními nebo subtraktivními metodami a jejich kombinací. U plátovaných substrátů jsou dvě základní metody - pokovení obrazce (Pattern Plating) a pokovení desky (Panel Plating). [1], [5]

2.2.1 Aditivní technologie

Podstatou aditivních technologií je přidávání vrstvy materiálu k základnímu materiálu. Zástupci aditivních technologií jsou například sítotisk, postřik, pokovení, máčení, lepení a vakuové technologie. U plošných spojů s pokovenými otvory se při aditivní technologii vyvrtají součástkové otvory a nanese se měď pouze na vodivé cesty a stěny vyvrtaných otvorů. [1]

2.2.2 Subtraktivní technologie

Subtraktivní procesy jsou založeny na odebírání materiálu ze substrátů, jako je např. suché a mokré leptání, opracování laserem nebo mechanické procesy založené na broušení a frézování. [1]

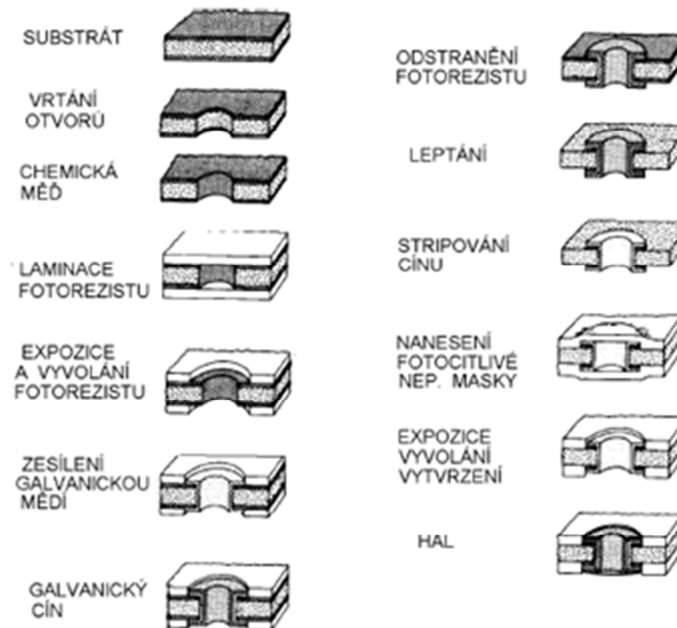
2.2.3 Semiaditivní technologie

Semiaditivní technologie jsou kombinací aditivních a subtraktivních procesů, jejich princip spočívá v pokovení vyvrtaných otvorů i celého povrchu desky mědí a následném vyleptání vodivého motivu za použití leptuodolné masky. Semiaditivní metodou lze vyrábět jednostranné, dvoustranné i vícevrstvé desky plošných spojů. [1], [4]

2.2.4 Pokovení desky (Panel plating)

Po vyvrtání otvorů je oboustranně plátovaný materiál bezproudově pokoven mědí a až poté je substrát s vodivým motivem a otvory elektrolyticky pokoven mědí. Poté je nanesen fotorezist a deska je osvětlena ultrafialovým zářením. Na řadu přichází druhé pokovení cínem nebo SnPb, jehož vrstva působí jako rezist vůči leptadlu. Výhodou je, že nedochází ke kontaminaci rezistu (Sn nebo SnPb) díky pokovení mědí a tloušťka rezistu je vyrovnaná. Na závěr metodou HAL (hot air leveling) ošetříme vrstvy mědi proti oxidaci.

Hlavní nevýhodou této technologie je nutnost odleptání velkého množství mědi a tedy i vysoká spotřeba leptadla. [1], [5]



Obr. 4 Postup technologie panel plating [2]

2.2.5 Pokovení motivu (Pattern plating)

Po nanesení, expozici a vyvolání fotorezistu dojde k elektrolytickému pokovení mědi a vodivý motiv je pokryt rezistem. Poté dojde k odstranění fotorezistu a odleptání odkryté mědi. Metoda je výhodná díky nižší časové náročnosti, nižším nákladům na leptadla a měď a nedochází ve vysoké míře k podleptání vodivých motivů. [1], [5]

2.3 Vícevrstvé plošné spoje

Dnešní vícevrstvé spoje mají nejméně čtyři vrstvy (dvě vnitřní) a výjimkou nejsou až dvacetičtyřvrstvé spoje o tloušťce 0,8 a 1,0 mm. Tloušťka substrátů se odvíjí od účelu aplikace a můžeme se tedy setkat i s většími tloušťkami a změnou motivů vodivých obrazců, frekvencí můžeme řídit impedanci mezi částmi obvodů. Technologie Mikrovia umožňuje výrobu pokovených otvorů o průměru $<150 \mu\text{m}$, které mohou být slepé, skryté nebo průběžné. [1]

2.3.1 Prepreg

Prepreg neboli lepící list je pomocí pryskyřice impregnovaná skelná tkanina, která se neúplně polymerizuje, aby po zahřátí změkla a opět se dala vytvrdit. Tloušťka lepícího listu by měla být alespoň dvojnásobek tloušťky měděné fólie. Tloušťky fólií se odvíjejí od použití ve vnějších nebo vnitřních vrstvách. Všechny vrstvy vícevrstvého spoje musí být orientovány ve směru osnovy výztuže skelné tkaniny. [1]

2.4 Nerovinné plošné spoje

Řešením zvyšující se integrace součástek mohou být nerovinné spoje ohýbané do různých tvarů. Substráty jsou jednostranně nebo oboustranně měděnou fólií plátované tepelně odolné filmy, které mohou být využívány i pro vícevrstvé plošné spoje, ale se zvyšujícím se počtem vrstev klesá ohebnost spoje. Tloušťka filmu může být i méně než 0,1 mm, a tak jsou ohebné spoje nejtenčí propojovací technologií. Jejich malé rozměry a nízká hmotnost najdou uplatnění v aplikacích, které jsou pohyblivé a náročné na prostor jako například u kloubů zobrazovacích displejů nebo v obvodech diskových jednotek, kde vyniknou dobré tepelné a mechanické vlastnosti. [1], [7]

Ohebné spoje jsou velmi vhodné pro povrchovou montáž SMT, jelikož ohebný spoj výborně absorbuje termomechanické pnutí během připevňování součástky a tím je výrazně snížena možnost poruchy spoje. Nevýhodou ohebných spojů je obtížná opravitelnost, malá rozměrová stabilita a u některých materiálů i vysoká cena. [1], [7]

Tab. 5 Vlastnosti ohebných substrátů [1]

Vlastnosti	Polyester	PI (Krašten)	PI (U-pilex)	Skloepoxid
Rel. permitivita při 1MHz, [-]	3	3,4	3,5	4,5 až 5,3
Ztrátový činitel při 1 MHz, [-]	0,02	0,01	0,0013	0,01 až 0,02
Rozsah teplot, [°C]	-60 až +105	-200 až +300	-200 až +300	-55 až +150
Pevnost v tahu, [kPa·10 ³]	138 až 241	172	393	241 až 689
Pružnost	výborná	výborná	výborná	malá
Nasákavost	malá	vysoká	střední	malá
Cena	nízká	vysoká	vysoká	střední

2.5 Plošné spoje pro SMT

Koncem šedesátých let firma Philips použila první součástky s bezdrátovými vývody. Vývody elektronických součástek se pájí přímo na povrch plošného spoje, pájení se provádí pouze na vnější stranu desky. Součástky pro povrchovou montáž jsou označovány jako SMD. SMT technologie se v současnosti používá v téměř každém sériově vyráběném elektronickém přístroji.

3 Testování kvality

I přes minimální chybovost výroby plošných spojů u profesionálních výrobců, hlavně díky kvalitním novým moderním technologiím, je nutné zajistit stoprocentní funkčnost a kvalitu výrobků. A proto jsou zkušební metody stále nedílnou součástí výroby plošných spojů. Během testování desek plošných spojů můžeme využít několika zkušebních metod, podle toho, jakou část desky plošného spoje potřebujeme otestovat a jakým způsobem. V praxi tedy můžeme testovat konečnou funkci celé aplikace (funkční test), samotný substrát, vnitřní obvodovou funkci součástek a obvodů nebo pájený spoj. Dále můžeme zkušební metody rozdělit na vizuální a optické, laserové, rentgenové a akustické.

3.1 Metody testování substrátů

Tyto zkušební metody jsou zaměřeny na neosazené substráty DPS. Jejich hlavním cílem je otestovat základní mechanické, elektrické, optické a klimatické vlastnosti.

Normou, která stanovuje v České Republice požadavky na testování substrátů desek plošných spojů, je norma ČSN EN 61189 2 - Zkušební metody pro elektrotechnické materiály, propojovací struktury a sestavy.

3.1.1 Pevnost v odtrhu

Zkouška, při které se testuje velikost kolmé síly na vzorek, potřebné k odtržení spoje od základního materiálu. Tento test se provádí na neosazené desce tak, jak byla vyrobena a bez jakéhokoliv vystavení klimatickým jevům. Testované vzorky mohou mít jakýkoliv vhodný

rozměr a vodivý motiv může být zhotoven jakoukoliv běžnou metodou. Pro vyztužení mohou být vzorky přilepeny k neohebnému materiálu. [11]

Pro zkoušku je zapotřebí si připravit alespoň deset vzorků a ve středu plošek (vodivého motivu) vyvrtat otvory o průměru $\approx 1,3$ mm. Na plošku nanese minimální množství pájky a poté se kolmo připájí kousek neizolovaného měděného drátu, který byl smáčen pájkou. Nato se vzorky uchytí do držáku a nechají se nejméně 10 minut zchladnout na pokojovou teplotu. Dále se vzorky upevní do kleští trhacího přístroje a na příslušenství zařízení pro tahové zkoušky (například počítač) je nastavena rychlost posuvu upínací hlavy 50 mm/min. Veličinou určující pevnost v odtrhu je zaznamenaná minimální síla, potřebná k odtržení drátu, nebo plošky od základního materiálu. Test je považován za neplatný v případě přetržení drátu, nebo pokud se drát vytrhne z pájeného spoje. [11]



Obr. 5 Ukázka trhacího přístroje [10]

3.1.2 Pevnost v ohybu

Cílem této zkušební metody je určit pevnost v ohybu neohebných substrátů při využití tří bodové zatěžkávací zkoušky. Pro samotný test je nutné leptáním úplně odstranit kov z kovem plátovaného substrátu a jeho tloušťka musí být nejméně 0,80 mm. Vzorky je nutné zkontrolovat, aby neobsahovaly praskliny nebo delaminaci. Rozměry vzorků jsou uvedeny v *tab. 6*.

Tab. 6 Požadavky na zkušební vzorky [11]

Rozměry vzorků			Zkušební parametry	
Tloušťka H mm	Šířka W mm	Délka L mm	Rozpětí Lv mm	Rychlost posuvu N mm/min
$0,8 < H \leq 3$	25,0	alespoň 20H	16H	H/2
$3 < H \leq 5$	10,0			
$5 < H \leq 10$	5,0			

Opět je zapotřebí deseti vzorků, přičemž pět jich bude namáháno v podélném a pět v příčném směru. Zkušební zařízení se nastaví na požadované napětí a konstantní rychlost posuvu křížové hlavy viz *tab. 5*. Poté se nastaví osy válcových podpěr vůči sobě rovnoběžně a zatěžovací část se umístí doprostřed mezi podpěry. Test je ukončen prasknutím vzorku a zaznamenáním použité síly P v newtonech. Výpočet meze pevnosti v MPa: [11]

$$\sigma_{fb} = \frac{3PLv}{2WH^2} \quad (3.1)$$

3.1.3 Odolnost vůči oblouku

Je to metoda, která za působení vysokonapěťového nízkoproudového oblouku nad povrchem základního materiálu, vyhodnocuje schopnost základního materiálu odolat plazivému výboji. Tloušťka zkušebních vzorků musí být mezi 1,6 – 3,2 mm, pokud je nižší, může být základní materiál navrstven. Pro test stačí tři vzorky o rozměrech (50 ± 5) mm x (50 ± 5) mm x tloušťka, které jsou odleptány a pečlivě očištěny.

Před zahájení samotného testování se vzorky vloží na 48 hodin do nádržky deionizované vody, která je zahřata na 48 °C. Pro udržení vlhkosti a dosažení teploty okolí jsou vzorky poté umístěny na 30 až 240 minut do nádržky vody o pokojové teplotě. Vzorky se vyjmou, vysuší a vloží se do kleští pod soustavu elektrod z wolframové oceli. Po uzavření komory je povrch

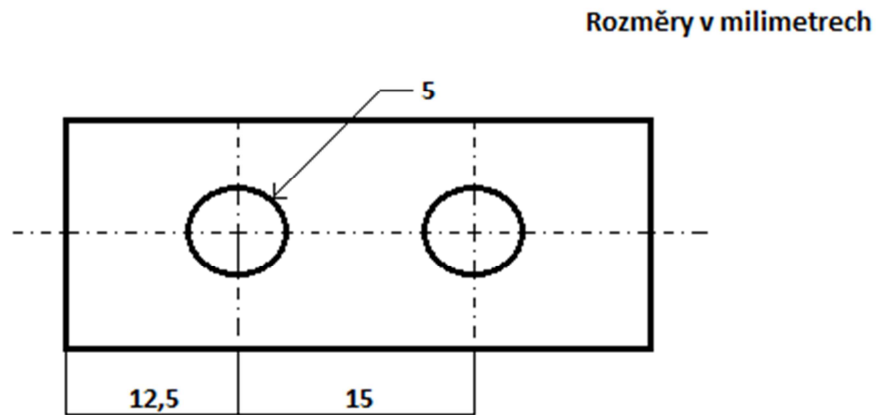
vzorků namáhán za působení střídavého napětí 12 500 V. Pokud během zkoušky zmizí oblouk a objeví se plazivý výboj, je zkouška přerušena a zaznamená se doba trvání. Obsluha očistí elektrody a zkontroluje vzdálenost elektrod od vzorku. Z průběžně zaznamenávaných hodnot odolnosti vůči oblouku se určí průměr. Vzhledem k faktu, že proud menší než 10 mA má sklon ke třepetajícímu se oblouku je ze začátku zkoušky použit přerušovaný oblouk. [11]

Tab. 7 Zkouška odolnosti vůči oblouku [11]

Doba trvání [s]	Doba zapnutí/vypnutí [s]	Proud [mA]
0 až 60	0,25/1,75	10
60 až 120	0,25/0,75	10
120 až 180	0,25/0,25	10
> 180	trvale zapnuto	10

3.1.4 Izolační odpor

Další metodou je zkouška izolačního odporu základního materiálu DPS, jejíž součástí je stanovení objemového i povrchového odporu kovem plátovaného základního materiálu. K testu jsou zapotřebí opět tři vzorky zbavené kovové vrstvy a do každého vzorku jsou vyvrtány dva otvory o průměru 5 mm. Ke změření rozměrů vzorků musí být použit ruční mikrometr s rozlišením 0,0025 mm nebo lepší. Vzorky se nechají (96 až 98) hodin aklimatizovat při teplotě (20 až 25) °C a vlhkosti vzduchu (65 ± 5) %. Hlavní součástí měřicí soustavy je zkoušečka průrazu vysokým napětím, jejíž mezní proud dosahuje 5 A a má v celém napěťovém rozsahu motorizované napětí, které umožňuje navyšovat napětí s rychlostí 500 V/s běžně až do 50 kV. Měření izolačního odporu se provádí při teplotě (25 ± 10) °C nejpozději do 35 minut od aklimatizace zkušebních vzorků. Pro změření izolačního odporu musí být použito zařízení s přesností ±5 % ve zkoušeném rozsahu. Aby nedocházelo k elektrickému průrazu v oleji, jsou konce elektrod kulaté. Test izolačního odporu je zahájen přiložením elektrodových kolíků do vyvrtaných otvorů ve vzorku a po dobu jedné minuty je vzorek vystaven stejnosměrnému napětí 500 V. [11]



Obr. 6 Zkušební vzorek pro zkoušku izolačního odporu [11]

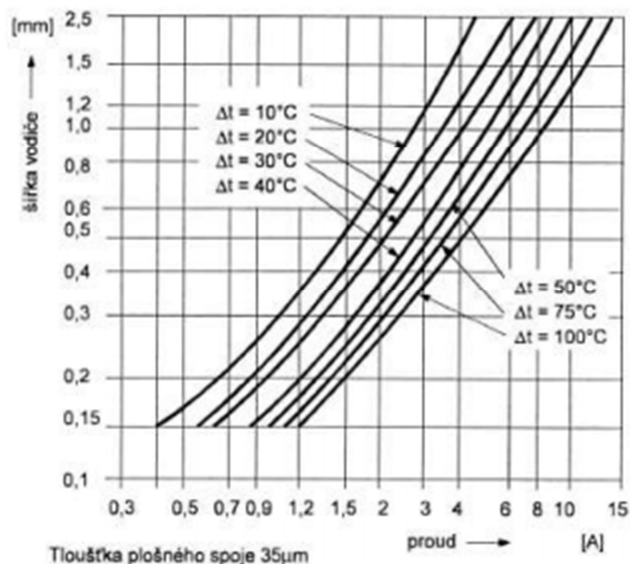
3.1.5 Teplotní šok

Většina teplotních zkoušek je provedena buď ohřevem, nebo zchlazením, ačkoliv při některých zkouškách může být materiál vystaven oběma typům zkoušek. Při zkoušce tepelným rázem je cílem stanovit schopnost substrátu s pokovenými otvory odolávat tepelnému rázu po ponoru do olejové lázně ohřáté na 260 °C. Podobná zkušební metoda je určena k simulaci montážních procesů, pájení vlnou nebo tažením, kdy je testována celistvost struktury substrátu po expozici jedné strany desky v jednom kilogramu roztavené pájky (Sn60, Sn62) o teplotě 260 °C. Následující uvedené zkoušky jsou využívány pro výkonové keramické substráty, které mohou mít praskliny nebo jiné nedokonalosti vzniklé při výpalu nebo vlivem teplotního a mechanického namáhání. Z používaných metod lze uvést ozáření infračerveným paprskem, kdy se zahřeje substrát a prasklina je ozářena infračerveným paprskem, načež se sleduje odolnost materiálu proti rozpínavosti trhliny. Zástupcem opačné metody je zkouška ochlazení keramického substrátu proudem vody z 350 °C na 20 °C, po kterém se začnou na substrátu tvořit praskliny. Tvorba prasklin je zaznamenávána akustickými sensory. [11], [16]

3.1.6 Proudová zatížitelnost

Vodič substrátu je připojen k proudovému zdroji a je proudově namáhán při konstantním napětí. Celý proces je sledován termokamerou a průběžně se zaznamenávají změny teplot na vodiči. Plošný vodič má až 5x větší proudovou zatížitelnost z důvodu lepšího odvodu tepla přes základní materiál než měděný drát o stejném průřezu. Nejčastěji je testován měděný vodič o tloušťce 35 μm až 70 μm pro konstrukce s velkým proudovým zatížením a odolností

proti otřesům. Důležitým parametrem při testování hraje šířka vodiče, která zásadně ovlivňuje maximální proud. Teplota dlouhodobě nesmí překročit teplotu skelného přechodu nebo během testu může dojít k rozžhavení, destrukci vodiče a napájecích kontaktů. [9]



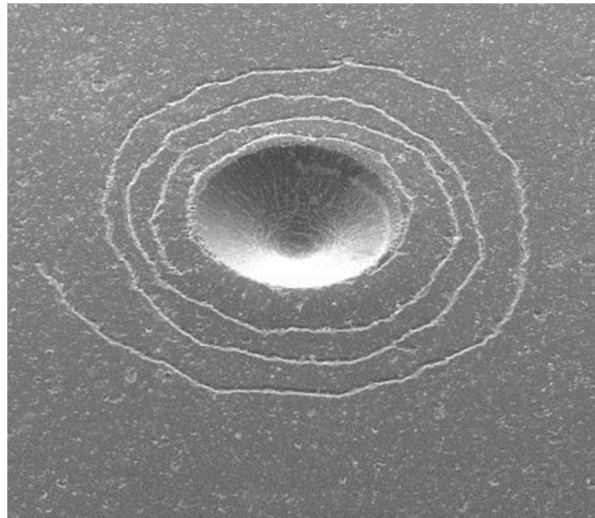
Obr. 7 Proudová zatížitelnost měděné fólie pro tloušťku 35µm [9]

Tab. 8 Zatížitelnost plošného spoje o tloušťce 35µm [9]

Šířka plošného spoje [mm]	Mezní proud [A]	Dovolený proud [A]
1,0	5	0,8
1,5	10	1,2
2,0	12	1,6
3,0	15	2,4
6,0	23	4,8

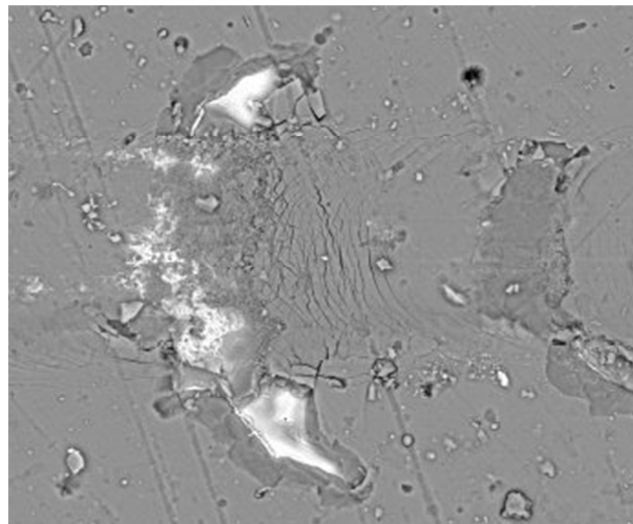
3.1.7 Zkoušky tvrdosti

Cílem je stanovit odolnost povrchu materiálu proti lokálnímu vniknutí cizího tělesa a kvalitu spojení vodivého motivu se základním materiálem. Zkoušky jsou rozděleny na statické, dynamické a vrypové. Statické zkoušky neboli „zkoušky vnikací“ jsou založeny na vtlačování indentoru klidnou silou pod pravým úhlem na povrch substrátu. Poté je hodnocena odolnost proti vniknutí dle hloubky vtisku ve vodivé vrstvě a základním materiálu a charakter vzniklých trhlinek. Vnikací zkoušky jsou rozděleny podle tvaru, materiálu a velikosti použitého indentoru nejčastěji na Vickersovu, Brinellovu a Rockwellovu. [12]



Obr. 8 Porušený povrch substrátu po vnikací zkoušce [12]

Dynamické zkoušky jsou rázového charakteru a jsou založené na změření hloubky vniku (Baumanovo kladívko, Kladívko Poldi) nebo velikosti odrazu indentoru (Shoreho skleroskop). U vrypových zkoušek (scratch test) je vyžadována maximální drsnost povrchu $0,25 \mu\text{m}$ pro použití diamantového kužele, který je zatížen proměnlivou silou a pohybuje se po povrchu substrátu. Následně se optickým mikroskopem hodnotí a porovnává hloubka vniku. Pokud dojde k odtržení vodivé vrstvy od substrátu, jedná se o adhezi, zatímco při poruše uvnitř vrstvy mluvíme o kohezi. [12]



Obr. 9 Odhalený povrch substrátu po vrypové zkoušce [12]

3.1.8 Elektrická pevnost

Tato zkouška je určena ke stanovení maximální intenzity elektrického pole, při které nedojde k dielektrickému průrazu základního materiálu. Stejně jako u předchozích zkoušek musí být vzorky odleptány a důkladně očištěny. Pro vyvarování se dielektrickému průrazu jsou k vyvrtání otvorů použity vysokorychlostní vrtáky, a do nich se poté vloží kulové elektrody. Zkouší se dva vzorky uříznuté ve směru osnovy a dva napříč vyztužením. Zkouška může být provedena buď za střídavého, nebo stejnosměrného napětí (v rozsahu od 0 do 50 kV s rychlostí nárůstu 1 kV/s) po vložení vzorků do olejové nádrže. Výsledkem měření je zaznamenaná dielektrická pevnost a tloušťka vzorku. [11]

3.2 Metody testování desek plošných spojů

V této kapitole jsou uvedeny vybrané testovací metody pro osazené desky plošných spojů, které testují ať už jednotlivé součástky, spoje nebo konečnou funkci obvodu.

3.2.1 Vnitroobvodové testování

Vnitroobvodové testování, neboli ICT=in-circuit test je nepostradatelný nástroj pro testování DPS. Za použití jehlového pole, které je umístěno ve vrstveném materiálu (Sklotextit G10) ze skelné tkaniny a epoxirezolové pryskyřice, je možné získat přístup k obvodovým uzlům a změřit výkon součástek bez ohledu na další k nim připojené části obvodu. Parametry jako rezistance, kapacitance a další jsou měřeny spolu s fyzickou kontrolou součástek a jejich nastavením. Hlavní nevýhodou vnitroobvodového testování je program, který musí být napsán pro každý typ desky zvlášť a cena provedení upnutí jehlového pole. Výhodou je rychlost testování, vysoké procento zjištěných poruch a jednoduché předání výsledků obsluze. ICT zkouška představuje velmi rozsáhlý test desek plošných spojů a zajišťuje správnou funkci obvodu dle specifikací. [13]

3.2.2 Automatická rentgenová kontrola (AXI)

Se zvyšující integrací plošných spojů a použitím nových osazovacích technologií, ne všechny pájené spoje mohou být zkontrolovány opticky. Je velmi důležité zkontrolovat pájené spoje i na pouzdrech například BGA (kuličkové kontakty) a jedna z možností kontroly je automatická rentgenová kontrola, která dokáže zkontrolovat spoj i pod čipem. Tato zkouška je finančně náročná a je používána pouze u malé části výroby, kde je nezbytná. [13]



Obr. 10 Rentgen pro testování BGA pouzder s možností plné AXI [15]

3.2.3 Laserová zkouška

Test pro kontrolu kvality pájeného spoje. Laserové záření je koherentní, monochromatické a polarizované elektromagnetické vlnění z viditelné části spektra. Paprsky laserového záření mají minimální rozptyl a je možné je zaostřit na velmi malou plochu. Programem řízená laserová dioda vyzařuje v krátkých intervalech impulzy záření a zahřívá pájený spoj. Průběh absorbování tepla pájeným spojem je zaznamenáván infračerveným senzorem a následně je vyhodnocena tepelná kapacita pájeného spoje. [14]

4 Experiment

V praktické části bakalářské práce byly provedeny tři vybrané zkušební metody na substrátech se základním keramickým (Al_2O_3) materiálem a skloepoxidovým materiálem (FR-4). Jako první byla provedena zkouška v odtrhu vodivých obrazců, které byly vytvořeny na keramických substrátech pomocí dvou rozdílných měděných past. V další části byly skloepoxidové substráty a keramické substráty s pastou č. 2 podrobeny proudové zatížitelnosti a při poslední zkoušce byl změřen odpor vodivé dráhy motivu na keramickém substrátu s pastou č. 2.

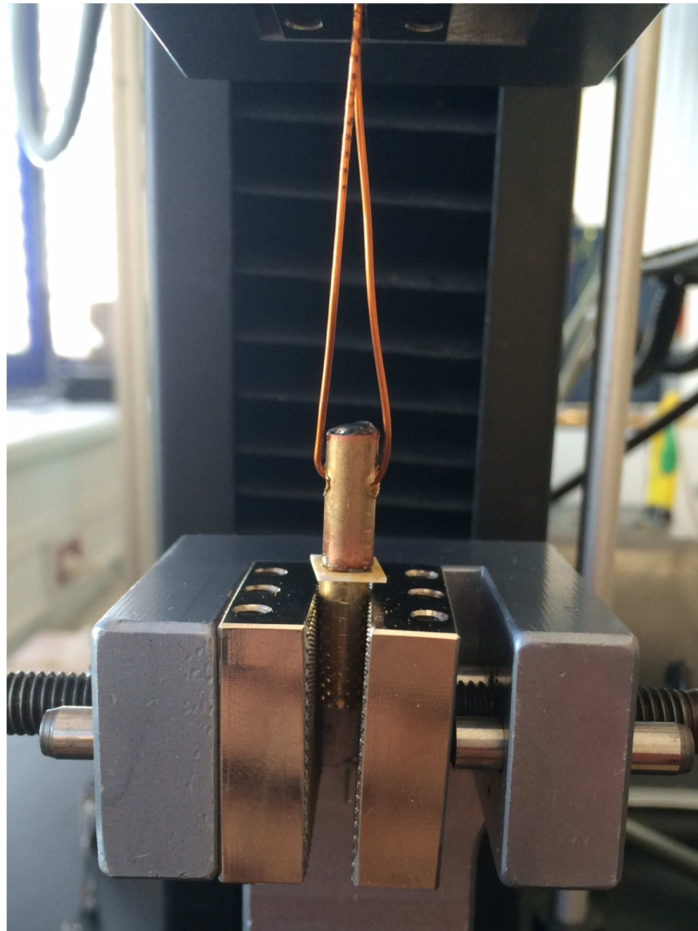
4.1 Testovací vzorky

Testované vzorky byly z klasického plátovaného materiálu FR-4 a z keramiky, na kterou byly síťotiskem nanесeny dva druhy měděných past od firmy Heraeus. Během nanášení pasty byla nastavena rychlost tisku 50 mm/s, tlak na těrku 30 N/cm². Tisk probíhal pod úhlem 45°. U těchto nových past je možné postupně natisknout a vysušit až pět vrstev, které se poté najednou vypálí jako celek. Vrstvy jsou sušeny při teplotě 140 °C až 160 °C. Pro testování byly zhotoveny vzorky s dvěma natištěnými vrstvami mědi. Potištěné substráty byly vypáleny při 900 - 950 °C v dusíkaté atmosféře s maximální koncentrací kyslíku v řádu desítek ppm. Nízká koncentrace kyslíku zabrání nežádoucí oxidaci měděné vrstvy.

4.2 Pevnost v odtrhu

Cílem tohoto testu bylo porovnat adhezi keramických substrátů a materiálu FR-4. Na vodivý motiv byl připájen kovový váleček s vyvrtaným otvorem pro provlečení drátu. Z druhé strany substrátu byl gelovým lepidlem přilepen druhý váleček, za který byl substrát uchycen do svorek trhacího přístroje Labor Tech. Rychlost posuvu upínací hlavy byla nastavena dle normy (ČSN EN 61189 2) 50 mm/s. Zobrazení uchycení vzorku v trhacím přístroji je uvedeno na obr. 9.

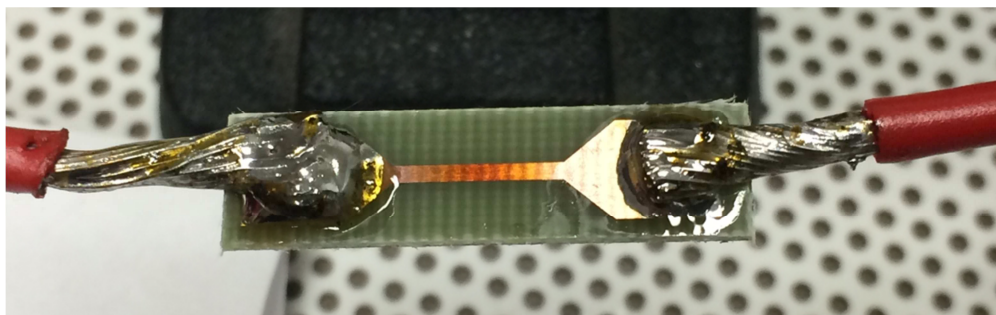
Plošný spoj na keramickém substrátu, se starším typem pasty č. 1, se odtrhl již při síle 1,84 N/mm², zatímco substrát FR-4 i keramický substrát s pastou č. 2 vydrželi vždy alespoň 20 N/mm², než došlo k odtržení vodivé vrstvy. Z důvodu špatné adheze pasty č. 1 nebyla tato pasta již v dalších testech používána. Tloušťka měděných vrstev byla změřena cca 36,704 μm.



Obr. 11 Vzorek upevněný ve svorkách trhacího přístroje Labor Tech

4.3 Proudová zatížitelnost

Tato vlastnost je důležitá pro konstrukci obrazce plošných spojů. Proudová zatížitelnost byla změřena u keramického substrátu s pastou č. 2 a poté stejným postupem skloepoxidový substrát FR-4.



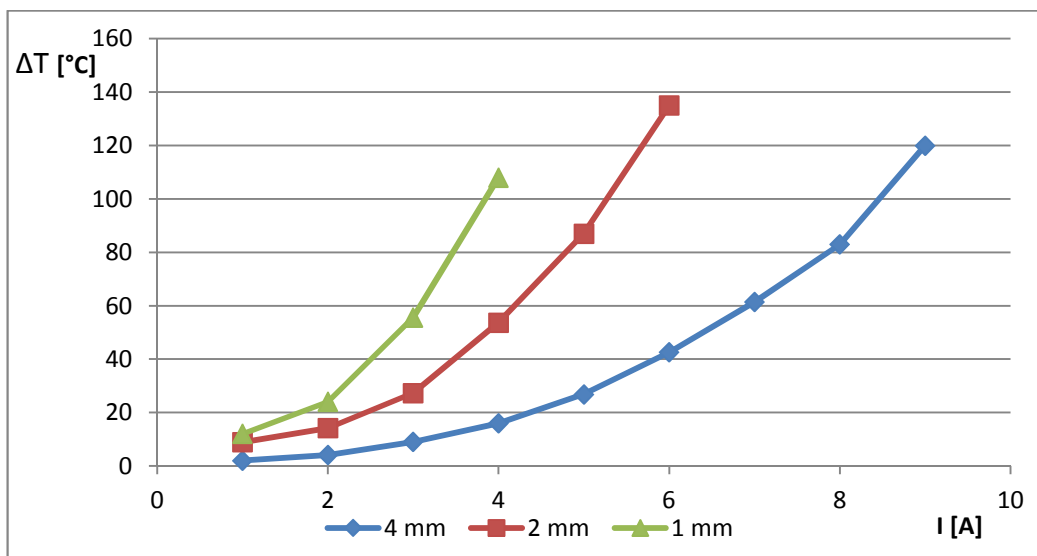
Obr. 12 Proudově namáhaný substrát FR-4

Ke zkoušce byl použit zdroj DELTA ELECTRONIC SM18-220 s maximálním proudem 220 A a maximálním napětím 22 V. Na zdroji byl postupně v 3 minutových intervalech

navyšován proud a termokamerou byla měřena teplota na substrátu. Od naměřených teplotních údajů byla odečtena laboratorní teplota 22 °C. Vzorčky připravené pro proudovou zatížitelnost měli shodné rozměry vodivého motivu i substrátu. Délka vodivého kanálu byla 10 mm o třech různých šířkách 1, 2 a 4 mm. Tloušťka měděných vrstev byla 36,704 μm.

Tab. 9 Keramický substrát - ΔT °C

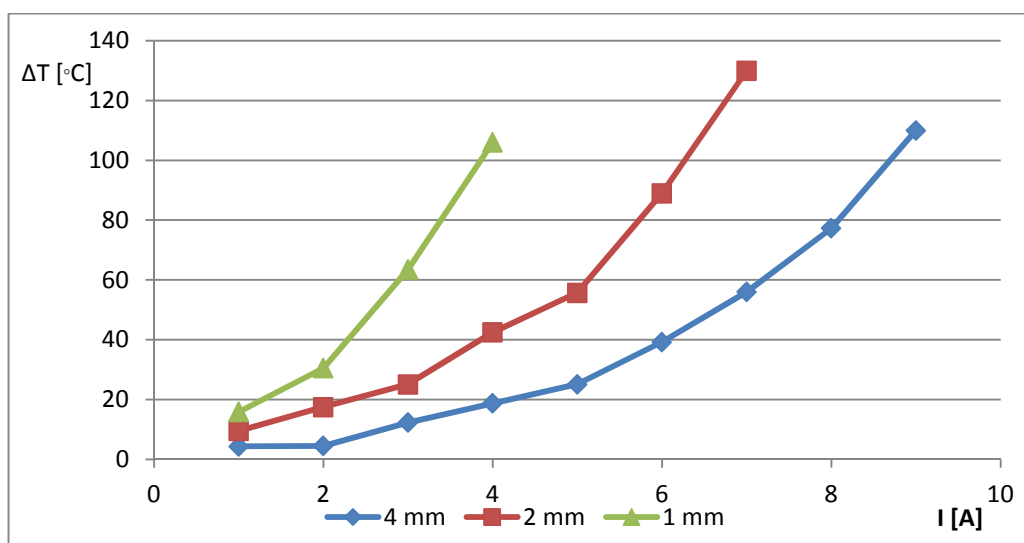
Šířka vodiče	5 A	7 A	10 A	13 A	16 A	19 A	22 A	25 A	28 A
4 mm	2	4,1	9	16	26,8	42,6	61,4	83	120
2 mm	8,9	14,2	27,3	53,7	87	135			
1 mm	12	24	55,6	108					



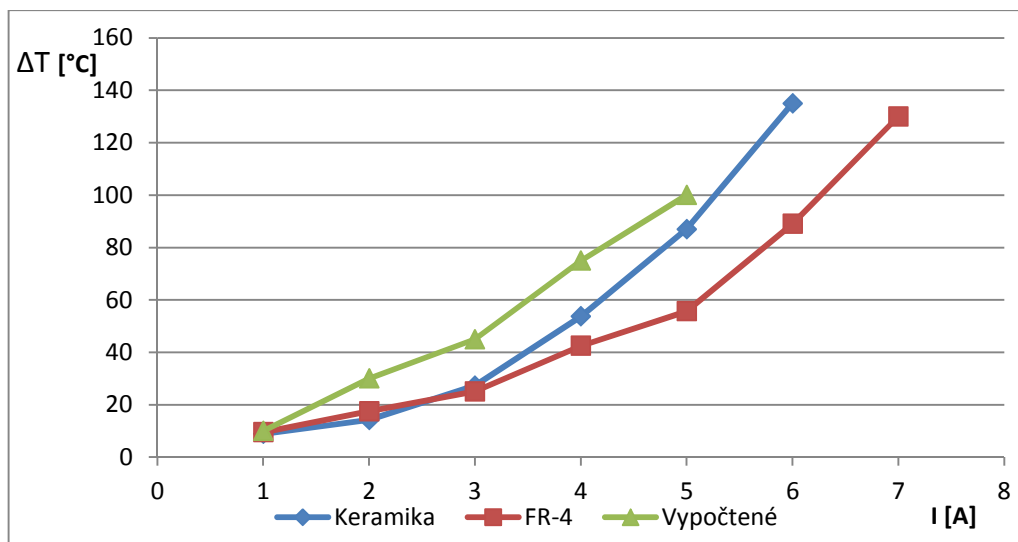
Graf 1 Průběh proudové zatížitelnosti keramického substrátu

Tab. 10 FR-4 substrát - ΔT °C

Šířka vodiče	5 A	7 A	10 A	13 A	16 A	19 A	22 A	25 A	28 A
4 mm	4,3	4,5	12,3	18,7	25,1	39,2	56	77,3	110
2 mm	9,5	17,5	25,1	42,5	55,7	89	130		
1 mm	15,8	30,5	63,5	106					



Graf 2 Průběh proudové zatížitelnosti skloepoxidového substrátu



Graf 3 Porovnání průběhu proudové zatížitelnosti vodiče o šířce 2 mm

Tab. 11 Teoreticky vypočtené hodnoty proudové zatížitelnosti mědi o tloušťce 35 μm

Šířka vodiče	4,9 A	6,9 A	8,5 A	10 A	11 A
2 mm	10 °C	30 °C	45 °C	75 °C	100 °C

Teoretické hodnoty byly vypočtené matematickým softwarem od společnosti PragoBoard s.r.o. pro vrstvu mědi o tloušťce 35 μm. Rozdíl mezi naměřenými a teoreticky vypočtenými hodnotami je dán absencí základního materiálu u vypočtených hodnot. Základní materiál zvyšuje proudovou zatížitelnost vodivé vrstvy. V porovnání keramiky a skloepoxidového substrátu dosáhl lepší proudové zatížitelnost skloepoxidový substrát. Chyba v měření mohla být způsobena vzdáleností termokamery a odleskem měděné fólie naplátované na skloepoxidovém substrátu. Při použití stejného chladiče pro keramiku i skloepoxidový substrát by vlivem vysoké tepelné vodivosti keramiky mohlo dojít ke změně průběhů.

4.4 Rezistivita

Při poslední zkoušce byl multimetrem KEITHLEY 2010 za užití čtyř-vodičové metody změřen odpor vodivého motivu keramického substrátu s pastou č. 2. Délka vodivé dráhy byla 50 mm, šířka 1 mm a tloušťka 36,704 μm. Tloušťka měděných vrstev byla měřena pomocí laserového konfokálního mikroskopu LEXT. Čtyř-vodičová (Kelvinova) metoda je určena k měření velmi malých odporů. Při měření malých odporů pomocí dvou vodičů je měření zatíženo chybou způsobenou odporem přívodních vodičů. Při měření čtyř-vodičovou metodou přivádíme na měřený vzorek dvěma vodiči proud a dalšími dvěma měříme napětí, které na

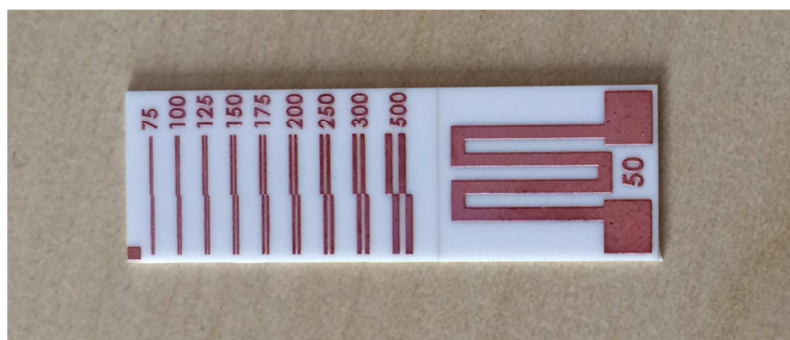
něm vzniklo průchodem proudu. A tímto je vyloučen odpor přívodních vodičů. Po skončení měření byla dopočítána rezistivita dle vzorce 4.1:

$$\rho = \frac{RS}{l} \text{ [}\Omega \cdot \text{m]} \quad (4.1)$$

Tab. 12 Měření odporu vodivé cesty a vypočtená rezistivita vodivého obrazce

Číslo měření	1.	2.	3.	4.	5.
Odpor [mΩ]	38	37	37	37	38
Rezistivita [Ωm]	$0,028 \cdot 10^{-6}$	$0,027 \cdot 10^{-6}$	$0,027 \cdot 10^{-6}$	$0,027 \cdot 10^{-6}$	$0,028 \cdot 10^{-6}$

Průměrná výsledná rezistivita $0,027 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ je podle očekávání vyšší než tabulková hodnota rezistivity mědi $0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$. Tento rozdíl může být způsoben větší nehomogenitou (pórovitostí) měděné vrstvy v porovnání s čistou mědí. Přesto však je tento výsledek velmi dobrý a měděná pasta vykazuje dobré elektrické vlastnosti.



Obr. 13 Keramický substrát pro měření rezistivity a k zjištění rozlišitelnosti tisku.

Závěr

Účelem této práce je popsat ZM pro výrobu substrátů DPS, technologie výroby a propojovací struktury. Dále podat ucelený přehled testovacích metod zejména pro testování ZM nebo substrátů DPS a podrobit testům zcela nové pasty pro substráty výkonových aplikací, které jsou teprve ve stádiu testování, a porovnat je s hodnotami naměřenými na nejpoužívanějším skloepoxidovém substrátu FR-4. Při výrobě testovacích vzorků byla potvrzena možnost tisku velmi tlustých vrstev a snadná diferenciací vodivých obrazců v porovnání s jinými tlustovrstevnými technologiemi. Přes očekávanou lepší tepelnou vodivost keramického substrátu jsou naměřené hodnoty proudové zatížitelnosti obou substrátů téměř srovnatelné. Hodnoty vychází dokonce lépe pro skloepoxidový substrát, což může být způsobeno pórovitostí měděné pasty a vznikem mezivrstvy mezi mědí a keramikou, která funguje jako tepelný izolant. Zkouška v odtrhu potvrdila silnou adhezi měděné fólie substrátu FR-4 a také zjistila velmi silnou adhezi měděné vrstvy, která byla natištěna pomocí pasty č. 2 na keramickém substrátu. Tyto dva substráty byly schopné vydržet vždy sílu v odtrhu alespoň 20 N/mm².

Předložená bakalářská práce by mohla pomoci při dalším vývoji tlustovrstvých výkonových substrátů a snaze o vylepšení jejich vlastností.

V dalším pokračování prací na tomto tématu bude nutné otestovat několik dalších vlastností nových tlustovrstvých past. Do testování by se mohly zařadit vzorky s větším počtem vrstev a další zkoušky jako například testování elektrického oblouku, chemické odolnosti a cyklického teplotního namáhání.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MACH, P. Montáž v elektrotechnice. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.
- [2] STARÝ, J. KAHLE, P. Plošné spoje a povrchová montáž [online]. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=21618>.
- [3] BARLOW, Fred. Ceramic interconnect technology handbook. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2007, 441 p. ISBN 978-142-0018-967.
- [4] SZENDIUCH, Ivan. Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [5] SZENDIUCH, Ivan. Mikroelektronické montážní technologie. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1997, 237 s. ISBN 80-214-0901-0.
- [6] DONG, MURRAY a KIKKAWA. The Laboratory for Research on the Structure of Matter: Nanostructured programmable matter for functional architectures and devices. [online]. 2011 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: http://www.lrsm.upenn.edu/highlights/hightlight_8.11_seed_a.html
- [7] HW SERVER S.R.O. Co jsou ohebné plošné spoje a k čemu se hodí [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/produkty/co-jsou-ohebné-plosne-spoje-a-k-cemu-se-hodi.html>
- [8] HAMÁČEK, Aleš. Diagnostika mechanických vlastností pájeného spoje [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/36.pdf>
- [9] FRIEDRISCHKOVÁ, Kristýna. Technologie propojení součástek v systému, plošné spoje – materiály, konstrukce, výroba. Dostupné z: http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/4_Plosne%20spojce.pdf
- [10] Univerzálny skúšobný stroj LabTest 5.200SP1 pre ťahové a tlakové skúšky. [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.treva.sk/ims/skusobna/trhaci-stroj-labtest-5-200sp1/>
- [11] ČSN EN 61189-2 ed.2. Zkušební metody pro elektrotechnické materiály, propojovací struktury a sestavy - Část 2: Zkušební metody pro materiály propojovací struktury. Praha: Český normalizační institut, Zář 2006. 114 s. idt IEC 61189-2:2006.
- [12] Zkoušky tvrdosti: Oddělení povrchového inženýrství [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [13] POOLE, Ian. ELECTRONICS TEST AND MEASUREMENT: ICT, In Circuit Test Tutorial. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/ate/ict-in-circuit-test-tutorial.php

- [14] ADÁMEK, Martin, Cyril VAŠKO a Miloš DRLÍK. Pájení v elektrotechnické výrobě, Kontrola jakosti spojů. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L04b_p%C3%A1jen%C3%AD_a_kontrola.pdf
- [15] PBT ROŽNOV P. R, s.r.o. Průmyslové RTG testery a tomografy: [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.pbt.cz/detail/microme%7Cx-dxr-hd/82/?path=products/inspekce-mereni-a-testovani/systemy-pro-testovani-ict-aoi-spi-x-ray/prumyslove-rtg-testery-a-tomografy-ct/>
- [16] Thermal shock testing of ceramics. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.atyc.org/2006aycect/abstract/p09c_honda.pdf
- [17] SCHULZ-HARDER, Jürgen. Advantages and new development of direct bonded copper substrates. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article%20/pii/S0026271402003438?np=y>
- [18] Power electronic substrate: Direct bonded copper substrate. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Power_electronic_substrate