

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Substráty pro výkonové elektronické aplikace

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petra KOHOUTOVÁ**
Osobní číslo: **E10B0317P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Substráty pro výkonové elektronické aplikace**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Zmapujte přehled substrátů, které se používají pro výkonovou elektroniku.
2. Popište metody výroby těchto substrátů.
3. Proměřte parametry vybraných substrátů používaných pro výkonovou elektroniku.
4. Proveďte zhodnocení kvality těchto substrátů z hlediska tepelných, elektrických a mechanických vlastností.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. F. BARLOW; D. a A. ELSHABINI: Ceramic interconnect technology handbook. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2007, 441 s. ISBN 978-142-0018-967.
2. Elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Hromadka


Katedra technologií a měření

Konzultant bakalářské práce: Ing. Karel Hromadka

Katedra technologií a měření


Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013


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



L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na substráty ve výkonové elektronice. Konkrétně je v práci řešeno jejich rozdělení, výroba jednotlivých typů, možnosti testování vybraných vlastností substrátů z hlediska teoretického i praktického a konkrétní typy výrobků.

Klíčová slova

Výkonová elektronika, deska plošného spoje, substrát, keramický substrát, ohebný substrát, kovový substrát, DBC, testování substrátů

Abstract

Presented bachelor thesis is focused on substrates in power electronics. Their allocation is described in this thesis, production of single types, possibilities of testing of chosen features of substrates in theoretical and practical perspective are described as well .

Key words

Power electronics, printed circuit board, substrate, ceramic substrate, flexible substrate, metal substrate, DBC, testing of substrates

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 6.6.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hromadkovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 9 |
| ÚVOD | 10 |
| 1 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA | 11 |
| 2 POŽADAVKY NA SUBSTRÁTY PRO VÝKONOVÉ APLIKACE | 13 |
| 2.1 VÝBĚR DESKY PLOŠNÉHO SPOJE..... | 13 |
| 2.2 JEDNOTLIVÉ POŽADAVKY NA SUBSTRÁTY..... | 14 |
| 3 TYPY SUBSTRÁTŮ | 16 |
| 3.1 KERAMICKÉ SUBSTRÁTY..... | 16 |
| 3.1.1 Výroba..... | 16 |
| 3.1.2 Vlastnosti keramiky..... | 17 |
| 3.1.3 Pokovování keramických substrátů..... | 22 |
| 3.1.4 Materiály užívané pro keramické substráty..... | 25 |
| 3.2 OHEBNÉ SUBSTRÁTY..... | 26 |
| 3.3 KOVOVÉ SUBSTRÁTY..... | 27 |
| 3.3.1 Izolované kovové substráty..... | 27 |
| 3.3.2 Aktivní kovové pájené substráty..... | 28 |
| 3.4 DBC SUBSTRÁTY..... | 28 |
| 3.4.1 Výroba DBC substrátu..... | 28 |
| 3.4.2 Mechanické vlastnosti DBC..... | 29 |
| 3.4.3 Využití DBC..... | 29 |
| 3.4.4 Vlastnosti DBC..... | 29 |
| 3.4.5 Výhody / nevýhody DBC..... | 30 |
| 4 TESTOVÁNÍ | 31 |
| 4.1 TESTOVÁNÍ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ..... | 31 |
| 4.2 TESTOVÁNÍ SUBSTRÁTŮ..... | 33 |
| 5 FIRMY ZABÝVAJÍCÍ SE VÝROBOU A PRODUKČÍ SUBSTRÁTŮ PRO VÝKONOVOU ELEKTRONIKU | 37 |
| 6 PRAKTICKÁ ČÁST | 42 |
| ZÁVĚR | 45 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 46 |

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|--|---|
| F [N]..... | Zátěžná síla |
| HK [-]..... | Symbol mikrotvrdosti podle Knoop |
| L [mm]..... | Délka úhlopříčky |
| R_{1c} [$W \cdot m^{-1}$]..... | Síla teplotního šoku |
| R_{2c} [$W \cdot m^{-0.5}$]..... | Houževnatost trhlín |
| TCE [K^{-1}]..... | Teplotní součinitel délkové roztažnosti |
| U_p [V]..... | Průrazné napětí |
| ρ [$\Omega \cdot m$]..... | Rezistivita |
| σ [$N \cdot m^2$] nebo [S/jednotky délky]..... | Modul ohybu nebo elektrická vodivost |
| | |
| AIO..... | Automatic optical inspection (Automatická optická inspekce) |
| BT..... | Bismaleimide triazine epoxy-based (Na bázi bismaleimidu a triazinu) |
| DBC..... | Direct bonded circuit (Přímé bondování mědi) |
| DPS..... | Deska plošného spoje |
| ICT..... | In circuit test (Vnitroobvodový test) |
| IRH..... | Infrared radiation rating (Infračervený radiační ohřev) |
| LTCC..... | Low temperature co-fired ceramic (Nízkoteplotní spolupálené keramiky) |
| MCPCB..... | Metal-core printed circuit boards (Desky plošných spojů s kovovým jádrem) |
| PTFE..... | Polytetrafluorethylene |
| SCAM..... | Scanning Acoustic Microscopy (Rastrovací akustická mikroskopie) |
| WFC..... | Water flow cooling method (Metoda chlazení proudem vody) |

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na substráty pro výkonové elektronické aplikace.

Text je rozdělen na 6 částí. První část je zaměřena na výkonovou elektroniku a základní používané výkonové součástky. Druhá část se zabývá požadavky na substráty pro výkonové aplikace a výběr desky plošného spoje. Třetí část se věnuje jednotlivým typům substrátů, jako jsou substráty keramické, kovové, ohebné a DBC substráty. Jsou zde popsány jejich vlastnosti, výroba a materiály, které se pro jejich výrobu používají. Další část se týká možností testování desek plošných spojů a testování použitých substrátů. Následující část obsahuje firmy, které se výrobou a produkcí těchto substrátů zabývají. Poslední část se zabývá praktickým měřením, kde byla testována dielektrická pevnost keramických substrátů.

1 Výkonová elektronika

Výkonová elektronika patří mezi silnoproudé obory, její hlavní náplní je většinou řízení a přeměna parametrů elektrické energie. Zabývání se výkonovou elektronikou zahrnuje práci s vysokými napětími a vysokými proudy. Proto jsou na substráty pro výkonové součástky kladeny speciální nároky.

Stejně jako ve všech jiných oborech dochází i ve výkonové elektronice k několika zásadním trendům jako jsou například: miniaturizace, snížení váhy, zlepšování funkčnosti, zvyšování spolehlivosti a v neposlední řadě je brán důraz na snižování ceny. K dalším trendům patří i zlepšování obecných požadavků jako je velká účinnost, vysoká životnost, nízký vliv na okolí nebo nízké náklady na údržbu. Největší rozvoj zažívají asi nejvíce užívané polovodičové součástky pro výkonovou elektroniku, pro které platí stejné trendy jako u celé výkonové elektroniky.

Mezi nejvíce používané součástky pro výkonovou elektroniku patří například diody, tyristory, různé druhy tranzistorů. [31]

Používané součástky pro výkonovou elektroniku

- ***Dioda***

Nelineární dvojpól, který má 1 PN přechod s usměrňujícím účinkem. Diod rozlišujeme několik druhů: usměrňovací, Schottkyho, frekvenční, apod. Pro využití ve výkonových aplikacích je důležité vysoké závěrné napětí, naopak nízké propustné napětí a rychlý přechod z propustného do závěrného směru. Dalším důležitým parametrem je vysoký proud v propustném směru, díky němuž na diodě vzniká velký výkon a s ním spojené zahřívání diody. Vznikající teplo se pak musí odvádět. [32]

- ***Tyristor***

Obsahuje 3 PN přechody, jedná se o součástku s řízeným spínáním. Samozřejmě existuje několik druhů tyristorů, ale ve výkonové elektronice je nejběžnějším triodový zpětně závěrný tyristor, mimo něj můžeme jmenovat vypínací tyristor nebo například vysokonapěťové tyristory. Z hlediska využití je důležitá doba zapínání, jednoduchý způsob zapínání / vypínání a galvanické oddělení řídicích a silových obvodů.

- ***Tranzistor***

Řiditelná součástka, obsahující 2 PN přechody. Rozlišujeme bipolární a unipolární.

Ve výkonové elektronice se tranzistor užívá ve spínacím režimu. Velmi užívanými jsou tranzistory typu MOSFET. V poslední době jsou velmi rozšířené bipolární tranzistory s izolovaným hradlem (IGBT), které v sobě spojují dobré vlastnosti od bipolárních i unipolárních tranzistorů. IGBT tranzistor funguje jako kaskádní spojení bipolárního tranzistoru PNP a je říditelný pouze napětím. Výhodami IGBT tranzistorů jsou: velká spínací frekvence, malý odpor v sepnutém stavu, vysoké spínací výkony. [20]

Využití výkonové elektroniky:

- v domácnostech, např. u pohonů praček, stmívačů nebo nabíječek
- v energetice, kde se používá k řízení a regulaci
- v dopravě – u tramvají nebo vlaků, atd.

2 Požadavky na substráty pro výkonové aplikace

Substrát je základem každého elektrického obvodu, proto je nutné, aby korespondoval s ostatními součástkami. Musí tedy splňovat určité požadavky, mezi které patří velký měrný elektrický odpor, velká tepelná vodivost, odolnost vůči teplotě a v neposlední řadě příznivá cena.

2.1 Výběr desky plošného spoje

Výběr desky plošného byl v minulosti většinou otázkou hlavně ceny. Dnes je ovšem brán zřetel i na již zmíněné atributy – miniaturizace, snížení váhy, zlepšení funkčnosti a snižování ceny. V dnešní době jsou hojně užívané lamináty, protože poskytují dobré mechanické, elektrické, tepelné a chemické podmínky. Druhů laminátů je samozřejmě několik: můžeme jmenovat například epoxidové lamináty na bázi bismaleimidu a triazinu (BT epoxidové lamináty), polyamidové lamináty, PTFE lamináty nebo rozšířené epoxidové lamináty. Mezi nejvíce používané materiály patří FR4, což je materiál z nealkalických skelných vláken, který je spojený epoxidovou pryskyřicí. [17]

- ***BT epoxidové lamináty***

Nejběžnější druh je vyztužen tkanými skleněnými vlákny. Užití je tam, kde při zahřátí nepřesáhne teplota pryskyřice užitá na desce plošného spoje 170 °C až 200 °C, pak by došlo ke změně skupenství pryskyřice z pevného na gel. Dalším pozitivem je i cena, která se snížila přidáním většího množství epoxidu, a také jednodušší výroba.

- ***Lamináty na bázi polyimidů***

Mezi jejich hlavní klady patří velká teplotní odolnost, spolehlivost, houževnatost a dobrá zpracovatelnost. Nevýhodou ovšem je větší absorpce vody oproti ostatním laminátům. Užití je v takových aplikacích, kde dochází často k přepracování díky jejich vysoké adhezi mědi při pájení. Další nevýhodou může být cena, která je ku příkladu oproti BT laminátům asi 9 krát vyšší.

- ***Lamináty na bázi kyanát esteru***

Jejich hlavní výhodou je velká teplotní odolnost – okolo 230 °C a malá dielektrická konstanta.

- **Lamináty na bázi tetrafluorethylenu (PTFE lamináty)**

Výhodou jsou malé ztráty, malá dielektrická konstanta, chemická inertnost a velké teplotní rozmezí. Je možno je vyrábět v několika konstrukcích se skleněnými vlákny, s keramikou nebo s tkaným sklem. Nevýhodou je pak jejich malá tuhost a obtížnější produkce vícevrstevných struktur. Řadí se také mezi nejdražší lamináty.

- **Další druhy laminátů**

Rozšířené epoxidové lamináty (Vyznačují se malými ztrátami a vysokou rychlostí), lamináty na bázi polyetylen oxidu, lamináty na bázi aramidu, apod. [2]

Tab. 2.1 Porovnání cen laminátů [2]

| Laminát | Relativní cena |
|--------------|----------------|
| Epoxidový | 1 |
| Polyimidový | 2 |
| Kyanát ester | 6 |
| PTFE | 9 |

2.2 Jednotlivé požadavky na substráty

- **Velký měrný elektrický odpor ρ [$\Omega \cdot m$]**

Měrný elektrický odpor (případně rezistivita) charakterizuje elektrickou vodivost látky. Zároveň vyjadřuje závislost elektrického odporu na materiálu, jeho délce a obsahu průřezu. Čím větší je hodnota měrného elektrického odporu, tím větší je pak elektrický odpor. To znamená, že látka má pak menší schopnost vést elektrický proud. Pro substráty je důležitý kvůli tomu, aby izoloval sousední obvody od sebe.

- **Velká tepelná vodivost λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]**

Schopnost látky vést teplo. Neboli množství tepla, které přejde z jedné části látky do druhé. Přispívají k ní dva faktory, a to pohyb volných elektronů a chvění mřížky. Ve výkonové elektronice je důležitá proto, aby odvedla od součástek teplo, které se vytvoří za chodu aplikace, aby nedošlo k zahřívání součástek, k jejich špatné funkci nebo i zničení.

- **Odolnost vůči teplotě**

Souvisí s tepelnou vodivostí. Na desce substrátu vzniká teplo nejen kvůli zahřívání

součástí jejich činností, ale i substráty jsou vystavovány vysokým teplotám při procesech, jako je například pokovování.

- ***Odolnost proti chemické korozi***

Při výrobě nebo při osazování součástek je užíváno různých tavidel, rozpouštědel a podobných chemických látek, které samozřejmě nesmí narušit chemickou strukturu substrátu.

- ***Cena***

V dnešní době velmi důležitý parametr, který výrazně ovlivní celkovou cenu hotového produktu [2]

3 Typy substrátů

3.1 Keramické substráty

Mezi keramické substráty můžeme zařadit

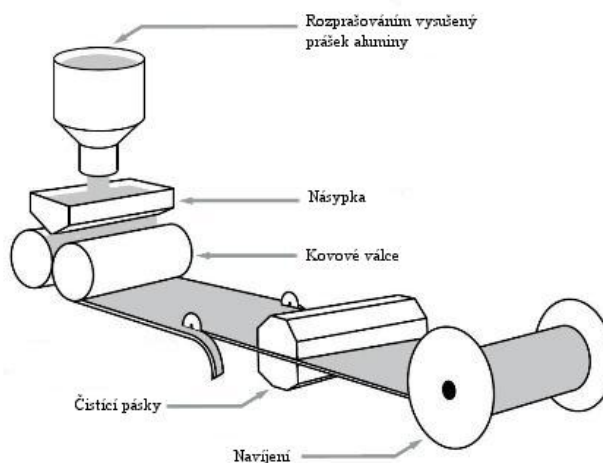
- oxid hliníku (alumina, Al_2O_3)
- oxid berylia (BeO)
- nitrid hliníku (AlN)
- silikon karbid (SiC)
- nitrid boru (BN)

3.1.1 Výroba

Z důvodu vysokého bodu tání a tvrdosti keramiky se při její výrobě musí přidávat ještě pojící a tavné sklo, které snižuje teplotu tavení a usnadňuje výrobu.

Pro materiály Al_2O_3 , BeO a AlN je výroba podobná. Nejdříve dojde k rozemletí základního materiálu na jemný prášek, který je smíchaný právě se sklem obsahujícím hořčík a vápník, které jsou také ve formě prášku. Pak je přidáno organické pojivo a výsledná suspenze je vložena do kulového mlýna, který odstraní aglomeráty a směs sjednotí. Směs je dále formována do tvaru listu pomocí jednoho z následujících procesů:

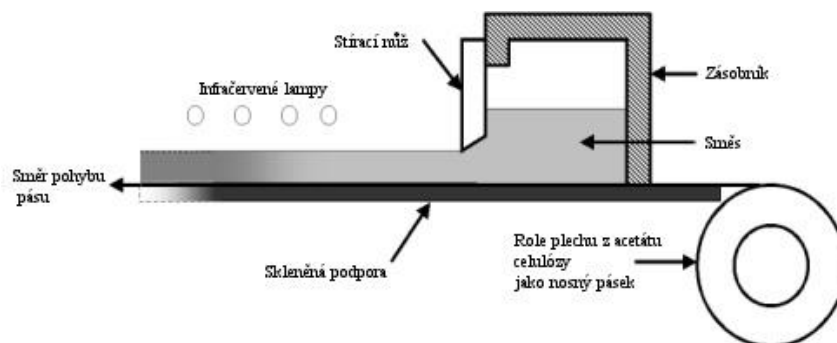
Válcování - směs je nanesena na rovný povrch, dále je vysušena tak, aby získala tvar tenkého listu, který má konzistenci tmelu a nakonec je list protažen skrz dva válce, aby bylo dosaženo požadované tloušťky listu.



Obr. 3.1 Válcování [28]

Izostatické lisování – při tomto procesu je využíváno ohebné lisovací formy, která je obklopená vodou nebo glycerinem a pak dochází opět k lisování.

Tape casting - směs je posouvána na jezdícím páse, kde je pomocí nože natvarována do tvaru listu.



Obr. 3.2 Tape casting [26]

Lisování prášku – prášek je natlačen do lisovací formy a stlačován pomocí vysokého tlaku během slinovacího procesu.

Extruze – neboli průtlačné lisování je proces, kdy směs k lisování musí být více vazká, aby bylo možno ji protlačit skrz formu. Oproti jiným procesům je možno získat tenčí výsledné části.

Během některých těchto procesů je možné již vytvořit například konstrukční otvory nebo jinou geometrii.

Poté dochází ke slinování, které je prováděno při teplotě nad bodem tavení skla, abychom vytvořili spojitou strukturu. Tento proces probíhá ve dvou fázích, první slouží k odstranění nestálých organických materiálů a druhá fáze ke spečení struktury. K odstranění všech organických materiálů ještě před slinováním musí dojít proto, že plyny, které by se vytvořily, by mohly později narušit strukturu keramiky. [2]

3.1.2 Vlastnosti keramiky

Pojem keramika, tedy přesněji keramika používaná v elektrotechnice, označuje polykrystalickou látku, jenž se vyznačuje velkou pevností a tvrdostí, odolností proti změnám teplot, malou tepelnou roztažností a dobrou dostupností surovin pro výrobu. Typickými používanými sloučeninami jsou Al_2O_3 , ZrO_2 , AlN nebo třeba Al_2TiO_5 , $\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{16}$. [3]

- **Povrchové vlastnosti keramiky**

Drsnost povrchu - jakost povrchu. Udává jak je plocha povrchu např. hrubá/jemná,

zakřivená. Na měření drsnosti využíváme dvě metody – elektrickou a optickou. Elektrické měření, je měření, kdy je drsnost měřena pomocí jehly s jemným hrotem podél povrchu, která je připojena buď na piezoelektrický krystal, nebo na malý magnet. Pokud bereme optické měření, tak je užito záření z laserové diody, kdy odchyly od povrchu vytvoří interferenční obrazce, podle kterých je spočítána drsnost. Optické měření je přesnější nežli měření elektrické.

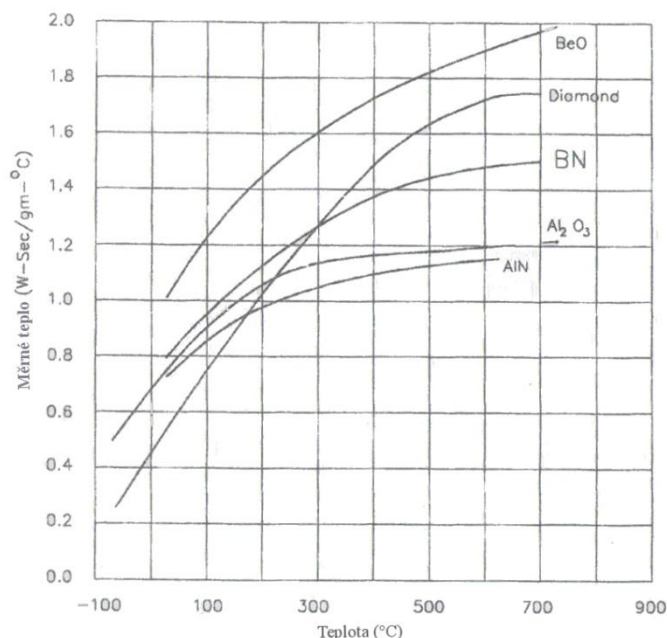
- **Tepelné vlastnosti**

Tepelná vodivost – schopnost odvádět teplo. Pro srovnání s epoxidovými deskami plošných spojů dokáže keramika mnohem lépe odvádět teplo díky oxidu hlinitému a berylliu, které jsou dobrými vodiči tepla. Ke snižování tepelné vodivosti může docházet kvůli nečistotám, nebo různým defektům ve struktuře, následkem toho je pak ztížené odvádění tepla.

Tab. 3.1 Tepelné vodivosti vybraných materiálů [6,8]

| Materiál | Tepelná vodivost [W. m⁻¹.K⁻¹] |
|--------------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ | 28 – 35 |
| BeO | 330 |
| AlN | 140 – 180 |

Měrná tepelná kapacita (měrné teplo) - je definované jako množství tepla, které je potřebné ke zvýšení teploty o 1 °C pro 1 kg látky.



Obr. 3.3 Srovnání měrného tepla v závislosti na teplotě u jednotlivých materiálů [2]

Teplotní součinitel délkové roztažnosti (TCE) – odpovídá prodloužení předmětu o délce 1 m při oteplení o 1 °K.

Tab. 3.2 Tabulka některých materiálů a jejich teplotních součinitelů [2]

| Materiál | Teplotní součinitel délkové roztažnosti (K ⁻¹) |
|--------------------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ (96%) | $6.5 \cdot 10^{-6}$ |
| BeO | $7.5 \cdot 10^{-6}$ |
| AlN | $4.4 \cdot 10^{-6}$ |

- **Mechanické vlastnosti**

Mechanické vlastnosti keramiky jsou dány vazbami mezi atomy, které jsou velmi silné. Ty zajišťují její tvrdost i za vysokých teplot. Oproti tomu odolnost keramiky proti mechanickému zničení (prasknutí, ulomení části, apod.) je malá.

Modul pružnosti – popisuje chování materiálu při zkouškách pružnosti. Substráty mohou být mechanicky namáhány. Pokud ovšem dojde k takovému mechanickému namáhání, které překročí danou mez, dojde vytvoření mechanických trhlin, které se můžou rozšířit až do té míry, že způsobí rozdělení vzorku na dva kusy. Ještě před samotným rozdělením vzorku dojde k malému prodloužení, které nazýváme plastickou deformací. [2]

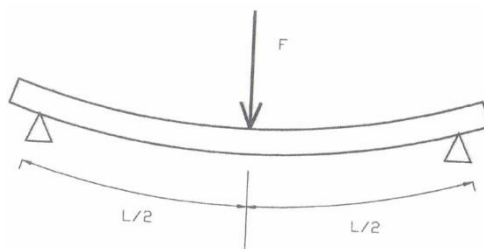
Pevnost v ohybu – keramiku není vhodné testovat běžným způsobem na pevnost v ohybu, protože nevykazuje dostatečné elastické vlastnosti, proto je užíván alternativní test, kdy vzorek keramiky je umístěn na dvě opory. Přesně uprostřed je zatěžován silou a při měření je zaznamenávána závislost prohnutí vzorku na velikosti působící síly. Test probíhá do doby, než je vzorek rozlomen na 2 části. Poté získáme modul ohybu pro obdélníkový průřez jako:

$$\sigma = \frac{3LF_r}{2y^2} [N.m^2] \quad (3.1)$$

A pro kruhový průřez vzorku:

$$\sigma = \frac{LF_r}{\pi R^2} [N.m^2] \quad (3.2)$$

Kde F_r je síla potřebná k zlomení vzorku, L je délka vzorku, y je kratší strana obdélníkového vzorku a R je poloměr kruhového vzorku.



Obr. 3.4 Testování pevnosti v ohybu [2]

Tvrдость - keramika patří mezi nejtvrďší materiály. Jednou z metod, která se užívá pro měření tvrdosti keramiky, je Knoopova metoda. Spočívá v tom, že se keramika co nejvíce vyleští a poté je do ní vtlačěn špičatý jehlan z diamantu. Měří se hloubka proniknutí jehlanu do povrchu, která je poté převáděna na Knoopovu stupnici. Konkrétně se měří delší úhlopříčka, která vznikne po vtisku jehlanu. Podle vztahu

$$HK = \frac{1,451F}{L^2} [-] \quad (3.3)$$

je možné dopočítat mikrotvrďost podle Knoopu. (F je zátěžná síla, L je délka delší úhlopříčky). [19]

Tab. 3.3 Příklady Velikosti zkušebních zatížení při měření tvrdosti Knoopovo metodou [19]

| Symbol tvrdosti | Nominální hodnota zkušebního ztížení F [N] |
|-----------------|--|
| HK 0,01 | 0,09807 |
| HK 0,02 | 0,1961 |
| HK 0,025 | 0,2452 |
| HK 0,05 | 0,4903 |

Teplotní šok – k teplotnímu šoku dochází tehdy, pokud je materiál v krátkém časovém úseku vystaven teplotním extrémům, v takovém případě pak může dojít i k jeho zničení. Veličina, která udává schopnost vydržet tepelné změny, se nazývá koeficient tepelné odolnosti.

Tab. 3.4 Vybrané mechanické vlastnosti vybraných materiálů [2]

| Materiál | Modul pružnosti (GPa) | Pevnost v ohybu (MPa) | Knoopovo číslo tvrdosti[-] | Koeficient tepelné odolnosti [-] |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Al ₂ O ₃ (96%) | 344 | 331 | 2100 | 0.234 |
| BeO | 345 | 235 | 1200 | 0.225 |
| AlN | 300 | 269 | 1200 | 2.325 |

- Elektrické vlastnosti**

Rezistivita – vyjadřuje závislost elektrického odporu na materiálu, jeho délce a obsahu průřezu dle vzorce:

$$\rho = \frac{R S}{\sigma} [\Omega \cdot m] \quad (3.4)$$

Častěji se udává jako elektrická vodivost, která se dá spočítat podle vzorce:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} [S/\text{jednotky délky}] \quad (3.5)$$

Kde σ je vodivost [S/jednotky délky], ρ je rezistivita [Ω .jednotky délky]). Vodivost keramických substrátů je malá, způsobeno to je nečistotami a poruchami v mřížce.

Tab. 3.5 Porovnání rezistivit různých izolanů [2]

| Izolant | Rezistivita [$\Omega \cdot m$] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Al ₂ O ₃ (96%) | 10 ¹⁴ |
| AlN | 10 ¹² |
| Vzduch | 10 ¹⁴ |
| Sklo | 10 ¹⁰ - 10 ¹⁴ |
| Dřevo | 10 ¹⁶ |

Průrazné napětí – v případě, že dojde k působení velmi vysokých elektrických potenciálů na keramiku, které způsobí odchýlení elektronů z orbitů, které odchýlí další elektrony, dojde pak k lavinovému efektu, který bude mít za následek zhoršení dobrých izolačních vlastností keramiky a dovolí protékat elektrickému proudu. Většinou je toto napětí velmi vysoké, ale jsou dva případy, kdy může dojít k jeho snížení - pokud se zvýší teplota vlivem ztrátového výkonu nebo pokud dojde k velkému navlhnutí povrchu keramiky.

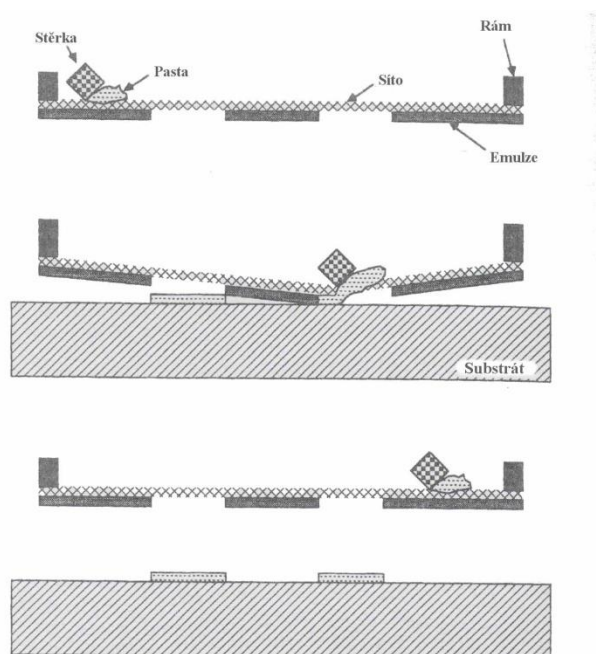
3.1.3 Pokovování keramických substrátů

Rozlišujeme tři možné metody pokovování keramických substrátů – tlustovrstvé, tenkovrstvé a pokovování mědí (to v sobě zahrnuje např. DBC)

- **Tlustovrstvé pokovování**

Tlustovrstvé materiály mohou být kombinací několika materiálů – například sklokeramiky a kovů, proto se jim někdy také říká „cermet“ (z anglických slov: ceramic, metal). Vypalují se při teplotách od 850°C do 1000°C. Jedná se o proces, při kterém je užit sítotisk a sušení, aby se všechny vodivé, odporové a dielektrické vzory mohly být nanесeny na substrát.

Průběh procesu: jako první je třeba vytvořit přesnou šablonu z nerezové oceli, která odpovídá podle měřítka 1:1 výslednému potisku. Poté musí být síto napnuto a namontováno do hliníkového rámu. Následně nato dojde k pokrytí fotosenzitivním materiálem a ozáření přes jednu z šablon. Nezakryté části jsou odstraněny a zůstanou po nich otvory, které korespondují s tištěným vzorem. [2]



Obr. 3.5 Proces výroby tlustovrstvého substrátu [2]

- **Tenkovrstvé pokovování**

Tenkovrstvé materiály mohou být složeny z 3 vrstev materiálu, které jsou umístěny na substrátu. Každá z vrstev má svůj význam - spodní vrstva slouží jako odporový materiál a zároveň umožňuje substrátu adhezi; prostřední vrstva slouží jako mezivrstva mezi vrstvou odporovou a vodivou vrstvou, která je vrstvou třetí. Pro každou z vrstev je typický materiál, ze kterého se vyrábí, viz tabulka 5. [2]

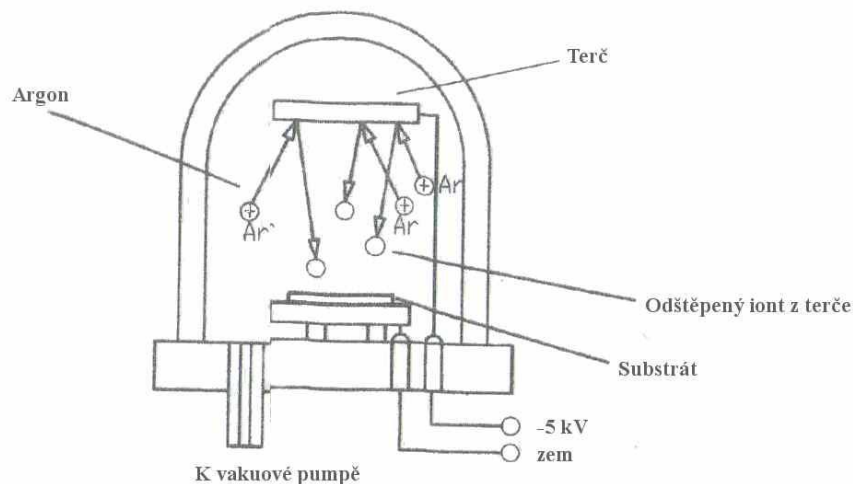
Tab. 3.6 Materiály jednotlivých vrstev tenkovrstvých materiálů [2]

| Vrstva | Materiál |
|-----------------------|--|
| Vodivá vrstva | Zlato (Au), hliník (Al), měď (Cu) |
| Prostřední mezivrstva | Wolfram (W), nikl (Ni) |
| Spodní vrstva | Chromnikl (NiCr), nitrid tantalu (TaN) |

- **Metody nanášení tenkých vrstev na substrát**

Naprašování – nejužívanější metoda. Ve vakuu, respektive ve vakuové komoře, je umístěn terč z vodivého materiálu, kde je na něj přiveden vysoký záporný potenciál a do komory je zaveden plyn (argon). Před terčem je umístěn daný substrát, který má být naprašen. V komoře je terč bombardován kladnými ionty, které se zde vyskytují od zapáleného doutnavého výboje z argonu. Záporné ionty jsou pohlceny uzemněnou kostrou komory. Tím, jak ionty dopadají

na terč, tak ten je rozprašován a ionty se usadí na vnitřním povrchu uvnitř komory, tedy na substrátu. Jde o pomalý proces, při kterém je třeba delší doba na vytvoření vrstvy dané tloušťky.



Obr. 3.6 Proces napařování [2]

Magnetronové napařování – vylepšením klasického napařování, je napařování magnetronové. Které užívá zařízení zvané magnetron. Pomocí elektromagnetu nebo permanentních magnetů se před terčem vytvoří magnetické pole. Stejně jako v předchozím případě je opět terč rozprašován, ovšem díky magnetickému poli se jeho atomy pohybují podél siločar po šroubovici. Výhodou oproti klasickému napařování je to, že atomy jsou delší dobu na dráze v okolí terče a tím je větší šance, že ionizují další atomy plynu – výboj se udrží při nižším tlaku, nižším napětí a dosáhne se větší čistoty vrstev. [21]

Vakuové napařování - k vakuovému napařování je opět třeba vakuová komora, ve které je umístěn substrát. Výsledná vrstva na něm vzniká pomocí vypaření materiálu, který se musí zahřát na teplotu tání a změni svoje skupenství z pevného na plynné. V tomto plynném skupenství dopadá na substrát, který je mnohem studenější a na tomto substrátu zpět kondenzuje. Vypařování je možné pomocí elektronového děla, pomocí laserového svazku, případně pomocí odporového ohřevu látky. [14]

Nevýhody napařování oproti napařování - složitější napaření slitin (kvůli rozdílům teplot mezi jejich složkami)
- omezení na kovy s nízkou teplotou tání

- složitost kontroly reakce reaktivních látek nitridů a oxidů

Další nevýhodou nejen oproti naprašování může být to, že jsme omezení právě jen na kovy s nízkou teplotou tání. Ve výkonových aplikacích ale potřebujeme velkou teplotní stabilitu.

3.1.4 Materiály užívané pro keramické substráty

- **Oxid hlinitý – Al_2O_3**

Al_2O_3 je nejpoužívanější materiál pro výrobu substrátů, a to díky své vysoké tvrdosti, chemické odolnosti a vysoké teplotní odolnosti. K jeho dalším výhodám patří vysoká mechanická pevnost, dobrá tepelná vodivost a dobrá odolnost proti abrazi. Jeho nevýhodou pak je malá odolnost proti teplotním šokům a křehkost, kdy má menší pevnost v tahu oproti pevnosti v tlaku. [10,22]

Využívá se v mikroelektronickém průmyslu mimo jiné jako substrát pro tenkovrstvé a tlustovrstvé pokovování a na obvodová pouzdra.

- **Oxid berylnatý - BeO**

Oxid berylnatý se používá kvůli své velké tepelné odolnosti, vysokému elektrickému odporu a tvrdosti. Nevýhodou je jeho cena, protože se musí vynaložit velké náklady na zamezení toxických účinků. Způsob jeho přípravy ovlivňuje další vlastnosti a jeho geometrii.

Využívá se ve vysokonapěťových aplikacích, kde se využije jeho velká tepelná odolnost. [2]

- **Nitrid hliníku - AlN**

Mezi jeho výhody patří dobré dielektrické vlastnosti, velká tepelná vodivost a chemická odolnost. Při jeho výrobě se do AlN prášku ještě přidává ještě skleněný prášek s obsahem CaO a Y_2O_3 .

Užívá se při tenkovrstvém a tlustovrstvém pokovování a při metalizaci mědi stejně jako Al_2O_3 .

- **Silicon karbid – SiC**

Používaný kvůli své velké tepelné vodivosti, chemické odolnosti, malému koeficientu

teplotní roztažnosti a oproti BeO nebo AlN i jeho nižší ceně. Jeho nevýhodou je zhruba 4 krát nebo 5 krát větší dielektrická konstanta oproti jiným substrátům. [22]

- **Nitrid boru – BN**

Mezi jeho výhody patří výborná chemická odolnost, možnost vytváření rozličných tvarů a velká tepelná vodivost. Může být užit společně s různými kovy, jako jsou měď nebo hliník. Slouží jako izolant. [2]

Tab. 3.7 Vybrané parametry materiálů užívaných pro substráty [2]

| Materiál | Hustota [g/cm ³] | Rezistivita [Ω.cm] | Teplota tavení [°C] | Maximální provozní teplota [°C] |
|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Al ₂ O ₃ (96%) | 3.92 | >10 ¹⁴ | 2000-2090 | 1750 |
| BeO | 2.87 | >10 ¹⁴ | 2570 | 2050 |
| AlN | 3.27 | >10 ¹² | 2232 | 2200 |
| SiC | 3.10 | >10 ¹⁴ | 2152 - 2500 | 2300 |
| BN | 1.92 | >10 ¹⁴ | 2967 | 850 |

3.2 Ohebné substráty

Mimo keramických substrátů, které není možné moc dobře tvarovat nebo ohýbat, existují substráty ohebné. Jsou to substráty pružné, které jsou mimo jiného i lehké, vysoce odolné a využití mají i v miniaturizaci materiálů.

Pro ohebné substráty se používají převážně 2 materiály- polyimid a polyester.

- **Polyimid (nazývaný Kapton)**

Jeho hlavní výhodou je použitelnost ve velkém rozsahu teplot, kdy své vlastnosti si udržuje v rozmezí teplot od -269 °C do 400 °C. Je odolný proti ultrafialovému záření a proti záření alfa. Nevýhodou je vyšší cena.

- **Polyester**

Hlavně tenké folie známé jako obchodní značka Mylar. Výhodou je, že oproti Kaptonu je levnější. Ale nevýhodou je jeho omezená použitelnost kvůli jeho teplotě. Je možné jej užívat jen do teploty 85 °C.

Díky svým vlastnostem nabízí ohebné substráty možnost několika konstrukčních uspořádání:

- Jednostranné desky
- Oboustranné
- Vyztužené
- Vícevrstvé [25]

Ve výkonových aplikacích mohou mít své uplatnění díky své lehkosti a odolnosti, případně možnosti je tvarovat. Ovšem nevýhodou je malá teplotní odolnost polyesteru pro výkonové aplikace důležitá a v případě užití polyimidu i jeho cena, která by způsobila navýšení ceny celé součástky.

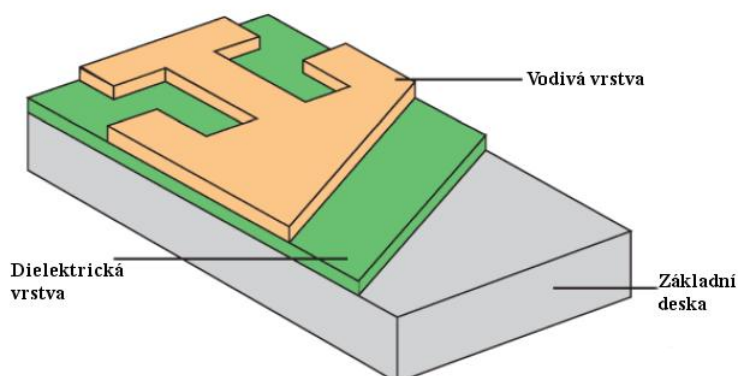
3.3 Kovové substráty

Dalšími možnými používanými substráty jsou kovové substráty. Můžeme je rozdělit na dvě větší kategorie, a to izolované kovové substráty a aktivní kovové pájené substráty.

3.3.1 Izolované kovové substráty

Dalším možným substrátem, který se dá využít pro výkonovou elektroniku, je substrát kovový, konkrétně izolovaný kovový substrát. Jeho výhodou například oproti desce plošného spoje je to, že lépe odvádí teplo. Dalšími výhodami pak jsou minimalizace desky, větší životnost desky a větší mechanická odolnost například oproti keramickému substrátu. Jeho nosnou částí je kovová základní deska, na které je dielektrická vrstva a vodivá vrstva mědi.

Na základ je možné použít měď nebo hliník. Hliník kvůli své malé hmotnosti, chemické odolnosti a nízké ceně. Měď se využívá jako základní deska kvůli své vysoké elektrické vodivosti a odolnosti proti korozi. Dielektrická vrstva je založena na bázi epoxidu kvůli tomu, že epoxidy jsou dobrými dielektriky. Na vodivou vrstvu se užívá měď pro svou výbornou elektrickou vodivost. [16]



Obr. 3.7 Uspořádání vrstev v izolovaném kovovém substrátu [16]

3.3.2 Aktivní kovové pájené substráty

Tyto substráty v sobě spojují keramický substrát a vrstvu kovu. Tyto dvě vrstvy jsou spojeny prostřednictvím pájení. Jako keramický substrát se většinou užívá nitrid hliníku, protože má velkou tepelnou vodivost a je chemicky odolný. Vrstva kovu je tvořena mědí opět kvůli své výborné elektrické vodivosti.

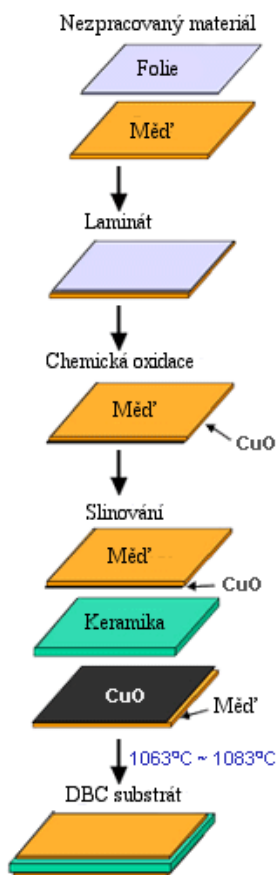
Mezi výhody takovýchto substrátů patří možnost minimalizace desky, vysoká tepelná odolnost, spolehlivost a životnost a malý tepelný odpor. [24]

3.4 DBC substráty

DBC neboli Direct bonded copper substráty jsou jedněmi z nejdůležitějších substrátů pro výkonové aplikace. Je to hlavně díky výborné tepelné vodivosti, vysoké elektrické izolaci, kontrolovatelnému koeficientu teplotní roztažnosti a nízké elektrické kapacitě. Všechny tyto vlastnosti jsou výhodami DBC substrátů oproti například tenkovrstvým a tlustovrstvým materiálům. DBC technologie umožňuje bondování mědi na aluminu nebo nitrid hliníku.

3.4.1 Výroba DBC substrátu

Výroba DBC začíná buď s aluminiovým, beryliovým nebo s AlN substrátem, na který je umístěna měděná folie. Tloušťka této folie se může lišit podle specifických požadavků. Celé toho uskupení je poté zahřáno asi na 1065 °C za přítomnosti kyslíku. Dojde k vytvoření velmi silné vazby mezi mědí a substrátem, která je stabilní do 850 – 900 °C. Podle použitého substrátu se poté liší výsledná vazba, ku příkladu v případě aluminiového substrátu vzniká spojení mezi CuO a Al₂O₃, kde výsledkem je CuAl₂O₄. [1]



Obr. 3.8 Proces výroby DBC [18]

3.4.2 Mechanické vlastnosti DBC

Mechanickou výhodou DBC substrátů je jejich velmi vysoká tuhost. Musíme vyvinout relativně velkou sílu na to, abychom způsobili jejich poškození. Oproti tomu ale nevykazují plastickou deformaci, aby kompenzovali napětí v tahu při rostoucí zátěži. Po překročení maximální možné zátěže, například při různém ohýbání, substrát praskne. Pevnost v ohybu proto musí být jednou z charakteristických vlastností. O její velikosti rozhoduje tloušťka keramiky a tloušťka metalizace. [7]

3.4.3 Využití DBC

Jak již bylo zmíněno, DBC substráty patří k jedněm z nejpoužívanějších, proto škála jejich využití je velice široká. Mimo výkonových aplikací se dají se uplatnit v elektronických topných zařízeních, pro různé automobilové elektroniky, pro výkonové hybridní a elektrické obvody, v leteckém průmyslu, laserových systémech nebo třeba do solárních komponent.

3.4.4 Vlastnosti DBC

Tabulka 9 ukazuje shrnutí nejdůležitějších vlastností DBC substrátů navíc v porovnání

s LTCC a MCPBC substráty. [13]

Tab.3.8 Přehled vlastností DBC substrátů v porovnání s LTCC a MCPBC

| Typ | DBC | LTCC | MCPBC |
|--|-----------|-----------------------|-----------|
| Síla v tahu [kg/cm ³] | >120 | >50 | >50 |
| Materiál | 99.99% Cu | Ag + SiO ₂ | 99.99% Cu |
| Tloušťka [mm] | 0.01~1.6 | 0.01 | 0.01~1.5 |
| Dielektrická pevnost [kV/mm] | >14 | >14 | <5 |
| Tepelná vodivost [W. m ⁻¹ . K ⁻¹] | 24 | 2~3 | 1~3 |
| Maximální teplota [°C] | 850 | <500 | <300 |

3.4.5 Výhody / nevýhody DBC

Mezi největší výhody patří výborná tepelná vodivost, vysoká elektrická izolace, kontrolovatelný koeficient teplotní roztažnosti a nízká elektrická kapacita. Mimo jiné také dobrá mechanická odolnost, odolnost proti korozi a ekologická čistota. Na druhou stranu ale DBC substráty mají svoji nevýhodu, a tou je začátek částečných výbojů pro velmi vysoké napětí na relativně malém napětí (pro keramiku o tloušťce 0,63 mm je to méně než 4 kV). Důvodem pro toto chování jsou malé dutiny mezi mědí a keramikou. Proto se pro trakční aplikace užívá jiný druh drahého kovového podkladu. [11]

4 Testování

4.1 Testování desek plošných spojů

Při testování desek plošných spojů (DPS) je možné využít několika testovacích metod, které se liší v tom, která část DPS je testována a jak je testována. Existuje tedy testování konečného celého produktu (funkční test), testování dílčích soustav, vnitroobvodové testování součástek a obvodů a testy pro pájené spoje a přítomnost součástek. Dále můžeme metody rozlišit na vizuální a optické, laserové, rentgenové a akustické.

Normou, která stanovuje v České Republice požadavky na osazování a testování DPS, je norma ČSN EN 61192-1 - Požadavky na provedení zapájených elektronických sestav - Část 1: Všeobecně. [24]

- ***Vnitroobvodové testování (in - circuit test – ICT)***

Tento test se provádí buď na ještě neosazené desce, nebo na osazené desce hned po poslední operaci při výrobě. Testují se jednotlivé součástky, zkratky a přerušení pomocí jehlového pole a testovacích signálů. Nejběžnější postup je takový, že testovaná deska je přitlačena proti jehlovému poli, které je tvořeno mnoha jehličkami. Ty jsou umístěné v takzvaném G10 materiálu, což je vrstvený materiál ze skelné tkaniny a epoxirezolové živice. Jehličky jsou připojeny k měřicímu přístroji, který vyhodnocuje výsledky.

Výhodou tohoto testování je rychlost, velké procento odhalení chyby, přesná identifikace chyby. Naopak nevýhodou je cena programu, dlouhá příprava jehlového pole a nemožnost zjistit více závad součástek najednou. [15]

- ***Funkční test***

Zkouška, při které se testuje funkčnost celé DPS. Probíhá tak, že se celá deska připojí k testeru, který simuluje konečné elektrické prostředí, ve kterém bude DPS použita. Výhodou testu jednoduché připojení desky. Nevýhodou je obtížné určení závady.

- ***Vizuální metoda***

Je to metoda, která k testování používá lidské oko nebo stroj. Protože lidské oko není dokonalé a nevidí dokonale malé části, je zapotřebí ještě lupa, případně mikroskop. V případě strojní kontroly se jedná o porovnání hodnoceného obrazu s obrazem, který je uložený v paměti.

- **Optická metoda (Automatic Optical Inspection – AIO)**

Metoda spočívá v tom, že deska, která je testována, je osvětlena z několika světelných zdrojů a zároveň je skenována nebo pozorována kamerami, jak ukazuje obr. 4.1. Tím je možné dobře sledovat celý povrch a zkontrolovat například chybějící součástky nebo chyby v pájení.

- **Laserová metoda**

Metoda sloužící ke kontrole pájecí pasty. Využívá programově řízený laser, který vysílá krátké impulzy záření. To je pohlceno pájeným spojem, který zvýší svoji teplotu. Změna teploty je zaznamenána infračerveným detektorem. Nakonec se vyhodnotí tepelná kapacita a kvalita spoje.

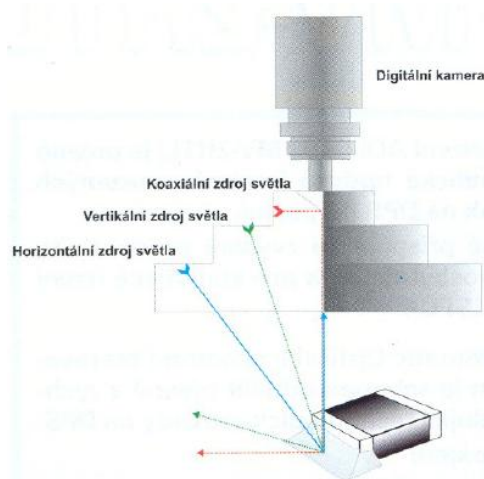
- **Rentgenová metoda**

Metoda, která pomáhá odhalit chyby ve struktuře, jako například zkratky nebo přerušování. Testovaná DPS je pomocí rentgenu ozařována a proniknuté světlo je potom vyhodnocováno pomocí přístroje.

- **Rastrovací akustická mikroskopie (SCAM)**

Využívá sledování odezvy ultrazvukového signálu. Tyto odezvy se potom použijí k modulaci jasu monitoru.

[4]



Obr. 4.1 Optická metoda [4]

4.2 Testování substrátů

- **Stanovení dielektrické pevnosti keramických substrátů**

Jednou z možných zkoušek je stanovení dielektrické pevnosti (nejvyšší hodnoty intenzity elektrického pole, kterou daný materiál snese, aniž by došlo k jeho poškození), při které je testována velikost průrazného napětí substrátů, které mají tloušťku od 50 μm do 100 μm). Při tomto testu jsou keramické pásky a substráty podrobeny působení buď střídavého (v rozsahu od 5 kV do 35 kV), nebo stejnosměrného napětí (v rozsahu od 5 kV do 50 kV). Výsledkem měření je zaznamenaná dielektrická pevnost a tloušťka vzorku. Zkouška se provádí v izolačním oleji.

Pro toto testování může být užít vysokonapěťový přístroj WGBS 4,4/35-50HPS, který se skládá z uzavřeného rozvaděče, z regulátoru napětí, z generátoru vysokého napětí, z děliče napětí a řídicí jednotky. [12]

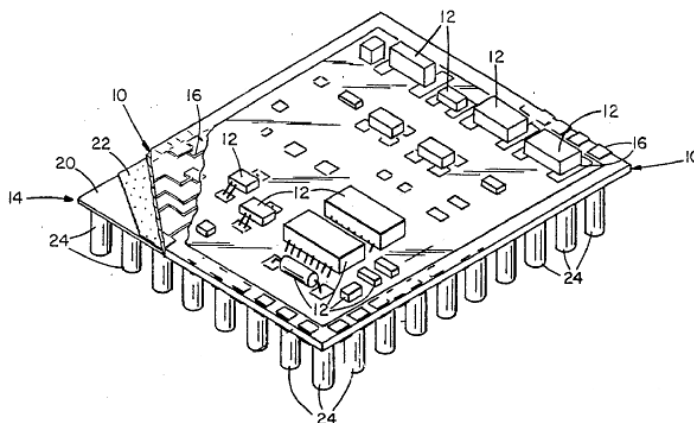
- **Odvod tepla elektronických součástek na keramickém substrátu**

Jedním z problémů u výkonových aplikací je odvod tepla. Možností jak tento problém řešit, je americký patent „Heat dissipation for electronic components on a ceramic substrates“. Zakládá se na tom, že na keramickém substrátu je ještě přilepena další keramická deska.

Obrázek 11. ukazuje provedení. Základem je keramický substrát (10) nesoucí součástky (12) na své horní straně. Ze spodní strany je připevněný rozptylovač tepla (14). Součástky jsou mezi sebou propojené pomocí pokovení (16). Rozptylovač je složen z keramické desky z 95% aluminy (20), z tepelné přilnavé vrstvy (22) a z kovových, tepelně vodivých pinů (24).

Výroba takového rozptylovače začíná správným zajištěním pinů a aplikací pájecí pasty na jejich konce. Pak jsou piny a keramická deska spojeny pájením parou. Když takto připravená část vychladne, může být aplikována přilnavá vrstva. Nakonec je rozptylovač připevněn ke spodní straně keramického substrátu přilnavou vrstvou.

Proces odvodu tepla spočívá v tom, že teplo ze součástek je vedeno přes keramický substrát, keramickou desku a přilnavou vrstvu k pinům, které jsou chlazeny okolním vzduchem. [5]

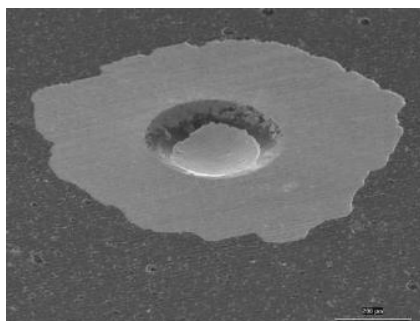


Obr. 4.2 Provedení keramického substrátu se zlepšeným odvodem tepla [5]

- **Vnikací metoda**

Dále existuje několik metod k testování spojení tenké vodivé vrstvy se substrátem. První takovou metodou je „Vnikací metoda“. Tato metoda vyniká rychlostí a nenáročností. Spočívá v tom, že cizí těleso (indentor) je staticky zatlačováno do zkoušeného materiálu a hodnotí se odolnost proti tomu vniknutí. Po proniknutí cizího tělesa zůstává ve vzorku vtisk a mezi vrstvou a substrátem pak mohou vznikat trhliny. Tyto vtisky se pak vyhodnotí tak, že se přiřadí do kategorií s adhezním číslem (to symbolizuje stupeň popraskání).

Vnikacích metod máme několik – Brinellovu, Vickersovu a Rockwellovu. Liší se použitým tvarem a materiálem tělesa, které je použito jako cizí vnikající těleso. Brinellova metoda používá ocelovou kuličku, která je kolmo vtláčována do vzorku. Vickersova metoda používá diamantový čtyřboký jehlan a Rockwellova metoda vtláčuje diamantový kužel nebo ocelovou kuličku postupně nadvakrát. [23]

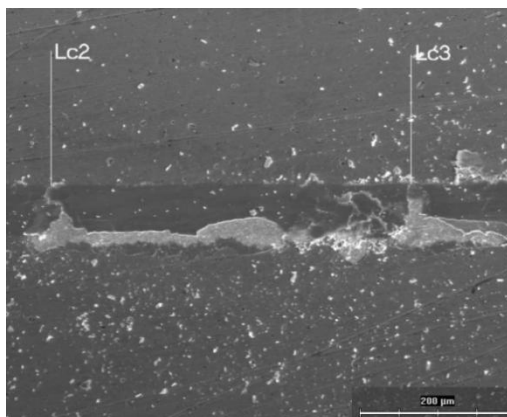


Obr. 4.3 Vzorek porušený po vnikací metodě [23]

- **Vrypová zkouška**

Další metodou je vrypová zkouška. V této metodě je opět užito indentoru, který se konstantně pohybuje a je zatěžován určitou silou, tím tvoří na povrchu vzorku vryp. Pokud

dojde k přesažení moc velkého pnutí, dojde k odtržení vrstvy od substrátu. Tato mezní hodnota se nazývá kritické zatížení a je možno ji zjistit pomocí optického mikroskopu nebo pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. [23]



Obr. 4.4 Vzorek porušený po vrypové zkoušce [23]

- **Testování teplotním šokem**

Testovat keramiku na odolnost proti teplotnímu šoku je možno například dvěma metodami. První metoda spočívá v tom, že si připravíme vzorky ve tvaru disku, které mají v sobě 2 mm zářez ve tvaru písmene V. Vzorky jsou nejdříve zahřány na určitou předehřivací teplotu a pak díky působení infračervených paprsků se trhliny začne rozšiřovat napříč celým vzorkem. Metoda se nazývá IRH (infrared radiation heating). Výsledkem takového testu je parametr R_{2c} (rovnice 4.1), který označuje odolnost proti rozšíření trhliny.

$$R_{2c} = \frac{\lambda K_{IC}}{E\alpha} [W \cdot m^{-0,5}] \quad (4.1)$$

Kde λ je tepelná vodivost, E je Youngův modul, α je koeficient teplotní roztažnosti a K_{IC} je lomová houževnatost materiálu.

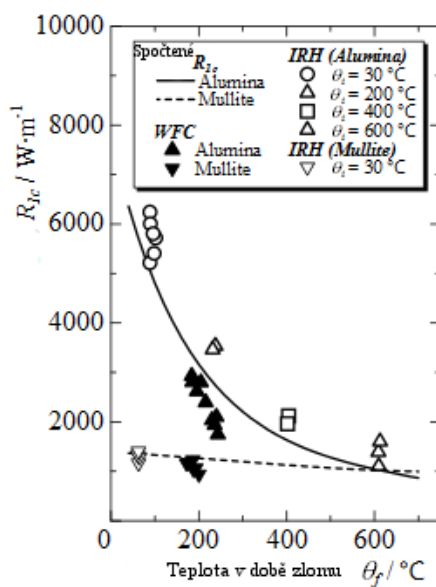
Druhou metodou může být metoda, kdy používáme k chlazení vzorků proud vody. Opět máme vzorky ve tvaru disku, ale jsou bez počátečního zářezu. Teplotu těchto vzorků měníme od počátečních cca 250 – 350 °C na 20 °C za pomoci chlazení proudem vody. A sledujeme počátek množení trhlín na vzorku. Tato metoda se nazývá WFC (water flow cooling method). Výsledkem tohoto měření je parametr R_{1c} (rovnice 4.2), který reprezentuje odolnost proti prasklinám způsobeným teplotním šokem.

$$R_{1c} = \frac{\lambda \sigma_f}{E\alpha} [W \cdot m^{-1}] \quad (4.2)$$

Kde λ je tepelná vodivost, E je Youngův modul, α je koeficient teplotní roztažnosti a σ_f je pevnost v lomu.

V obou metodách jsou trhliny pozorovány pomocí akustického emisního senzoru, který pracuje na principu akustické emise, tzn., že sledujeme akustické signály, které vysílá takto tepelně namáhané těleso.

Výsledkem měření parametru R_{jc} může být například graf, kde jsou pro srovnání teoreticky spočtené a naměřené hodnoty vzorků aluminy a mullitu.



Obr. 4.5 Výsledky testování teplotním šokem [27]

Z grafu vidíme, že naměřené hodnoty skoro odpovídají vypočteným hodnotám. Dá se proto říci, že tyto dvě metody jsou spolehlivým testem pro teplotní šok. [27]

5 Firmy zabývající se výrobou a produkcí substrátů pro výkonovou elektroniku

- *Curamik electronics GmbH*



Curamik electronics GmbH je firma se sídlem v Německém. Zabývá se oblastí týkající se řízení teploty a distribucí výkonové elektroniky a substrátů pro ni.

Jedním z hlavních produktů jsou tedy již zmíněné substráty, které je možno dodat ve velikosti 5.5" x 7.5", přičemž design desek je samozřejmě závislý na požadavcích zákazníka. Jako výsledek stále se zlepšujících technologií uvádí firma několik výhod těchto procesů, mezi něž patří: vysoká tepelná vodivost, vysoká teplota zpracování, vysoké izolační napětí anebo vysoká pevnost v ohybu.

Samotná deska měří tedy 5.5" x 7.5" (138 mm x 190.5 mm), z čehož využitelná plocha je 5 x 7 (127 mm x 178 mm). Celkem je možné desky vyrobit z 3 materiálů případně jejich kombinací – Al_2O_3 , AlN (nitrid hliníku) nebo HPS (oxid hliníku dotovaný z 9% ZrO_2). Podle použitých materiálů je tedy pak možno rozlišovat několik kombinací tloušťky desky a tloušťky mědi, což ukazuje Obr. 6., kde na svislé ose se nachází tloušťka keramiky v mm, na ose vodorovné jsou potom možné tloušťky mědi v mm.

| | Tloušťka mědi [mm] | | | | | |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------|
| | 0.127 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.4 | 0.5-0.6 |
| 0.25 | Al ₂ O ₃ | | | | | |
| 0.32 | Al ₂ O ₃ HPS | Al ₂ O ₃ HPS | Al ₂ O ₃ HPS | Al ₂ O ₃ HPS | HPS | HPS |
| 0.38 | Al ₂ O ₃ | | | | | |
| 0.5 | Al ₂ O ₃ | | | | | |
| 0.63 | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ | |
| 0.76 | Al ₂ O ₃ | | | | | |
| 1.00 | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ AlN | Al ₂ O ₃ | |

Obr. 5.1 Možné kombinace výrobních materiálů a tlouštěk keramiky

Využití jednotlivých substrátů: Al₂O₃ – výkonová elektronika, fotovoltaika, moduly
výkonových polovodičů

AlN – motory vláknů, průmyslové výkonové moduly

- **CoorsTek**



Firma se zabývá se oblastí technické keramiky a jinými speciálně vyvinutými materiály.

Firma nabízí 3 základní druhy keramických substrátů

- Thin-Film Ceramic Substrate – obsah Al₂O₃ je 99,5 % nebo 99,6 %, dodává se v bílé barvě. Je možné dodání v několika velikostech - od 25.4 x 25.4 mm do 114.3 x 114.3 mm. Všechny se vyznačují nulovou absorpcí vody, nulovou propustností plynů, pevnost v ohybu se pohybuje mezi 572 až 682 MPa
- MidFilm Ceramic Substrate - obsah Al₂O₃ je 96 %, barva bílá. Dodání je možné ve stejných velikostech jako u Thin-Film Ceramic Substrate. Stejně tak mají tyto

substráty nulovou absorpcí vody a nulovou propustností plynů. Jejich pevnost v ohybu je 400 nebo 482 MPa.

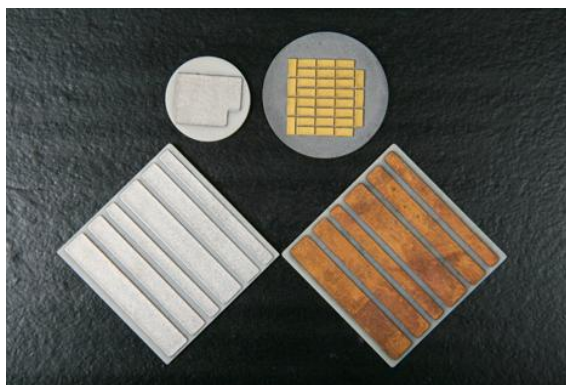
- c) Thick-Film Ceramic Substrate - obsah Al_2O_3 je 91 % nebo 96 %, barva je buď bílá, nebo tmavě hnědá. Dodání je možné ve velikostech - od 88.9 mm x 88.9 mm do 139.7 mm x 165.2 mm. Opět pro všechny velikosti platí nulová absorpce vody, nulová propustnost plynů, pevnost v ohybu je mezi 365 a 400 MPa.

- **Tianjin Century Electronics Co.,Ltd**



Společnost zabývající se importem a exportem hlavně elektronických a energetických zařízení. Mezi její hlavní produkty patří výkonové polovodičové součástky, napájecí moduly, montážní díly, frekvenční měniče, elektrické pece a další.

Mezi velkým množstvím výrobků, které firma nabízí, je samozřejmě i keramický DBC substrát, který má dobrou mechanickou pevnost, je odolný korozi, výborně elektricky izoluje, má dobré tepelné vlastnosti a je velmi spolehlivý.

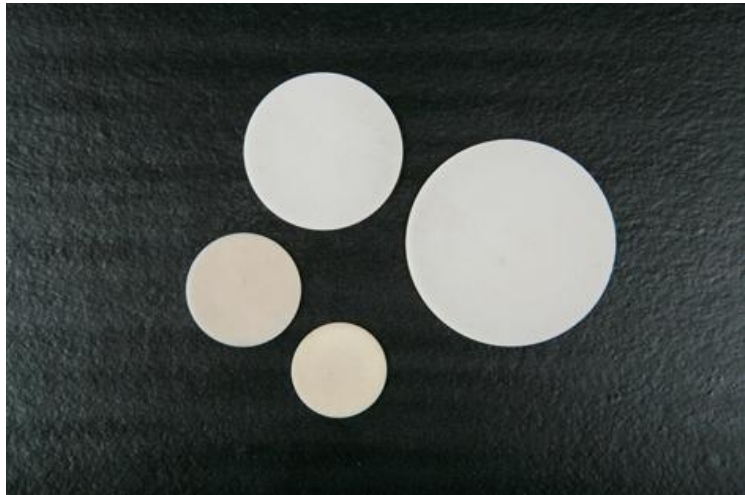


Obr. 5.2 Různé ukázky jednotlivých substrátů [29]

Tab. 5.1 Vlastnosti a specifikace substrátů [29]

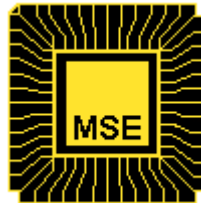
| Technické parametry | | Jednotka | Hodnota | |
|---------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------|
| | | | | |
| Keramika | Obsah | % | 96 Al ₂ O ₃ | 96 AlN |
| | Tloušťka | mm | 0.25, 0.38, 0.5, 0.63, 0.76, 1.0 | |
| | Dielektrická konstanta | | 9.4 | 8.9 |
| | Dielektrická pevnost | kV/mm | > 14 | > 14 |
| | Tepelná vodivost | W/m.K | 24~28 | 150 |
| Měděná vrstva | Tloušťka | mm | 0.3 | |
| | Tepelná vodivost | W/m.K | 385 | |
| DCB | Rozměr | mm x mm | 127 x 198 | 75 x 57 |
| | Koeficient teplotní roztažnosti | x 10 ⁻⁶ /°C | 7.4 (25~200 °C) | 5 (50~500 °C) |
| | Ohýbání | μm/mm | < 150/50 | |
| | Provozní teplota | °C | -55~ +850 | |
| | Pokovování | | Au, Ni, Cu | |

Dalším produktem firmy je i Alumina (Al₂O₃), která je samozřejmě pro substráty také použitelná. Vyrábí se 3 druhy, podle obsahu Al₂O₃ v procentech, a to 93 %, 96 % a 99 %.



Obr. 5.3 Ukázka keramiky pro substráty [29]

- ***Micro Systems Engineering GmbH***

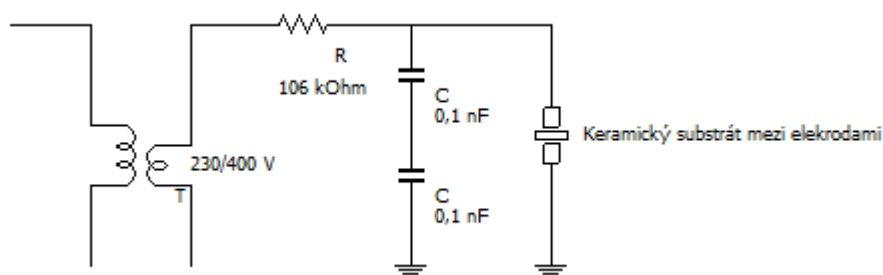


Firma se sídlem v Německu zabývající se dodávkou elektronických modulů. Mezi odvětví, kterými se firma zabývá, patří i výroba a testování Al_2O_3 substrátu. Dodává se v bílé barvě, jeho maximální velikost je 4" x 6", tepelná vodivost je 20-30 W/mK, obsah Al_2O_3 je 96 %.

6 Praktická část

V praktické části bakalářské práce byla měřena dielektrická pevnost vybraných keramických substrátů. Substráty se od sebe lišily ve svých rozměrech a v tloušťkách. Bylo tedy testováno 10 vzorků o rozměrech 40 x 40 x 0,5 mm, dále pak 5 vzorků o rozměrech 100 x 100 x 0,635 mm a nakonec 5 vzorků o rozměrech 60 x 80 x 1 mm. Všechny byly vyrobeny z 96% Al₂O₃.

Před měřením nebylo zapotřebí žádné speciální přípravy. Měřený substrát se pouze vložil pomocí kleští mezi dvě válcové elektrody ponořené do oleje tak, aby se ho elektrody dotýkaly co nejvíce uprostřed. Poté se odstranila zemnicí tyč a zapnul se řídicí modul HighVolt SM4. Z jeho displaye se pak odečetla hodnota průrazného napětí U_p . Stejný postup měření byl pro všechny vzorky.



Obr. 6.1 Zapojení pro měření dielektrické pevnosti

Naměřené hodnoty

Tab.6.1 Změřené a spočítané hodnoty substrátů o rozměrech 40 x 40 x 0,5 mm

| Číslo vzorku | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Hodnota U_p [kV] | 13,68 | 14,9 | 15,77 | 13,16 | 13,8 | 13,6 | 13,56 | 14,22 | 12,67 | 13,35 |
| Hodnota E_p [MV/m] | 27,36 | 29,8 | 31,54 | 26,32 | 27,6 | 27,2 | 27,12 | 28,44 | 25,34 | 26,7 |

Tab.6.2 Změřené a spočítané hodnoty substrátů o rozměrech 100 x 100 x 0,635 mm

| Číslo vzorku | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hodnota U_p [kV] | 18,2 | 15,68 | 17,24 | 22,19 | 18,12 |
| Hodnota E_p [MV/m] | 28,66 | 24,69 | 27,14 | 34,94 | 28,53 |

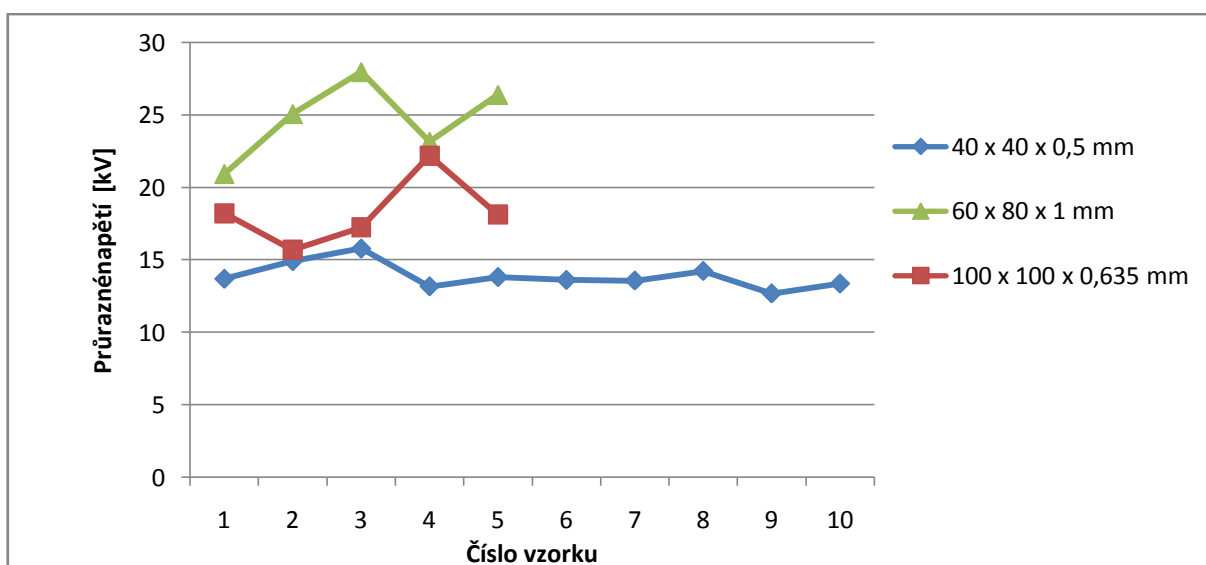
Tab.6.3 Změřené a spočítané hodnoty substrátů o rozměrech 60 x 80 x 1 mm

| Číslo vzorku | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hodnota U_p [kV] | 20,92 | 25,06 | 27,96 | 23,15 | 26,38 |
| Hodnota E_p [MV/m] | 20,92 | 25,06 | 27,96 | 23,15 | 26,38 |

Po skončení měření byla dopočítána velikost dielektrické pevnosti dle vzorce 6.1:

$$E_p = \frac{U_p}{d} [V. m] \quad (6.1)$$

U_p je hodnota naměřeného průrazného napětí a d je tloušťka vzorku.

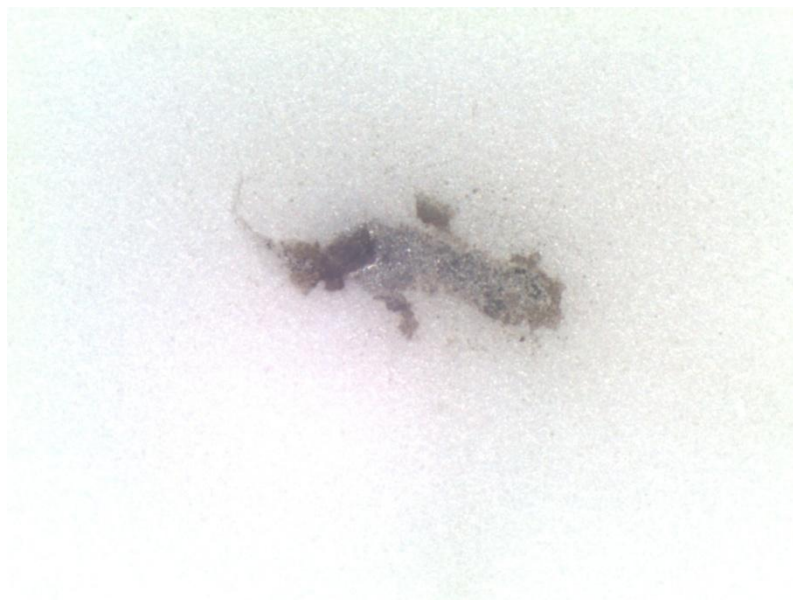


Graf 6.1 Srovnání naměřených průrazných napětí



Graf 6.2 Srovnání spočítaných dielektrických pevností

Výsledkem měření byly nejen hodnoty průrazného napětí a dopočítané dielektrické pevnosti, ale i znatelný průraz na substrátu, který je vidět na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Detail substrátu po dielektrických testech (snímek vytvořený pomocí stereomikroskopu Olympus)

Závěr

Bakalářská práce se v úvodu zabývá pojmem výkonová elektronika. Dále jsou zde vyjmenovány a popsány nejužívanější výkonové součástky: dioda, tyristor a tranzistor. Kapitola 2 je věnována výběru desky plošného spoje, neboť je možné využít několik různých laminátů, každý z nich má svoje výhody a nevýhody. Podle vlastností zmiňovaných v kapitole 2 se jako nejvhodnější jeví BT epoxidové lamináty díky dobré teplotní odolnosti a nízkým výrobním nákladům. Zároveň se tato kapitola zabývá jednotlivými požadavky na substráty pro výkonové aplikace. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří odolnost vůči teplotě a velká tepelná vodivost, neboť výkonové součástky se zahřívají a je nezbytné vzniklé teplo odvádět. Důležitý parametr je i měrný elektrický odpor, odolnost proti korozi a v neposlední řadě cena.

Rozdělení typů substrátů je uvedeno v kapitole 3. Jsou zde zařazeny substráty keramické, ohebné a kovové. Pro výkonové aplikace jsou nejvhodnější DBC substráty zmiňované v podkapitole 3.4, především z důvodu dobré tepelné vodivosti, výborné rezistivity, nízké elektrické kapacity, velké dielektrické pevnosti a relativně dostupným surovinám potřebným k výrobě. Nevýhodou keramických substrátů je jejich malá odolnost proti mechanickému poškození. Kovové substráty z podkapitoly 3.3 jsou perspektivní, protože jsou velmi odolné proti mechanickému poškození a dobře odvádějí teplo. Nevýhodou je malá dielektrická pevnost. Ohebné substráty z podkapitoly 3.2 nejsou používány příliš často. Je to dáno malou teplotní odolností a vyšší cenou.

Kapitola 4 se zabývá testováním desek plošných spojů a použitých substrátů. Je zde věnována pozornost především odvodu tepla elektronických součástech na keramickém substrátu. Součástí substrátu je i vodivá vrstva, proto je nutné testovat i spojení vodivé vrstvy se substrátem. Vhodnou metodou je vnikací nebo vrypová zkouška.

Několik firem zabývajících se výrobou substrátů je popsáno v kapitole 5. Každá z těchto firem dokáže vyrobit substrát v různých velikostech podle přání zákazníka.

V kapitole 6 je popsána praktická část bakalářské práce. Testovala se dielektrická pevnost keramických substrátů. Výsledkem experimentu jsou hodnoty průrazného napětí a dielektrické pevnosti. Z teoretických předpokladů vyplývá, že čím bude vzorek tlustší, tím větší průrazné napětí bude potřeba. Tuto hypotézu provedené měření potvrdilo, protože největší hodnoty U_p byly naměřeny pro vzorek s největší tloušťkou keramiky 1 mm.

Přínosem této bakalářské práce je především přehledné shrnutí problematiky výkonových substrátů v češtině z důvodu toho, že většina zdrojů obsahující toto téma je psána v angličtině.

Použitá literatura

- [1] BARLOW, Fred D a Aicha ELSHABINI. *Ceramic interconnect technology handbook*. Boca Raton: CRC Press/Taylor, c2007, 441 p. ISBN 978-142-0018-967.
- [2] HARPER, Charles A. *High performance printed circuit boards*. Boston: McGraw-Hill, c2000, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 00-702-6713-8.
- [3] Kučerová, E.: Konstrukční materiály pro elektrotechniku, Z prezentace předmětu KET/Elektrotechnické materiály, Plzeň: Západočeská univerzita, 2012
- [4] Starý, Ing. Jiří.: Zásady kontroly a testování, Z prezentace předmětu Plošné spoje a povrchová montáž, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013
- [5] Heat dissipation for electronic components on a ceramic substrate [patent]. US4682269
- [6] Accuratus [online]. [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://accuratus.com/alumni.html>
- [7] *Advantages and new development of direct bonded copper substrates*. [online]. 2003 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271402003438?np=y>
- [8] ALUMINIUM OXIDE (Al₂O₃). In: [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://aries.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/al2o3.html>
- [9] Beryllium oxide. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Beryllium_oxide
- [10] Bioceramics [online]. Praha: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2011 [cit. 2013-04-30]. 58 l. Dostupné z: <http://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/105/public/6.1.-6.3.%20oxid%20hlin%C3%ADku.pdf>
- [11] DBC Ceramic Substrate. In: [online]. [cit. 2013-04-3]. Dostupné z: <http://www.eleceramic.com/blog/post/Direct-Bonded-Copper.html>
- [12] Determination of Dielectric Strength of Ceramic Substrates. [online]. 2011 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: http://www.bam.de/en/fachthemen/referenzverfahren/referenzverfahren_medien/605en.pdf
- [13] *DPC Substrate Supply - Smaller, Thinner Plating* [online]. 2013 [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://metallized-ceramic.ready-online.com/>
- [14] Fyzikální metody nanášení tenkých vrstev. [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/03_Fyzikalni_%20metody_nanaseni_tenkyh_vrstev.pdf

- [15] HUPL CZ [online]. [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.hupl.cz/>
- [16] IMS – Insulated Metal Substrate [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2011/09/NCAB_Group_IMS.pdf
- [17] Izolační desky. [online]. 2009 [cit. 2013-04-06]. Dostupné z: <http://www.labara.cz/cs/vrstvene-izolanty/izolacni-desky/155-sklotextit-r-fr4>
- [18] KERAMIKA. [online]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/keramika.html#pojmy>
- [19] MACHÁČ, Miroslav. MĚŘENÍ TVRDOSTI MATERIÁLŮ A ZPRACOVÁVÁNÍ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306.
Bakalářská práce. VUT.
- [20] Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti. [online]. 2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25453
- [21] Naprašování tenkých vrstev. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484
- [22] NatNet [online]. 2006 [cit. 2013-03-6]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/23>
- [23] Oddělení povrchového inženýrství [online]. [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/>
- [24] Optická inspekce. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/10a_opticka_inspekce.pdf
- [25] Pouzdění v elektronice - substráty, tepelný management a moderní typy pouzder. [online]. [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%C3%AD%20pouzdra%20a%20substr%C3%A1ty%28Bc%29.pdf>
- [26] Tape Casting. [online]. 2013 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.paperandfilm.com/tapecasting.aspx>
- [27] Thermal shock testing of ceramics. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.atyc.org/2006aycect/abstract/p09c_honda.pdf
- [28] Thick Film Ceramic Substrates - Design Guide by CoorsTek. [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5113>
- [29] *Tianjin Century Electronics Co.,LTD* [online]. 2012 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.china-rectifier.com/>
- [30] Toshiba : Japan Top Page [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z:

<http://www.toshiba.co.jp/index.htm>

- [31] Výkonové elektronické součástky. [online]. 2000 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00014/index.html>
- [32] Výkonové polovodičové součástky. [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=20050225>