

# **MPC-MTE**

## **SZZ**

Vypracované otázky k SZZ 2022

Mikroelektronika, FEKT VUT

Text: —  
Korektura: —

19. května 2022

# Obsah

1	Pasty pro hybridní integrované obvody	1
2	Sítotisk	6
3	Vlastnosti tlustovrstvých rezistorů	10
4	Metoda výroby keramických substrátů (Tape casting)	14
5	Základní porovnání parametrů tenko a tlusto vrstvé technologie	15
6	Kontaktování polovodičových čipů	16
7	Leaching	22
8	PROUDOVÝ ZDROJ IPTAT	23
9	PROUDOVÝ ZDROJ IPTAT	24
10	OPERAČNÍ ZESILOVAČ	25
11	OPERAČNÍ ZESILOVAČ	26
12	OPERAČNÍ ZESILOVAČ	27
13	BAND GAP REFERENCE	28

# 1 Pasty pro hybridní integrované obvody

-složení a význam jednotlivých složek, příprava a míchání past

## 1.1 Složení a význam jednotlivých složek

**Funkční složka:**

- vodivá
- odporová
- dielektrická
- izolační

**Tavivová:**

- nízkotavné sklo

**Pojivová:**

- ředidla (terpineol)
- organické složky (celulóza)
- modifikátory

### 1.1.1 Funkční

- Kovy - vodivé vrstvy
- Oxidy kovů - odporové vrstvy
- Izolanty - dielektrické nebo krycí vrstvy

Jedná se o prášek zrnitosti cca od 1 - 10  $\mu\text{m}$  (udávaný stření průměr kolem 5  $\mu\text{m}$ ).

Tvar částic může být velmi různorodý vzhledem k metodě přípravy prášku (kuličky, vločky, oblé struktury) a to jak krystalické, tak amorfni povahy.

Tvar, velikost a rozložení částic jsou velmi důležité pro dosažení požadovaných parametrů vypálené vrstvy.

### 1.1.2 Tavivová složka

Používají se dva základní způsoby, které mohou být použity samostatně nebo je možné je kombinovat. (skloviny, oxidy kovů)

## **Sklovina**

Mají relativně nízkou teplotu tavení cca 500 - 600 °C. S těmito materiály jsou spojeny dva adhezní mechanismy:

### **Chemická vazba**

- roztavená sklovina reaguje chemicky se sklovinou obsaženou v substrátu
- je obecně více náchylná k poškození vlivem mechanického působení (namáhání /stresu)

### **Fyzikální vazba**

- roztavená sklovina zatéká do (a kolem) nerovností substrátu, vtéká do dutin a prohlubní a zachytává se na malých výbězcích substrátu
- je náchylnější k degradaci tepelným zatěžováním / cyklováním

Celková přilnavost / adheze vrstvy je dána součtem těchto dvou faktorů.

Tato složka se skládá z nízkotavného skla např. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s přídavkem modifikátorů PbO, CdO, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>...

Vodivé vrstvy s touto tavivovou složkou jsou náchylné k vytlačování skloviny na povrch vrstvy - s touto skutečností mohou být spojeny problémy s následnou montáží dalších součástek a komponent, realizace vrstvého potenciometru, apod.

## **Oxidy kovů**

Používají se oxidy mědi (Cu) nebo kadmia (Cd), které se přidávají do pasty.

Tyto oxidy při výpalu reagují s atomy kyslíku na povrchu substrátu a vytváří tak oxidovou vazbu - funkční vrstva / substrát.

Výpal se pohybuje typicky v rozmezí 950 - 1000 °C. Tato skutečnost je z pohledu náročnosti a ekonomiky výroby vnímána problematicky (vysoká teplota výpalu = rychlé opotřebení pece = vysoké výrobní náklady).

## **Kombinace sklovin a oxidů kovů**

Jsou zde zastoupeny především oxidy ZnO a CaO, které interagují s kyslíkem již při nižších teplotách,

Jejich vazba ovšem není tak pevná jako např. v případě oxidu mědi.

Je zde přidáno menší množství skloviny (než ve fritových pastách) k vylepšení adheze vrstvy k substrátu.

Tento typ tavivové složky je známý jako “mix bonded system”.

Zahrnuje výhody obou předchozích systémů při menší vypalovací teplotě.

Vodivé vrstvy s touto tavivovou složkou jsou vhodné pro technologii kontaktování pomocí mikrodrátků.

### **1.1.3 Pojivová složka**

Jsou to v zásadě tixotropní kapaliny, které mají 2 účely:

- udržují pohromadě funkční a tavivovou složku v suspenzi, dokud není vrstva vypálená
- propůjčují pastě vhodné tiskové vlastnosti (sítotisk)

Obsahuje netěkavé organické sloučeniny, které vyhoří až na teplotách kolem 350 °C.

Tato složka musí během výpalu shořet beze zbytků (uhlíkových), které by mohly kontaminovat realizovanou vodivou vrstvu (zhoršení izolačních vlastností mezer, atd).

Samostatným tématem jsou pak vrstvy, které je třeba vypalovat v ochranné atmosféře, která může obsahovat pouze stopové množství (ppm) zbytkového kyslíku. V těchto případech totiž nemohou pojivové složky vyhořet, ale musejí se bezzbytku odpařit.

### **Rozpouštědla a ředidla**

Organická pojiva jsou ve své přirozené formě pro potřebu depozice sítotiskem příliš hustá - toto vyvolává potřebu použití rozpouštědel a ředidel. Těmito složkami tedy upravujeme finální tiskové parametry pasty, kterou používáme pro realiaci vrstvy.

Ředidla a rozpouštědla jsou naopak od organických pojiv těkavá a vypařují se velmi rychle již od teplot nad 100 °C. Typickými materiály pro tento účel jsou terpineol nebo některé druhy složitých alkoholů, ve kterých se netěkavá složka rozpouští.

Je zde žádán velmi malý odpar při pokojové teplotě - důvodem je riziko vysychání a tím změny viskozity např. v průběhu tisku (doba zpracovatelnosti pasty).

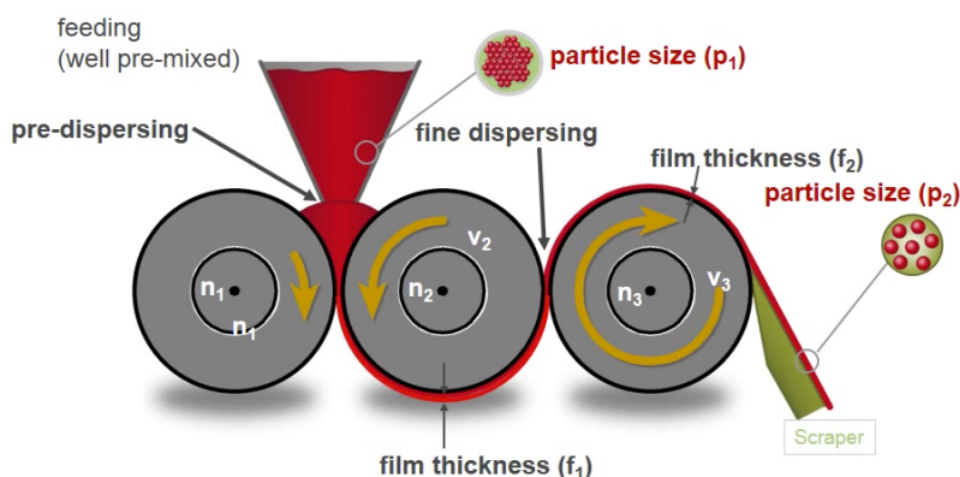
Dodatečně se do rozpouštědel přidávají další modifikátory (změkčovadla / plastifikátory), povrchově aktivní látky a další činidla, které modifikují tixotropní povahu past.

Všechny uvedené složky (funkční, tavivová a pojivová) se v TLV pastě mísí dohromady v odpovídajícím poměru a propracovávají se spolu na tříválcovém mlýnku po dostatečně dlouhou dobu, která zajistí důkladné promíchání s rovnoměrným rozložením jednotlivých složek v objemu pasty.

## 1.2 Příprava a míchání past

Pasty jsou připravovány z práškových materiálů mícháním a roztíráním (rozpracováním) těchto komponent s pojivem (např. terpeneol), které dodá příslušné pastě potřebnou viskozitu.

Materiálové kompozice jsou připravené ve formě práškových frit, pokud možno s co nejdefinovanějším tvarem jednotlivých částic (o průměru  $< 5 \mu\text{m}$ ) tak, aby byly zaručeny jak dobré tiskové vlastnosti, tak také homogenita pasty při jejím nanášení a následném výpalu

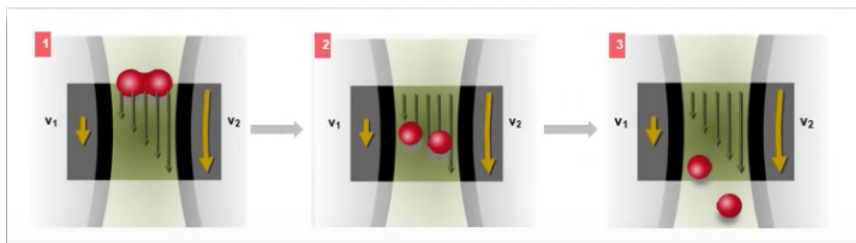


Obrázek 1: Třívalcový mlýnek

### 1.2.1 Rovnoměrnost rozložení jednotlivých složek v objemu pasty

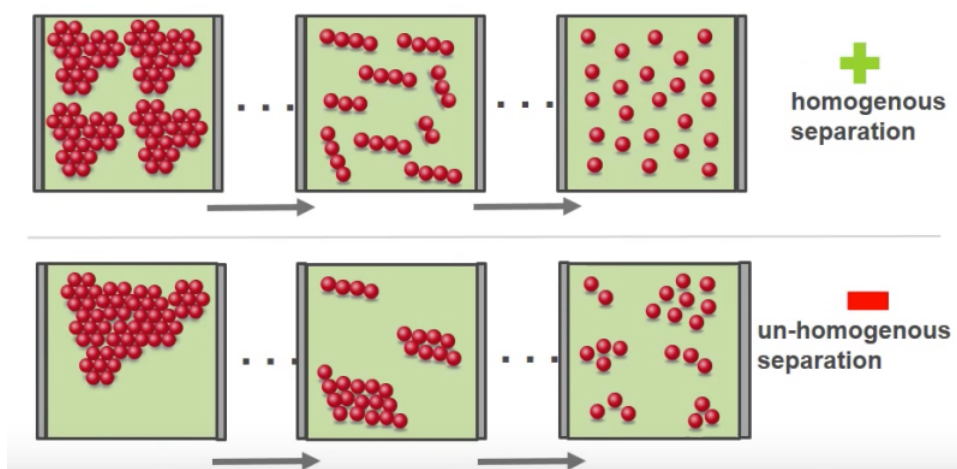
Velikost mezery definuje maximální velikost shluků materiálu, který projde.

Rozseparování částic shluků proběhne díky rozdílné rychlosti válců (stříhová síla).



Obrázek 2: Separace částic pasty

Kvalita separace částic a homogennost jejich rozložení v pastě je dána nastavením parametrů zařízení a počtem cyklů.



Obrázek 3: Homogenní a nehomogenní pasta

## 2 Sítotisk

-popis technologie depozice TLV past, parametry procesu, následné tepelné zpracování vrstev

### 2.1 Popis technologie depozice TLV past

Nevakuový, relativně nenáročný způsob nanášení definovaného množství materiálu přes sítotiskové šablony na nosný substrát.

#### Sítotiskový stroj:

- Konstrukce pro uchycení rámu nesoucího šablonu
- Přípravek pro uchycení substrátu
- Pohyblivou část pro vedení stěrky

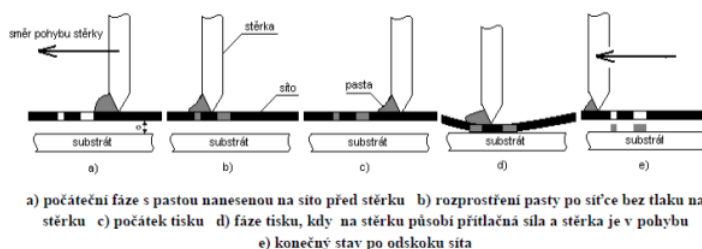
Rám s napnutým sítím, na němž je vytvořena šablona s tiskovým motivem je umístěn v definované poloze vzhledem k držáku pro uchycení substrátu. S tím je spojen také mechanismus pro uchycení stěrky. Stroj musí být robustní, a rovněž vedení stěrky musí být dostatečně tuhé.

Pasta nanesená na síto je protlačena přes síto stěrkou na substrát. Po odskoku síta zůstane na substrátu požadovaný motiv.

Síta jsou tkaná z ocelových nebo z umělých vláken a vyznačují se pravidelnou osnovou s definovanými parametry. Síto je umístěno nad substrátem ve vzdálenosti  $o$ , která se nazývá **odtrh ( $o$ )**. Tato vzdálenost se pohybuje kolem 0,8 mm, a musí být natolik dostatečná, aby byl zajištěn pružný odskok síta od substrátu po přechodu stěrky.

**Rámeček** (hliník, plast, textgumoid) - funkcí je udržet napnutí síťoviny v potřebném místě

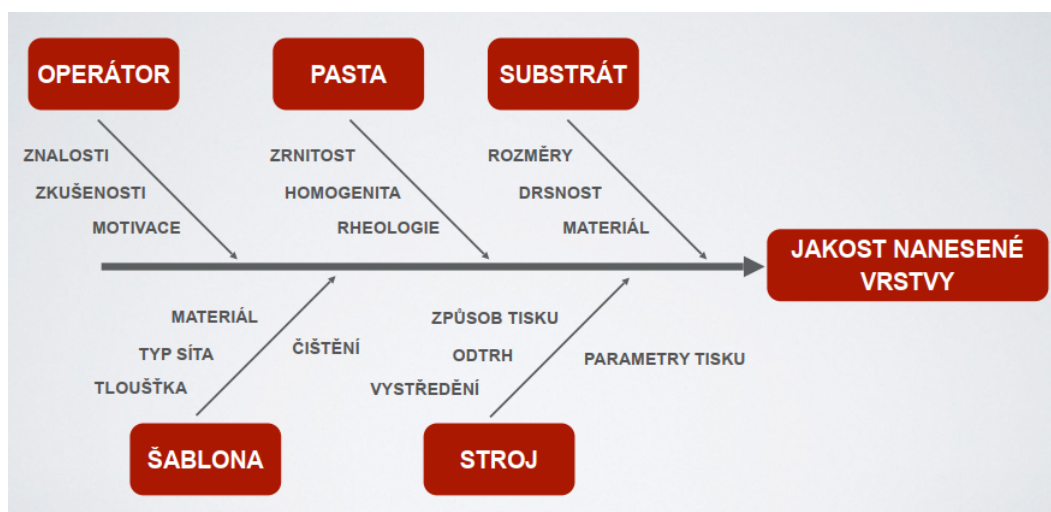
**Tkanina** (nerez, polyester, polyamid) - funkcí je udržet napnutí síťoviny v potřebném místě



Obrázek 4: Princip nanášení sítotiskem



## 2.2 Parametry procesu



Obrázek 5: Faktory působící v průběhu tisku

### 2.2.1 Síto a jeho parametry

**Rámeček** (hliník, plast, textgumoid) - funkcí je udržet napnutí síťoviny v potřebném místě

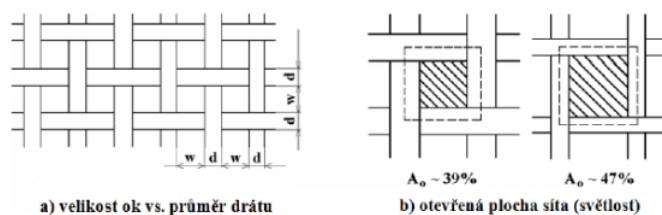
**Tkanina** (nerez, polyester, polyamid) - funkcí je udržet napnutí síťoviny v potřebném místě

**Ovrstvení** - vytváří požadovaný tiskový motiv

**Vazba tkaniny** - (plane wave, twill wave, panama wave)

**Počet ok** – (hustota tkaniny),  $n$  [n/cm], určuje počet ok na cm nebo palec (Hrubá síta – 50 ok/cm, Jemná síta 155 ok/cm)

$$n = \frac{10}{w + d} \quad (1)$$

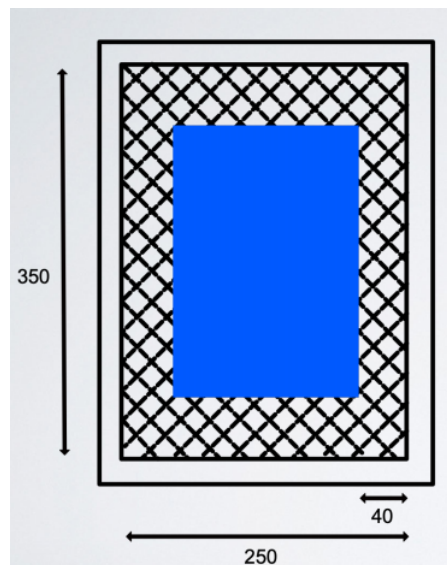


Obrázek 6: Parametry síta

**Průměr vlákna** – (tloušťka tkaniny → definuje výšku nanesené vrstvy)

**Světlost síta:** otevřená plocha síta Materiály: nerezová ocel nebo polyester

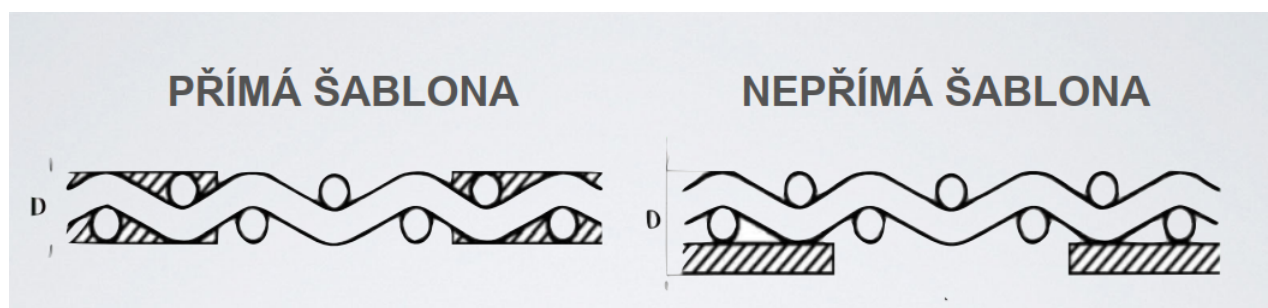
Tisková plocha nesmí být příliš velká. V opačném případě by byla přitlačná síla těrky neúměrně velká. Běžně by tisková plocha neměla přesahovat  $\frac{2}{3}$  plochy síta.



Obrázek 7: Efektivní plocha síta

**Přímá sítotisková šablona** je vytvořena nanesením světlocitlivé emulze na síťovinu (vtlačena do ok), na kterou je pomocí fotocesty přenesen požadovaný motiv. Jeden ze způsobů nanášení je pomocí korýtka s fototocitlivou emulzí – realizuje se několik vrstev

**Nepřímá šablona** - v případě nepřímé sítotiskové šablony se její realizace odehrává mimo samotné síto (motiv vytvořen na fólii) a tato je na něj následně upevněna.



Obrázek 8: Přímá a nepřímá šablona

## 2.3 Tepelné zpracování

Po nanesení tlustovrstvových materiálů na keramický substrát následuje po zasušení a vyrovnaní nanesené vrstvy při pokojové teplotě (min 15 min)-leveling, jejich teplotní zpracování, krátce nazývané výpal nebo sintrace. Tato operace probíhá v průtahové peci s definovaným teplotním profilem, kde dochází k tvorbě vlastní struktury.

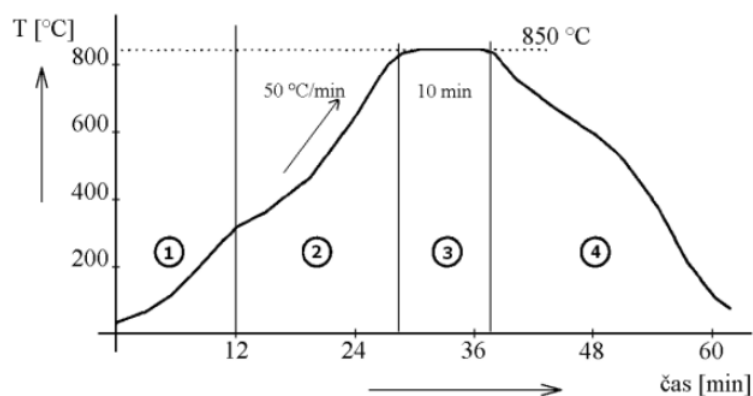
Běžná doba výpalu se pohybuje kolem 50 minut a teplota žárového pásma je kolem 800 °C podle druhu vypalované pasty. Nejrozšířenější je atmosféra vzduchová, ale pro materiály, které mají sklon k oxidaci, je třeba používat ochranou atmosféru, například dusíkovou.

V průběhu výpalu dochází k chemické reakci směsí pasty a k vytváření spojení vrstvy se substrátem a na povrchu se formuje aktivní struktura. Vypálená vrstva je tvrdá a odolná vůči mechanickým a chemickým vlivům.

**Sušení** - teplota se pohybuje od 70 do 150 °C, doba sušení 15 až 30 minut. Dochází k úniku organických ředidel těkavého charakteru z nanesené pasty. **Zóna předehtřívací** – teplota kolem 350 °C, dochází k odpaření zbylých stop organických rozpouštědel, vyhořívá filmotvorný materiál

**Zóna vypalovací** – teplota 850 °C, začíná tvorba slitin a slinování funkčních složek pasty, probíhají důležité chemické reakce ovlivňující výsledné vlastnosti pasty

**Zóna chladicí** – dochází k ochlazování substrátů postupně až na teplotu okolí, tuhne roztavená skelná fáze ve vrstvě.



Obrázek 9: Výpal TLV



Obrázek 10: Sled operací u TLV

### 3 Vlastnosti tlustovrstvých rezistorů

-vysvětlíte význam TCR, VCR, rozdíl mezi TCR a teplotní stabilitou, výkonová zatížitelnost

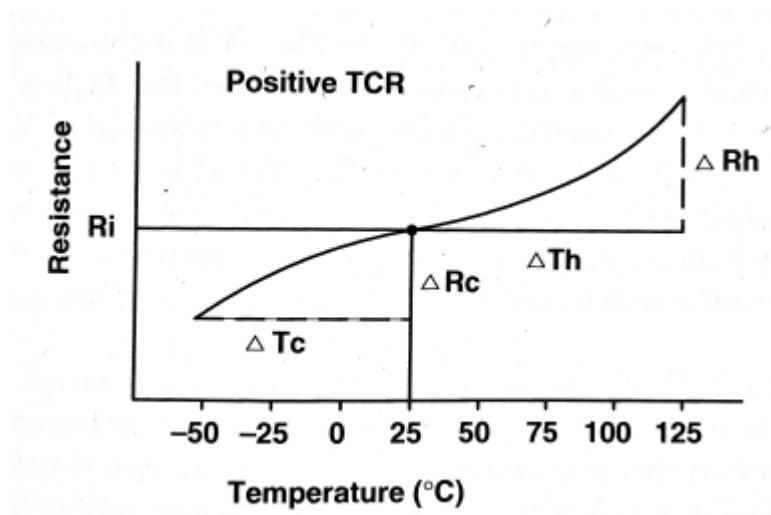
#### 3.1 TCR

TCR = Temperature Coefficient of Resistance (Teplotní koeficient odporu)

Všechny reálné materiály vykazují alespoň nějakou změnu odporu v závislosti na teplotě, přičemž u většiny z nich má více či méně nelineární charakter.

TCR je funkcí teploty a je definován jako sklon křivky v místě sledované teploty.

Obecně je jeho hodnota velmi malá. Je zvykem TCR vzáhnout na počáteční (okolní) teplotu a vyjádřit ho v ppm.



Obrázek 11: Pozitivní TCR

$$TCR(T) = \frac{dR(T)}{dT} \sim \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (2)$$

$$TCR = \frac{R(T_2) - R(T_1)}{R(T_1) * (T_2 - T_1)} * 10^{-6} ppm/^{\circ}C \quad (3)$$

Současně vyráběné odporové pasty mají velmi pečlivě vyvážen poměr mezi jednotlivými složkami pasty tak, aby se TCR pokud možno co nejvíce blížilo nule - v pracovní oblasti teplot.

Vzhledem k nelinearitě TCR je třeba si uvědomit, že se bude jeho hodnota lišit v kladných a záporných teplotách! Proto se TCR odporových past udává (zaručuje) pouze v definovaném teplotním rozsahu.

Dále je třeba poznamenat, že vzhledem k povaze TCR je linearizovaná hodnota přinejlepším pouhou aproximací reálného průběhu.

TCR je u odporových past výrobci nejčastěji udáváno v následujících rozsazích:

- v kladných hodnotách od 25 °C do 125 °C
- v záporných hodnotách od 25 °C do - 55 °C

Obecně by se dalo říci, že kovy vykazují pozitivní TCR. Naopak například polovodiče negativní TCR.

U **kovů** si tuto skutečnost vysvětlujeme větší amplitudou kmitání elektronů v atomové struktuře v důsledku dodané tepelné energie. Tím dochází ke zvýšení pravděpodobnosti srážek s protékajícími elektrony, což se projeví jako zvýšení odporu (**pozitivní TCR**).

U **polovodičů** naopak dodáme elektronům vázaným v krystalické struktuře materiálu tepelnou energii, která se projeví jejich zvýšenou mobilitou. Tím se se zvyšující teplotou stávají lepšími vodiči (**negativní TCR**).

Pokud chceme dosáhnout co nejlepšího souběhu TCR:

- stejné pasty a pasty se stejným odporem na čtverec mají lepší souběh TCR
- odpory se stejnými nebo podobnými délkami mají lepší souběh TCR
- rezistory s blízkými nebo stejnými tloušťkami vrstev mají lepší souběh TCR

## 3.2 VCR

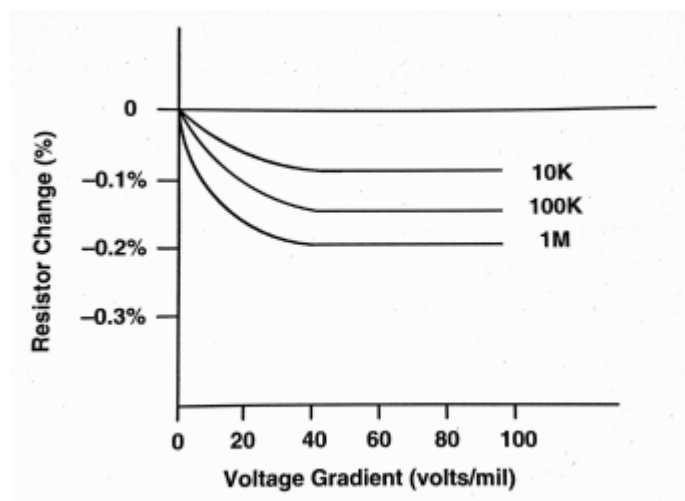
VCR = Voltage Coefficient of Resistance(Napěťový koeficient odporu)

Určité odporové materiály vykazují také závislost na růstu velikosti elektrického pole (V). Rovnice vyjadřující tuto závislost je velmi podobná rovnici pro TCR.

V důsledku přítomnosti polovodičové složky materiálu v odporových pastách je VCR vždy negativní. To znamená, že pokud V2 vzrůstá, odpor pasty klesá.

Tento efekt ze zvětšuje u past s vyššími hodnotami odporu na čtverec.

$$VCR = \frac{R(V_2) - R(V_1)}{R(V_1) * (V_2 - V_1)} * 10^{-6} ppm/^{\circ}C \quad (4)$$



Obrázek 12: VCR

Z výše uvedeného vyplývá, že závislost VCR bude nepřímo úměrná také délce rezistoru.

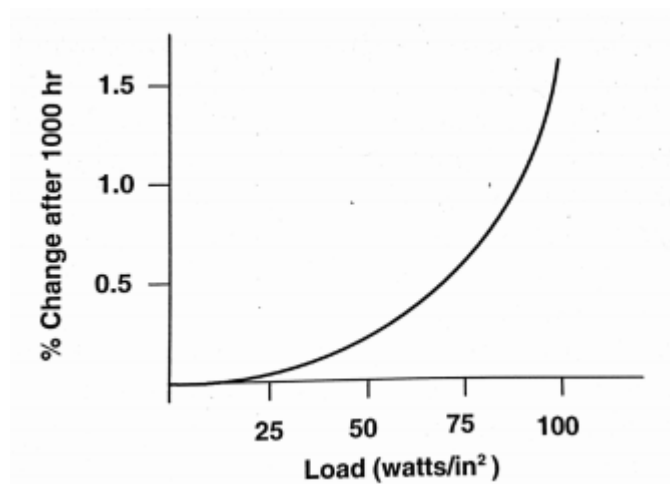
### 3.3 Teplotní stabilita

Teplotní stabilita je u TLV rezistorů sledována z důvodu predikce změny jejich hodnoty vzhledem k dlouhodobé tepelné zátěži (spolehlivost). Rozdíl ovšem je, zatěžíme-li rezistor vnějším teplem (cyklovací komora) nebo jeho vlastním příkonem.

**V prvním případě** dochází k pozvolnému nárustu teploty a rovnoměrnému zvýšení teploty v celém objemu materiálu. V případě zátěže vlastním příkonem ovšem dochází k mnohem většímu lokálnímu zahřívání určitých oblastí.

Jelikož mají nízkoohmové rezistory více funkční složky (více přímých kontaktů), mají menší tendenci ke změně své hodnoty než rezistory realizované pastami s vyšším odporem na čtverec - při stejném výkonovém zatížení.

Pro většinu odporových systémů je tvar průběhu závislosti odporu na výkonovém zatížení “vzrůstající exponenciála”.



Obrázek 13: Teplotní stabilita



## **4 Metoda výroby keramických substrátů (Tape casting)**

- popis procesu, cílové aplikace, typy keramických substrátů a jejich parametry

## 5 Základní porovnání parametrů tenko a tlusto vrstvé technologie

- materiály, tloušťka, rozlišení, TCR, teplotní stabilita a další

Srovnání TENKO / TLUSTO - vrstvé technologie	
Tenkovrstvá technologie	Tlustovrstvá technologie
tloušťka ~ 5 nm až 2,4 $\mu\text{m}$	tloušťka ~ 2,4 $\mu\text{m}$ až 24 $\mu\text{m}$
nepřímý (subtraktivní) proces - fotolitografie, leptání	přímý (aditivní) proces - sítotisk, sušení výpal
problém se zpětným získáváním drahých kovů z leptacích lázní	snadné znovuzískání drahých kovů (odpad při čištění sít a dalších pomůcek)
obtížné vytváření multilayer struktur - polyimid (MCM)	velmi levné a snadné vytváření multilayer struktur
odporové materiály NiCr; TaN ( $100\text{--}300 \Omega/\square$ )	$1 \Omega/\square$ až $20 \text{M}\Omega/\square$
odporové vrstvy citlivé na chemickou korozi	rezistory pro nepříznivé podmínky a vysoké teploty
TCR do $\pm 50 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$	$\text{TCR}$ cca $\pm 50 \text{ ppm}$ až $300 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$
rozlišení 25,4 $\mu\text{m}$ (2,54 $\mu\text{m}$ - iontové leptání)	rozlišení cca 120 - 300 $\mu\text{m}$
velké počáteční pořizovací náklady > \$2 miliony	nízké počáteční pořizovací náklady < \$0,5 milionu
lepší rozlišení, vhodné pro RF	rozlišení není úplně vhodné pro RF
lepší kontaktovatelnost	kontaktovatelnost je závislá na nečistotách pasty
homogenní vodiče	heterogenní vodiče

Obrázek 14: Srovnání TENKO / TLUSTO - vrstvé technologie

## 6 Kontaktování polovodičových čipů

-popis základních metod, materiály, faktory působící na kvalitu spoje

V současné době se používají nejčastěji čtyři způsoby připojování čipů do pouzdra:

- Wire Bonding (WB)
- Flip Chip (FC)
- Beam Lead (BL)
- Tape Automated Bonding (TAB)

V případě mikrodrátkového propojení (WB) se proces osazení čipu skládá ze dvou kroků:

- v prvním kroku je třeba připevnit čip do pouzdra (lepení, pájení)
- v druhém kroku se elektricky propojují plošky čipu s vývody pouzdra

### 6.1 TAB

Hnací silou této technologie bylo levné propojení čipu s pouzdrem nebo DPS, které bylo dosaženo jednorázovým propojením všech vývodů.

Proces byl mnohem levnější a rychlejší než v té době velmi pomalý a tím také drahý způsob propojení pomocí mikrodrátků (WB).

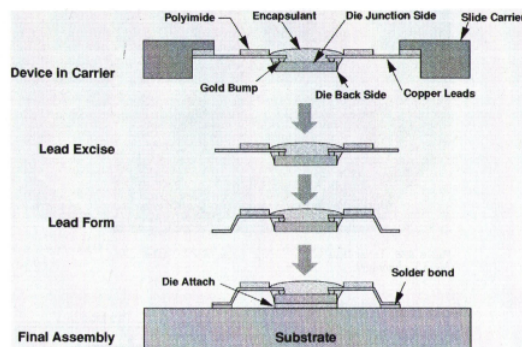
Vynikající vlastnosti jako např. nižší parazitní indukce vývodů, přesná geometrie vývodů, pevnější propojení (spolehlivost) a možnost impedančního přizpůsobení vývodů.

Pro výrobu vývodů se používá fotoprocesu a leptání vodivé vrstvy na dielektrické nosné pásce “filmového” formátu.

Výsledná struktura obsahuje vnitřní vodiče (na čip) s roztečí 50 až 100  $\mu\text{m}$  a vnější vodiče (pouzdro / DPS) s roztečí 150 až 500  $\mu\text{m}$ .

Po připojení vnitřních vývodů k čipu byly vývody vystřižením elektricky odděleny a elektricky otestovány.

Rozvojem Flip Chip technologie a významným pokrokům v automatizaci WB přišla TAB technologie o výsadní postavení ve Fine Pitch aplikacích. Komplikace také přináší návrh vývodů pro každý nový čip a rozložení vývodů. Také planarita na straně DPS či pouzdra je velmi důležitým faktorem. Výhodou zůstala možnost povádět elektrický test čipu nabo jeho zahoření před samotným připojením do obvodu nebo pouzdra.



Obrázek 15: TAB

## 6.2 Flip Chip

Jedná se o přímou metodu elektrického propojení a mechanického připevnění čipu do obvodu či pouzdra.

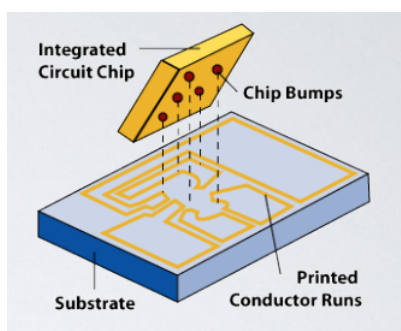
Vzhledem k nutnosti vytvoření dostatečně velkých plošek u WB je možné u FC dosáhnout jedé z největší hustot integrace vývodového propojení.

Čip se umísťuje do obvodu aktivní plochou s vývody dolů (face down).

Bumpy mohou být připájeny nebo přilepeny pomocí vodivého lepidla - zvolená metoda závisí na požadavcích spolehlivosti u dané aplikace.

Lepení FC pomocí vodivého epoxidového lepidla je levný, ale méně spolehlivý proces montáže.

Anizotropní vodivé lepidlo slouží zároveň jako underfill.

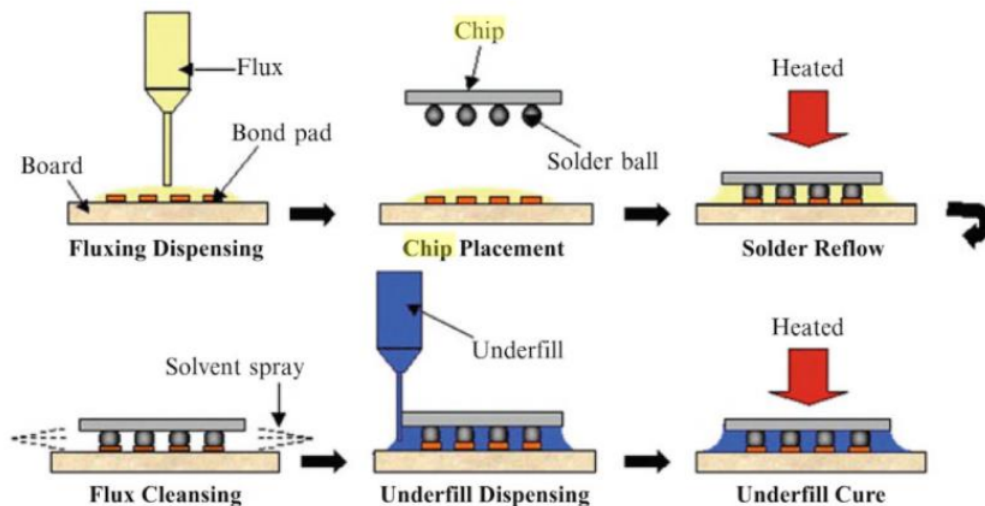


Obrázek 16: Flip Chip

V případech, kdy je požadována vysoká spolehlivost, bývají používány především pájkové bumpy, které se vytváří přímo na čipu.

Při montáži čipů na keramické substráty a pouzdra se nejčastěji používají bumpy s vyšší teplotou tavení. Důvodem je možné natavování během následné montáže na DPS.

Po připojení Flip Chipu se pro vylepšení mechanických vlastností a chemické odolnosti se nanáší na hrany FC epoxidové hmoty (underfills). Tyto zatékají díky kapilárnímu efektu do mezery mezi čipem a podložkou, kterou dokonale vyplní.



Obrázek 17: Flip Chip-underfills

Vzhledem k požadavku co nejlepšího souladu TCE křemíku, DPS a underfillu je nutné epoxidovou hmotu underfillu doplnit křemíkovým práškem, který TCE patřičně upraví.

Po připojení Flip Chipu se pro vylepšení mechanických vlastností a chemické odolnosti se nanáší na hrany FC epoxidové hmoty (underfills). Tyto zatékají díky kapilárnímu efektu do mezery mezi čipem a podložkou, kterou dokonale vyplní.

### 6.3 Wire bonding

Máme 3 základní typy:

- Ultrazvukové
- Termokompresní
- Termosonický

Bondování se dále rozděluje na:

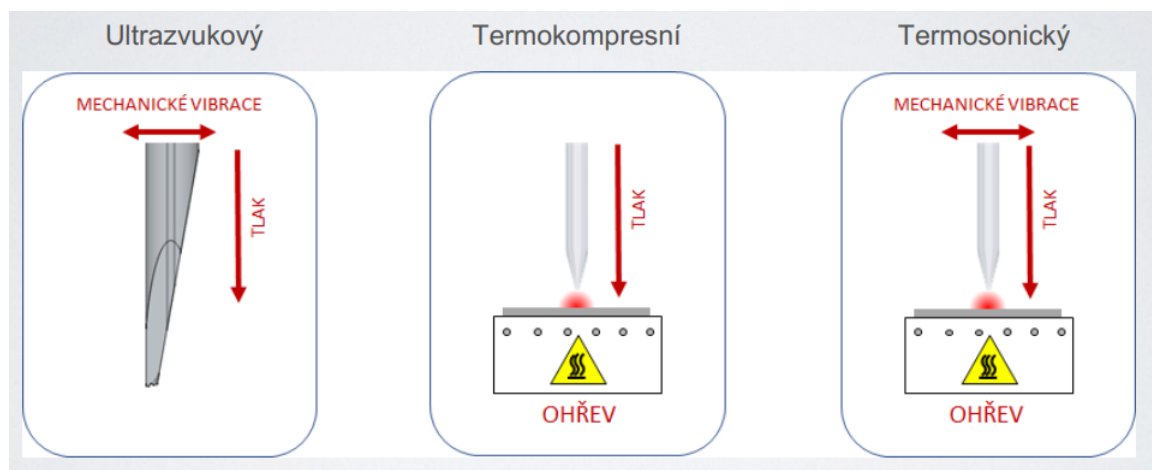
- Hranové
- Kuličkové

### 6.3.1 Termokompresní

**Termokompresní** sváření je jeden ze způsobů při kterém dochází k vytvoření sváru mezi mikrodrátkem a kontaktovací ploškou kombinací teploty a tlaku. Svár je vytvořen vzájemnou difúzí krystalové mřížky mikrodrátku a kontaktovací plošky. Teplota ohřevu kontaktovací plošky ( $250\text{ }^{\circ}\text{C} - 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) i mikrodrátku, který se od ní při kontaktování ohřívá je nižší než její teplota tavení a zbylá energie je dodána energií tlakovou. Používá se Au mikrodrátek o průměru  $25\text{ }\mu\text{m}$ .

### 6.3.2 Ultrazvukové

**Ultrazvukové** sváření je realizováno intenzivním kmitavým pohybem ( $30\text{ kHz} - 120\text{ kHz}$ ), kdy dojde k přenosu ultrazvukové energie na rozhraní drátek - kontaktní ploška a nastává prolínání atomů mezi dvěma kovy (na základě smykového tření). Používá se zejména k připojení Al mikrodrátků na kontaktní plošky tenkých a tlustých kovových vrstev z Au, Ag, Ni nebo Pd. Spoj se vytváří při pokojové teplotě.



Obrázek 18: Rozdělení procesů

### 6.3.3 Hranové bondování

Zjednodušený postup wedge bondingu (kontaktování na hranu).

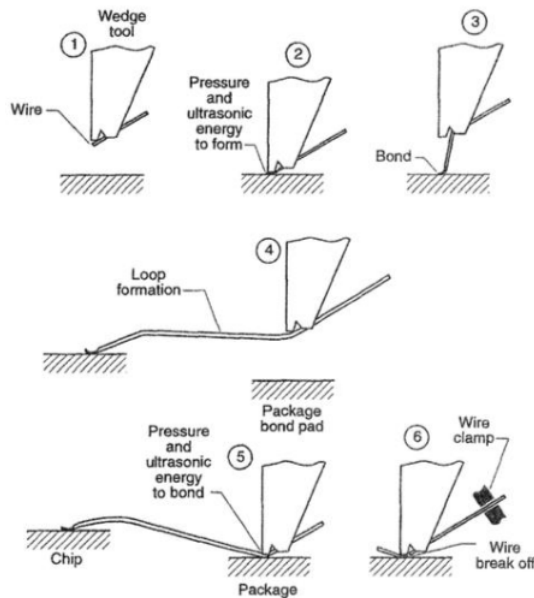
Využívá se difuze materiálu drátku do hmoty kontaktované plošky pomocí ultrazvukového kmitání (smykového tření).

Auto ball bonders jsou několikrát rychlejší než autowedge bonders. Důvodem je možnost posunu kapiláry (po prvním sváru) libovolným směrem.

U hranového kontaktování je nutné, aby byl drátek vzhledem ke kontaktovací kapiláře správně orientován.

Nástroj je vyroben obvykle z WC (v některých případech je z tohoto materiálu pouze špička nástroje).

Vyskytují se také nástroje z dalších tvrdých materiálů, jakými je například TiC.



Obrázek 19: WEDGE Bonding (Hranové)

#### 6.3.4 Kuličkové bondování

Vytvoření kuličky elektrickým výbojem nebo plamínkem.

Umístění kapiláry nad plošku čipu.

Vytvoření prvního spoje za pomoci tlaku, tepla a UZ kmitání.

Formování smyčky (přesná sekvence řízených pohybů).

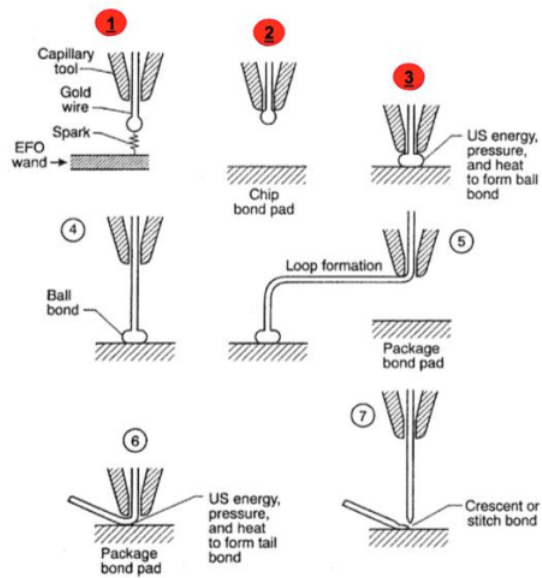
Umístění kapiláry nad plošku pouzdra nebo substrátu.

Vytvoření druhého spoje za pomoci tlaku, tepla a UZ kmitání.

Odtržení drátku.

Realizace dalšího propojení.

Používají se opět i další tvrdé materiály. Vyskytují se například safírové nebo rubínové špičky.



Obrázek 20: BALL Bonding (Kuličkové)

### 6.3.5 Materiály pro wirebonding

Standardní mikročástky z: Au, Cu, AlSi

Pro speciální aplikace z: Ag, Pd, Au-Al, Pd-Cu



## **7 Leaching**

-popis, příčiny a předcházení jevu, význam intermetalických sloučenin v pájeném spoji

## 8 PROUDOVÝ ZDROJ IPTAT

- Generátor dVbe napětí
- Princip proudového zdroje IPTAT - "Americký"koncept
- Zpětnovazební nízkonapěťový IPTAT proudový zdroj

## 9 PROUDOVÝ ZDROJ IPTAT

- Generátor dVbe napětí
- Elementární zdroj Band Gap napětí
- Plovoucí Band Gap zdroj

## 10 OPERAČNÍ ZESILOVAČ

- Obecný jednostupňový operační zesilovač
- Jednostupňový zesilovač s vysokým ziskem
- Dvojstupňový operační zesilovač s emitorovým sledovačem

## 11 OPERAČNÍ ZESILOVAČ

- Buffer s jednotkovým zesílením
- Obecný koncový stupeň Rail-to-Rail
- Koncový stupeň Rail-to-Rail typu emitorový sledovač
- Operační zesilovač se stupněm typu složená kaskóda (folded cascode)

## 12 OPERAČNÍ ZESILOVAČ

- Princip kmitočtové kompenzace
- Kmitočtová kompenzace zpětnovazebního IPTAT proudového zdroje
- Millerova kmitočtová kompenzace, výpočet ST přenosu operačního zesilovače
- Eliminace RHP nuly

## 13 BAND GAP REFERENCE

- Princip Band Gap reference
- Band Gap reference podle P. Brokawa s aktivní zátěží
- Band Gap reference podle P. Brokawa s odporovou zátěží a operačním zesilovačem
- Band Gap předstabilizátor