

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

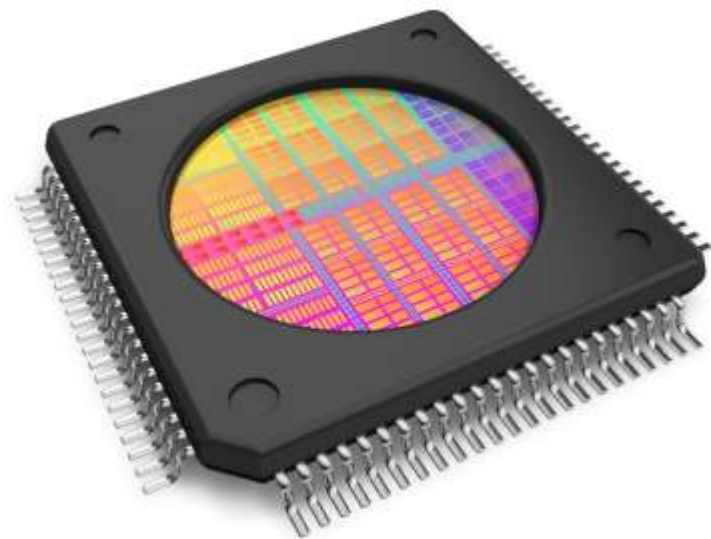


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

***Polovodičové materiály
a technologie
KET/PMAT***



***Kontaktování a pouzdření
polovodičových struktur,
chlazení***

Přednáška 9



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, JAKÝM ZPŮSOBEM SE PROVÁDÍ KONTAKTOVÁNÍ ČIPŮ.
- DOZVÍTE SE, JAKÝ JE ROZDÍL MEZI TERMOKOMPRESNÍM, TERMOSONICKÝM A ULTRASONICKÝM BONDOVÁNÍM.
- ZJISTÍTE, JAK FUNGUJE BONDOVÁNÍ NA KULIČKU A KLÍNOVÉ BONDOVÁNÍ.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ SE POUŽÍVAJÍ TECHNIKY K ZAPOUZDŘENÍ ČIPŮ.
- ZJISTÍTE, CO ZNAMENÁ 3D POUZDŘENÍ.
- ZJISTÍTE, CO ZNAMENÁ A JAKÝ JE ROZDÍL MEZI SOC, SIP, WLP A MCM.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ PARAMETRY JSOU DŮLEŽITÉ PŘI NÁVRHU CHLAZENÍ ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK.
- ZJISTÍTE, JAK VYBRAT SPRÁVNÝ CHLADIČ.

Kontaktování polovodičových struktur

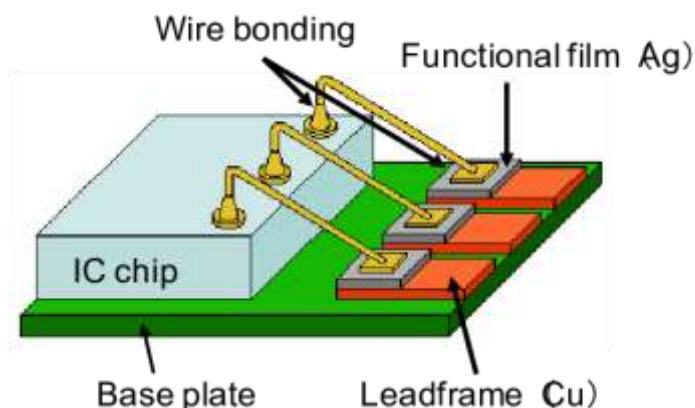
Připojování přívodů k čipům

Mikrodrátkové bondování (wire bonding) představuje techniku, která **mechanicky a elektricky** propojuje **mikrodrátek** o velmi malém průměru, řádově μm , se **speciálně upravenou ploškou**. Mikrodrátkem jsou touto technologií **propojeny dva komponenty elektrické sestavy**, většinou jde o **polovodičový čip** (integrovaný obvod), který je **umístěný na nosné propojovací struktuře**.

Mikrodrátkové bondování **představuje pevnou fázi svařovacího procesu**, při které **nedochází k natavení materiálů**. Při těsném kontaktu povrchů materiálů **elektrony povrchových vrstev vzájemně proniknou do atomových struktur**, což má za následek vytvoření pevného a vodivého propojení.

Spojení mikrodrátku s ploškou musí zabezpečovat:

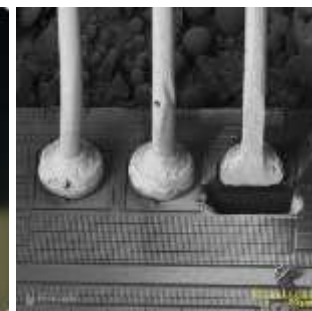
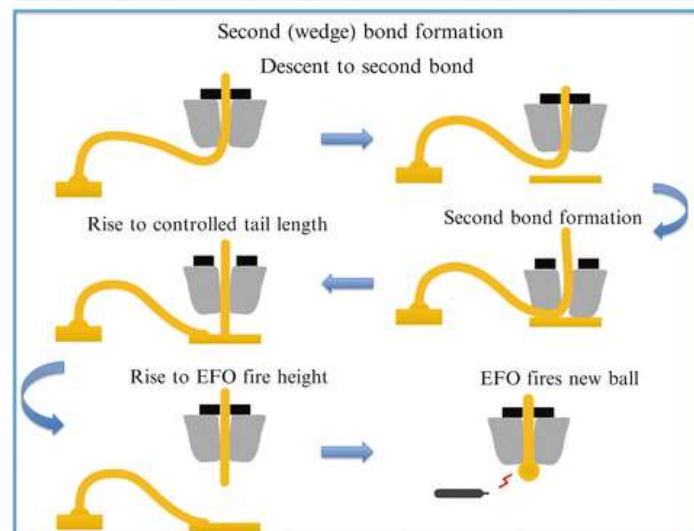
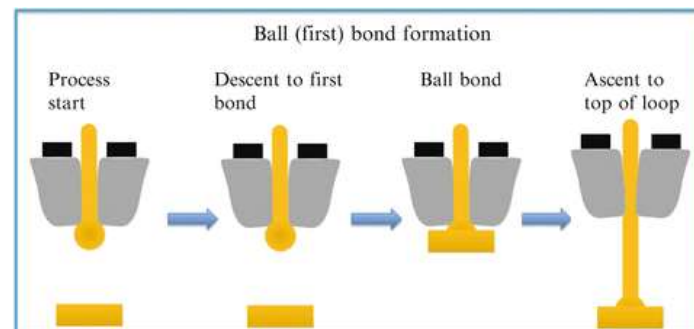
- **vysokou elektrickou vodivost**
- **mechanickou odolnost**
- **odolnost vůči prostředí**



Termokompresní bondování

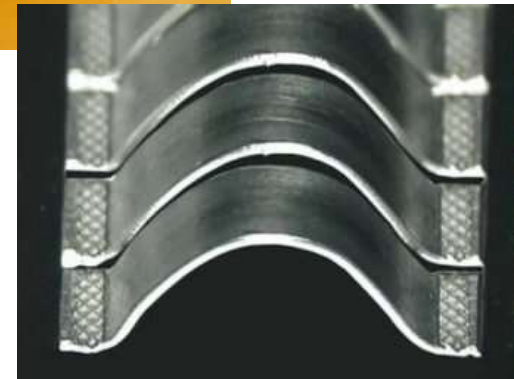
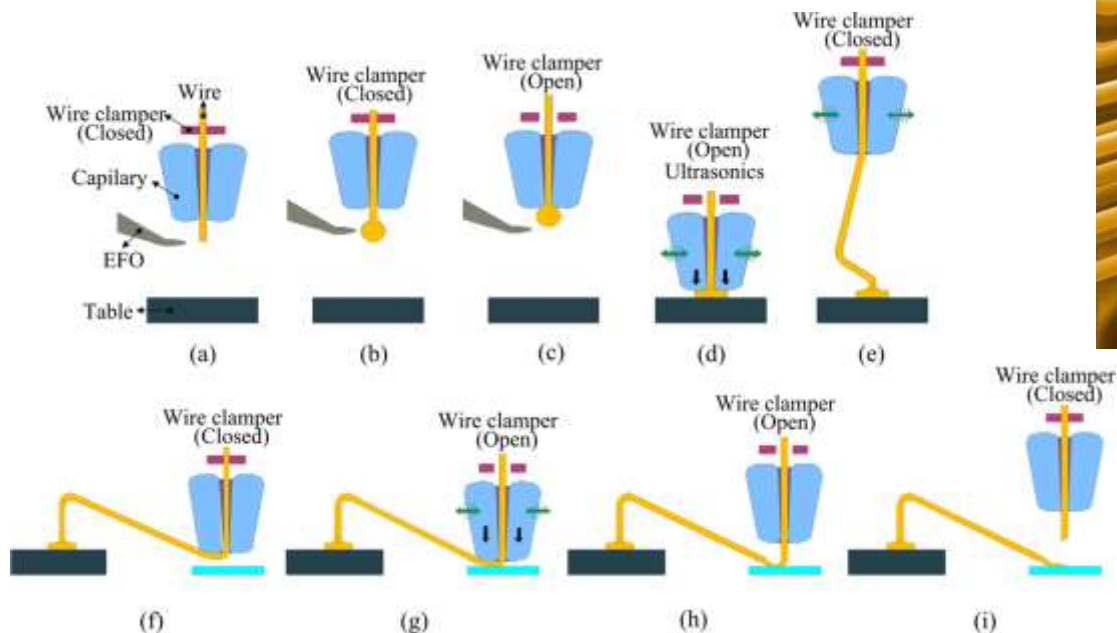
Kontakt mikrodrátku s ploškou se **vytváří za současného působení zvýšeného tlaku a teploty na mikrodrátek**. Doba působení těchto faktorů se nastavuje tak, aby bylo dosaženo co nejkvalitnější propojení materiálů. Byl to první používaný způsob při provádění propojení. Jsou pro něj určeny **speciální nástroje, zvané kapiláry**. Ty využívají k vytvoření kontaktu **speciálně vytvořenou kuličku na konci mikrodrátku (Ball bonding)**. V současné době se tento způsob bondování používá minimálně. Je nahrazen termosonickým bondováním, při kterém se ve většině případů dosahují lepší výsledky.

Při této metodě se využívá pružné tečení jednoho (nebo obou) materiálů a jejich vzájemné difuze - teplota Si asi 300 °C, teplota hrotu 150 °C, dráty Al a Au o průměru 30 μm, hrozí nebezpečí elektrochemické koroze Au a Al a z toho vyplývají problémy spolehlivosti.



Termosonické bondování

Tlak a teplota výrazně ovlivňují použité materiály. **Tlak na mikrodrátek často poškozoval kontaktované plošky.** V polovině 60-tých let byl nalezen způsob, který **optimalizuje teplotu a snižuje tlak.** Experimentálně se zjistilo, že kvalitní spoj je možno vytvořit při **nižší teplotě a menším tlaku za současného působení ultrasonické energie**, která se přivede do místa kontaktu prostřednictvím bondovacího nástroje. V dnešní době je využíván v 80% aplikacích bondování.



Ultrasonické bondování

Zlaté mikrodrátky jsou elektricky nejvhodnější z pohledu vodivosti i stálosti v prostředí. Velké množství vytvářených kontaktů zvyšuje provozní náklady (cena). Vhodným materiálem je i hliník, který má však jiné mechanické a tepelné vlastnosti než zlato, hlavně není tak dobře tvárný. **Al mikrodrátek je schopen vytvořit kvalitní a odolný spoj, mikrodrátek ale není možné tak lehce tvarovat jako zlato. Mikrodrátek je přitlačen k podložce speciálně upravenou hranou hrotu ve tvaru klínu, přes který je dodávána ultrazvukové energie, která naruší povrchovou strukturu obou materiálů a umožní vznik propojení (Wedge bonding).** Ultrazvukový generátor (20 kHz až 60 kHz), který prostřednictvím převodníku rozkmitá jehlu ve vodorovném směru, takto se pomocí tření a narušení oxidické vrstvy současně vyvine teplo nutné k vzniku termokompresního spoje, u kterého je nižší riziko elektrochemická koroze.

Současné možnosti bondovacích stanic umožňují využití této technologie i pro **jiné materiály (zlato, měď, paladium, stříbro, platina)**. V posledním desetiletí se experimentovalo i s využití měděného mikrodrátku.

V předcházejících částí bylo uvedeno, že existují **dva odlišné způsoby provedení propojení mikrodrátku a plošky**.

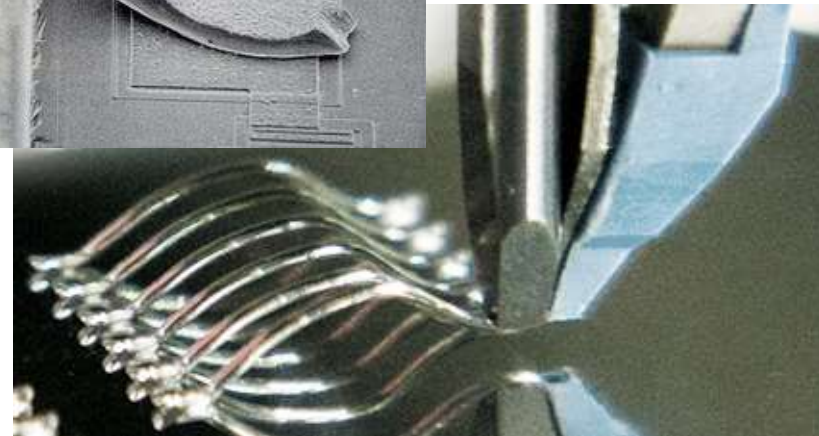
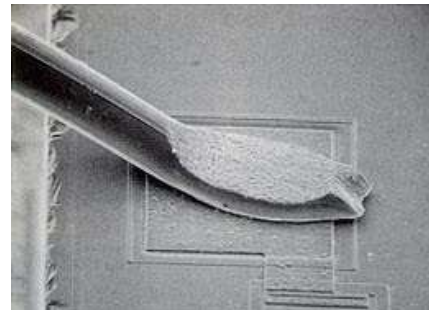
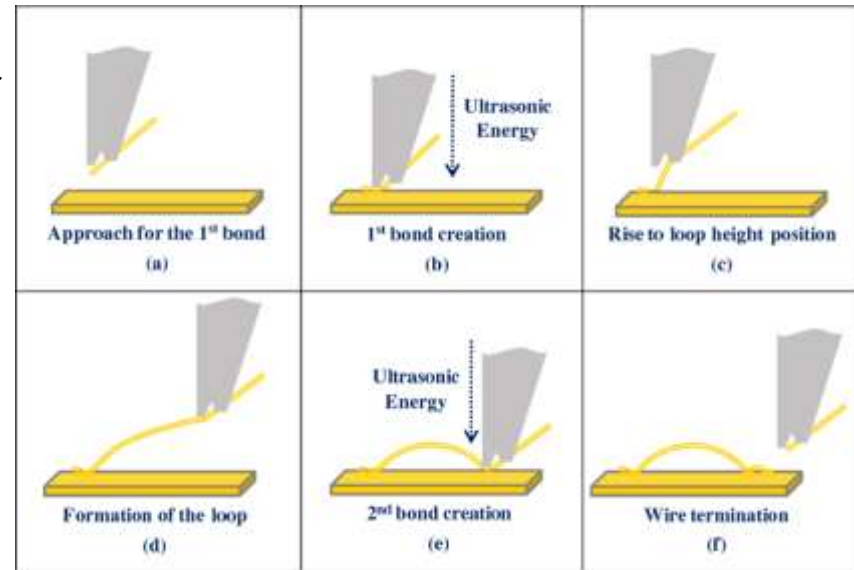
Bondování na kuličku

Tato technika se využívá i v současné době, především pro **termosonické bondování**. Při této technologii je mikrodrátek provlečen otvorem kapiláry. **Elektrický oblouk nataví mikrodrátek pod hrotem kapiláry do kuličky.**

Kulička mikrodrátku je tvarovaná při tuhnutí materiálu mikrodrátku povrchovým napětím roztaveného kovu. **Kulička je pak přitlačena ke kontaktní plošce přesně stanovenou silou.** Za současného **působení teploty a ultrazvuku** se materiály plasticky deformují, **povrchové atomy vzájemně difundují do povrchových krystalických struktur.** Pohybem kapiláry je tak **tvarován vzhled mikrodrátku, tzv. smyčka.** Kapilára se nastaví nad druhou kontaktní plošku. **Kapilára zatlačí na mikrodrátek, ten se promáčkne a v místě přimáčknutí vzniká druhý bond.** Kapilára se zvedne o stanovenou vzdálenost a mikrodrátek je mechanicky uchycen do speciálních svorek. Dalším pohybem kapiláry se mikrodrátek přetrhne. Pro **kuličkové bondování** se používá **zvýšená teplota materiálů**, která se pohybuje od **150 °C do 200 °C.**

Klínové bondování

Mikrodrátek je přitlačen k plošce spodní části nástroje, který má tvar klínu (wedge tools). Postup provádění bondování je **odlišný vůči kuličkovému bondování**. Konec mikrodrátku je veden pod spodní částí nástroje. Nástroj je bondovacím zařízením nasměrován nad bondovanou plošku. Pak je mikrodrátek přitlačen k podložce. **Je vytvořeno propojení při současném působení tepla, tlaku a ultrazvukové energie.** Mikrodrátek je následně veden v těle nástroje a pohybem nástroje je tvarována smyčka mikrodrátku. Nástroj se přesune nad druhou plošku pro vytvoření druhého bondu. Přitlačením mikrodrátku je vytvořen druhý bond. Pomocí svorek, popřípadě pohybem podložky je zabezpečeno přetržení mikrodrátku.

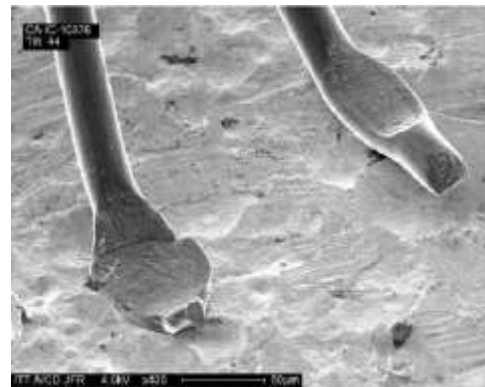


Parametry ovlivňující bondování

Vhodný návrh bondování ovlivňuje kvalitu provedení kontaktů. Při správném vyhodnocení podmínek můžeme eliminovat chyby v provedení, které jsou způsobené: námahou mikrodrátku v ohybu a stříhu, spojením plošky a substrátu, vzájemnou difuzí materiálů, korozí, vibracemi, změnou impedance a dalšími aspekty.

Mezi podmínky, které ovlivňují návrh bondování patří:

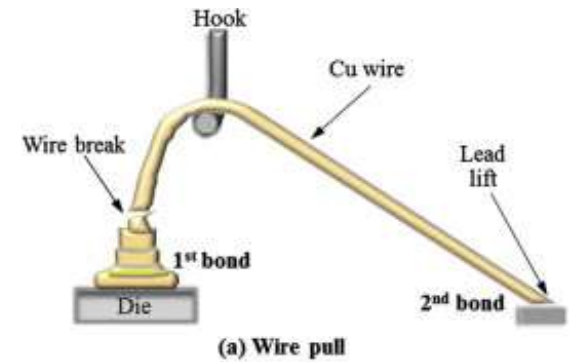
- **technologie výroby propojovaného čipu, materiál čipu, jeho tloušťka**
- **materiál bondovaných plošek, jejich vzdálenost, délka, šířka a tloušťka plošek,**
- **parametry signálu který bude mikrodrátkem přenášet (napětí, proudu, frekvence)**
- **přípustná propojovací impedance**
- **navržená kapacitní zátěž výstupu**



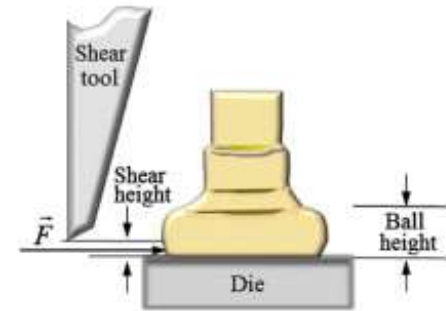
Parametry ovlivňující bondování

Minimální průměr drátku je závislý na přípustném elektrickém odporu mikrodrátku vzhledem k jeho délce. Rozměr bondované plošky (šířka, délka a rozteč) se musí navrhnout tak, aby bylo možno signál přenést průměrem mikrodrátku. Mezi další parametry patří také samotný materiál mikrodrátku, elektrická vodivost, pevnost ve smyku, v tahu, elasticnost, tvrdost a koeficient tepelné roztažnosti.

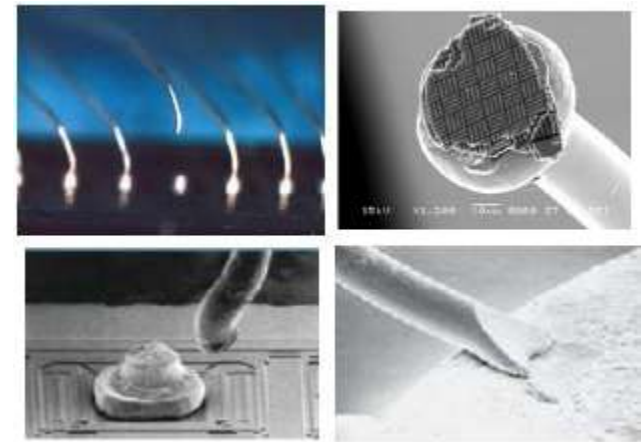
Materiál bondovací plošky musí být vybrán vzhledem k materiálu mikrodrátku. Mezi důležité vlastnosti materiálu bondovacích plošek patří vodivost, schopnost vzájemného propojení, vlastnosti intermetalické fáze, tvrdost, odolnost vůči prostředí a koeficient tepelné roztažnosti.



(a) Wire pull



(b) Ball shear



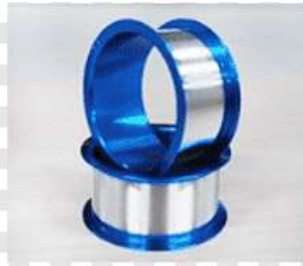
Materiály mikrodrátku a bondovacích plošek

Pro mikrodrátek se využívají nejčastěji tři základní druhy materiálu:

- zlato
- hliník
- měď



Gold Alloy Wire



Silver Alloy Wire



Copper Alloy Wire



Aluminum Alloy Wire

Zlato

Zlatý mikrodrátek se používá hlavně při **termokompresním a termosonickém bondování**. Čisté zlato má **přiměřenou pevnost v tahu**. Může být taženo a prodlužováno v délce bez výrazné změny vlastností. Je však **velmi měkké** a proto se k němu **přidávají prvky na zvýšení tvrdosti**, a to buď malé množství berylia nebo mědi.

Composition	Diameter	
99.99% Au	0.7 mil	17.5 μm
	0.8 mil	20 μm
	0.9 mil	22.5 μm
	1.0 mil	25 μm
	1.3 mil	32.5 μm
	1.5 mil	37.5 μm
	1.7 mil	42.5 μm
	1.8 mil	45 μm
	2.0 mil	50 μm
	3.0 mil	75 μm

Hliník

Čistý hliník je také **velmi měkký** pro tenký mikrodrátek. Proto je často **legován 1% křemíku nebo 1% manganu** k **posílení pevnosti**.

Composition	Diameter	
99.999% Aluminum	5 mil	125 μm
	8 mil	200 μm
	10 mil	250 μm
	12 mil	300 μm
	15 mil	375 μm
	20 mil	500 μm

Materiály mikrodrátku a bondovacích plošek

Měď

V poslední době se hlavně z **ekonomických důvodů** začíná používat i **měděný mikrodrátek**. Měď má také **lepší odolnost** mikrodrátku **vůči pohybu při plastickém zapouzdření bondů protože je tvrdší**. Velký **problém** u mědi je však **její schopnost propojení bondováním**. Měď je tvrdší, což vede k **poškození povrchů plošek**. Proto se **vyžaduje tvrdší pokovení plošek** a také se kontakt provádí ve **speciální inertní atmosféře z důvodu rychlé oxidaci mědi** na vzduchu.

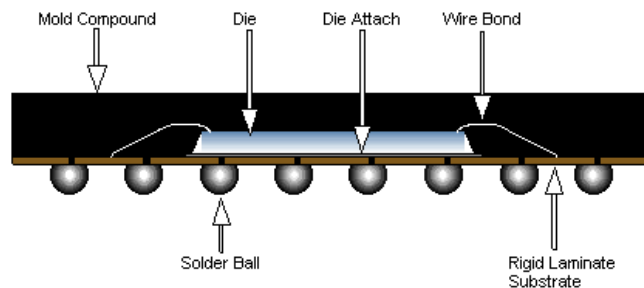
Pro **povrchovou úpravu bondovací plošky** je nejčastěji voleno **pozlacení popřípadě nanesení hliníkového materiálu**. Pro úpravu povrchu plošky je možné využít i **stříbro, nikl nebo měď**.

Pokud je to možné, je výhodné volit **stejný materiál mikrodrátku a plošky**. Když jsou materiály shodné, mají stejné podmínky pro vytvoření propojení, odpadají problémy s vyhledáním vhodné teploty, dochází k lepšímu vzájemnému propojení na atomární úrovni, minimální tvorbě kráterů a poškození plošek.

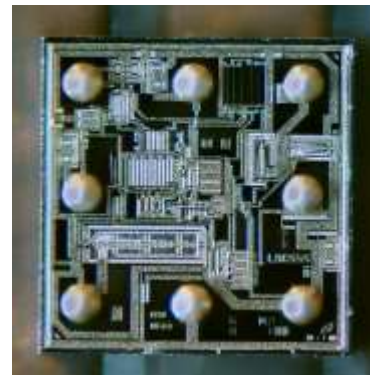
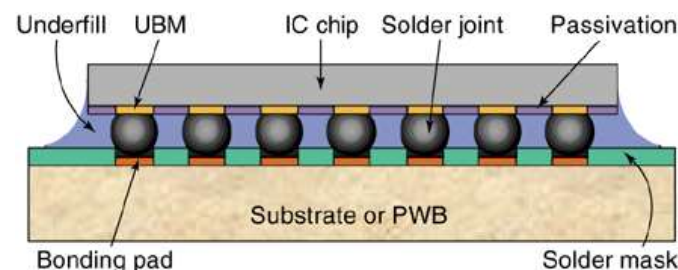
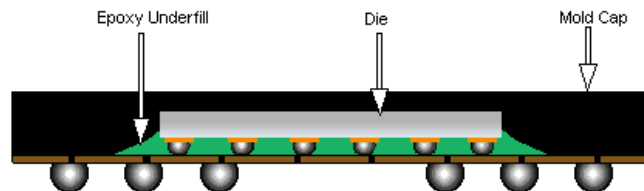
Flip chip

Připojení čipu na substrát prochází neustálým vývojem. Kromě mikrodrátků je možné využít **kontaktování pomocí kuliček**. Tato technologie nese označení **Flip Chip**, což v překladu znamená **otočený čip**. Označení vychází z metody, kterou je čip uchycen k substrátu. Čip může být uchycen **aktivní stranou (směrem k substrátu) prostřednictvím kuličkových nebo sloupcových vývodů**. V druhém případě je propojen se substrátem prostřednictvím mikrodrátků z horní strany čipu metodou wire bonding.

WIRE BOND



FLIP CHIP

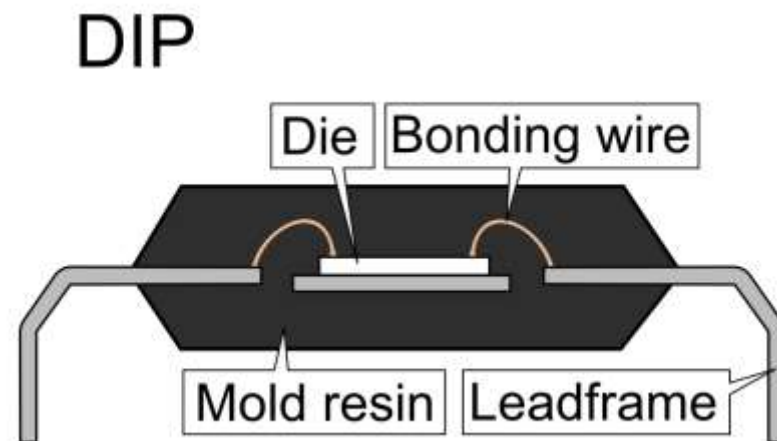


Pouzdrění polovodičových struktur

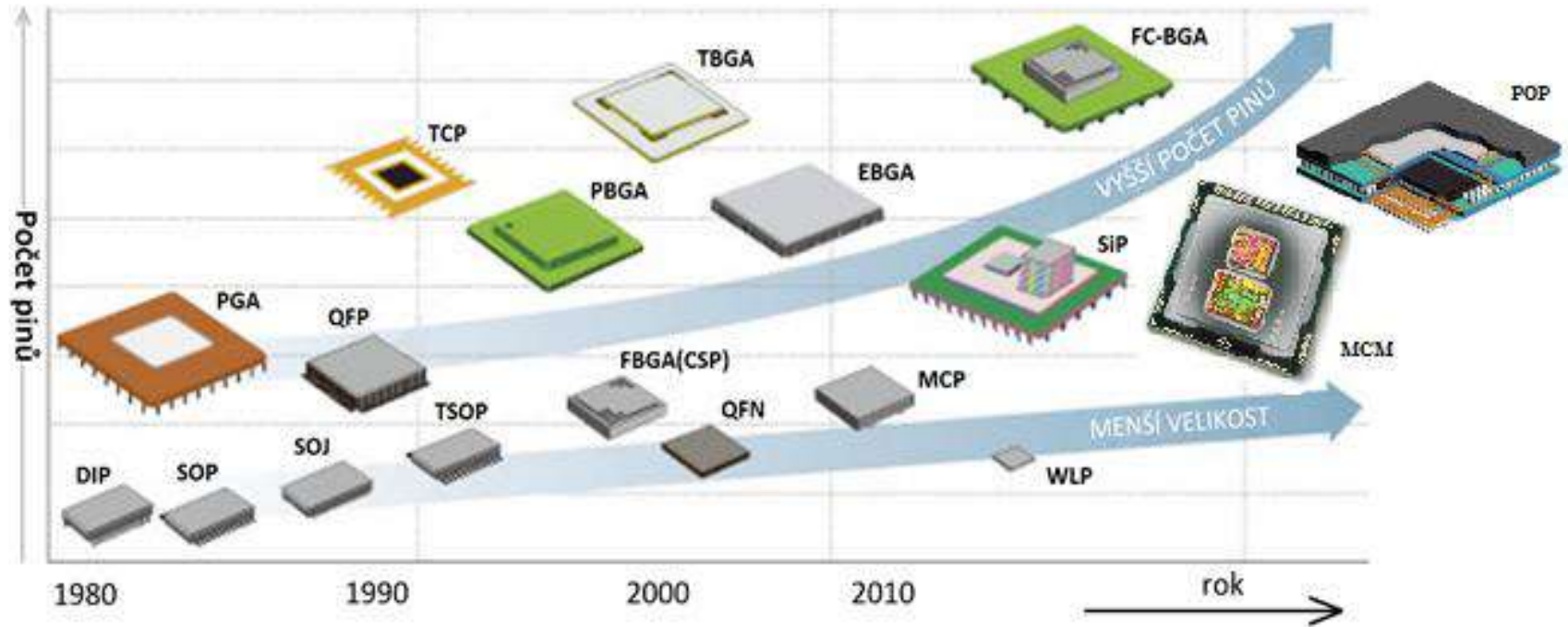
Pouzdra a pouzdřicí hmoty tvoří ochrannou „schránku“ polovodičových čipů, elektronických součástek a integrovaných obvodů. Pouzdra zajišťují ochranu citlivých čipů před působením vnějších vlivů. Zajišťují mechanickou, chemickou i tepelnou ochranu čipu. Pouzdra zajišťují také napájení a vzájemné propojení mikrosystémových komponent. Při vývoji je rovněž cíleno na spolehlivost, cenu a především jednoduchou manipulaci při montáži.

V elektronickém odvětví dochází k neustálému zvyšování úrovně integrace elektronických integrovaných obvodů a k současnému snižování jejich rozměrů. S tím souvisí i vývoj pouzder a pouzdřicích materiálů. Vývoj nových pouzder závisí na následujících parametrech:

- **parametry čipu** – rozměry, výkon, rychlost, počet vývodů, aj.
- **požadavky na systém** – provedení, spolehlivost, rozměry, cena
- **proces výroby** – pájitelnost, manipulace, testovatelnost



Vývoj pouzder elektronických součástek



Výroba procesorů a čipů:

<https://www.youtube.com/watch?v=SkLHEjhWaPA>

<https://www.youtube.com/watch?v=bor0qLifjz4>

Základní rozdělení pouzder

Podle materiálu pouzdřící hmoty a spolehlivosti lze rozdělit pouzdra na:

- **Hermetická** (kovy, keramika, sklo)
- **Nehermetická** (organické materiály – polymery)

Volba vhodného typu pouzdra a metody pouzdření závisí na parametrech pouzdřené části, spolehlivosti a ceně. **Levné obvody** nekladou příliš velký důraz na spolehlivost, proto jsou často pouzdřeny v **nehermetických pouzdrech**. Technologie výroby pouzder jsou cenově i technicky dostupné. V opačném případě, kdy je zapotřebí **vysoká spolehlivost**, jsou k dispozici **pouzdra hermetická**. Jejich **výroba je však technologicky náročná** a od toho se odvíjí i cena takového pouzdra.

Parametry návrhu pouzdra

Elektrický návrh

Je to proces, který **vymezuje cestu elektrickému signálu a napětí takovým způsobem, který splňuje celkové požadavky systému**. Konečným výsledkem je geometrický návrh vzájemného propojení a seznam materiálů včetně jejich geometrie potřebné ke splnění systémových požadavků. Proces zahrnuje návrh začlenění pasivních komponent, ale i začlenění optických vlnodů umístěných uvnitř pouzdra.

Tepelný návrh

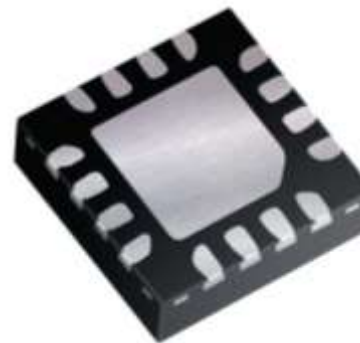
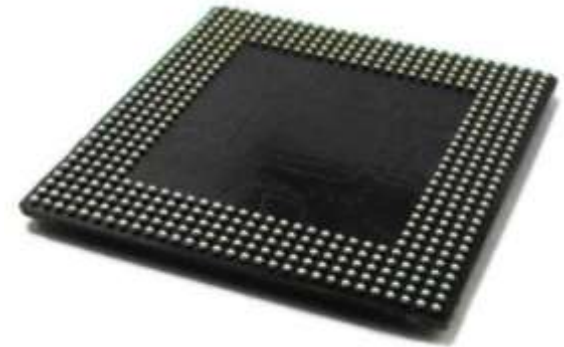
Řeší odvod tepla s pomocí sestavení náhradního teplotního obvodu s cílem minimalizovat všechny tepelné odpory.

Parametry návrhu pouzdra

- Ohmův zákon
- Povrchový jev
- Kirchhoffovy zákony
- Šum
- Časové zpoždění
- Přeslechy
- Elektromagnetická interference (EMI)
- Teplotní model

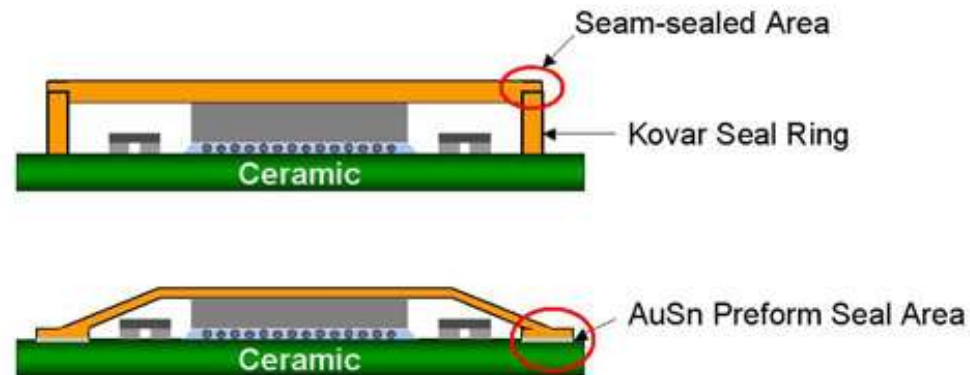
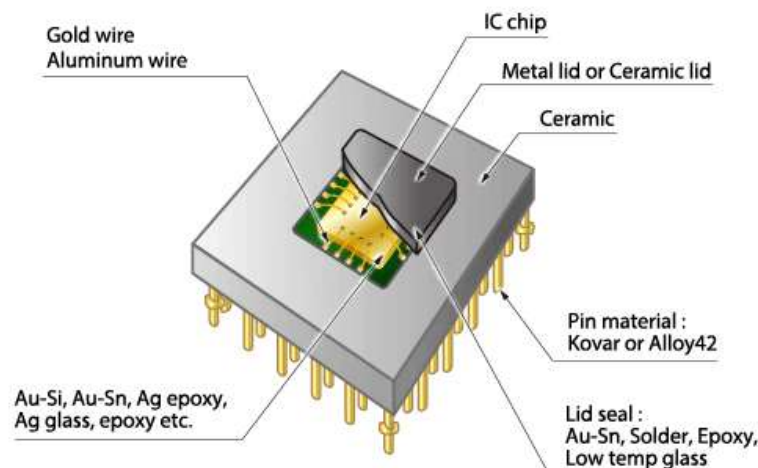
Provedení vývodů pouzder

- **Páskové, drátové, kolíkové** (SOIC, SOT, PGA, HIO...)
- **Kulové, sloupkové** (BGA, CGA)
- **Kontaktní plošky** (QFN/LGA/CC)



Hermetická pouzdra

Hermetická pouzdra jsou **plynotěsná a odolná vůči vlhkosti a vnějším chemickým vlivům**. Nejčastěji se jedná o **kovová nebo keramická pouzdra**, která vykazují vyšší spolehlivost než pouzdra nehermetická. Díky dobré tepelné vodivosti jsou také využívána pro výkonové aplikace.



Nehermetická pouzdra

Do skupiny **nehermetických pouzder** patří **plastová pouzdra**. Nevýhodou je **nízká doba skladovatelnosti pouzdřících materiálů**. Výsledné **vlastnosti pouzdra** jsou výrazně **ovlivněny historií teplot a celkovou dobou skladování**. Aby se docílilo co nejdelší životnosti, jsou tyto materiály uchovávány při nízkých teplotách.

Většina používaných materiálů je **na bázi pryskyřic** se složkami zajišťující vazební, vytvrzovací a samozhášivé vlastnosti. Typickými představiteli jsou **epoxidové, silikonové a polyuretanové pryskyřice**.

Plastové materiály se vyznačují polymerní vazbou. Jedná se o **dlouhé řetězce složené z mnoha malých částí nazývaných monomery**. Obecně lze materiály plastových pouzder rozdělit do tří skupin:

- **Termoplasty** – vyznačují se řetězově zesíťovanou strukturou a jejich charakteristickou vlastností je **zpětná monomerizace při působení tepla**.
- **Termosety (reaktoplasty)** – vyznačují se křížově zesíťovanou strukturou a na rozdíl od termoplastů je **nelze zpětně monomerizovat**.
- **Elastomery** - mají velmi volné zesíťování a jejich předností jsou **elastické vlastnosti**.

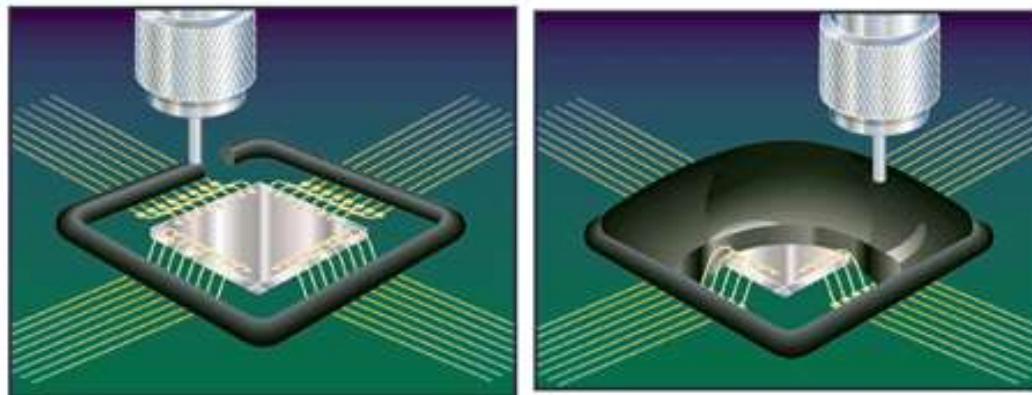
Technologie výroby nehermetických pouzder

Mezi nejrozšířenější technologie patří:

- Zalévání
- Lisování
- Fluidizace

Zalévání

Jedná se o **jednoduchou, rychlou a poměrně levnou metodu** pouzdření. Lze zalévat elektronické součástky, integrované obvody, celé elektronické sestavy nebo pouze samotné čipy („Glop Top“). Dnešní technologie jsou schopné vytvářet i spodní výplně pod pouzdry BGA. Tato metoda nese označení „Underfilling“.



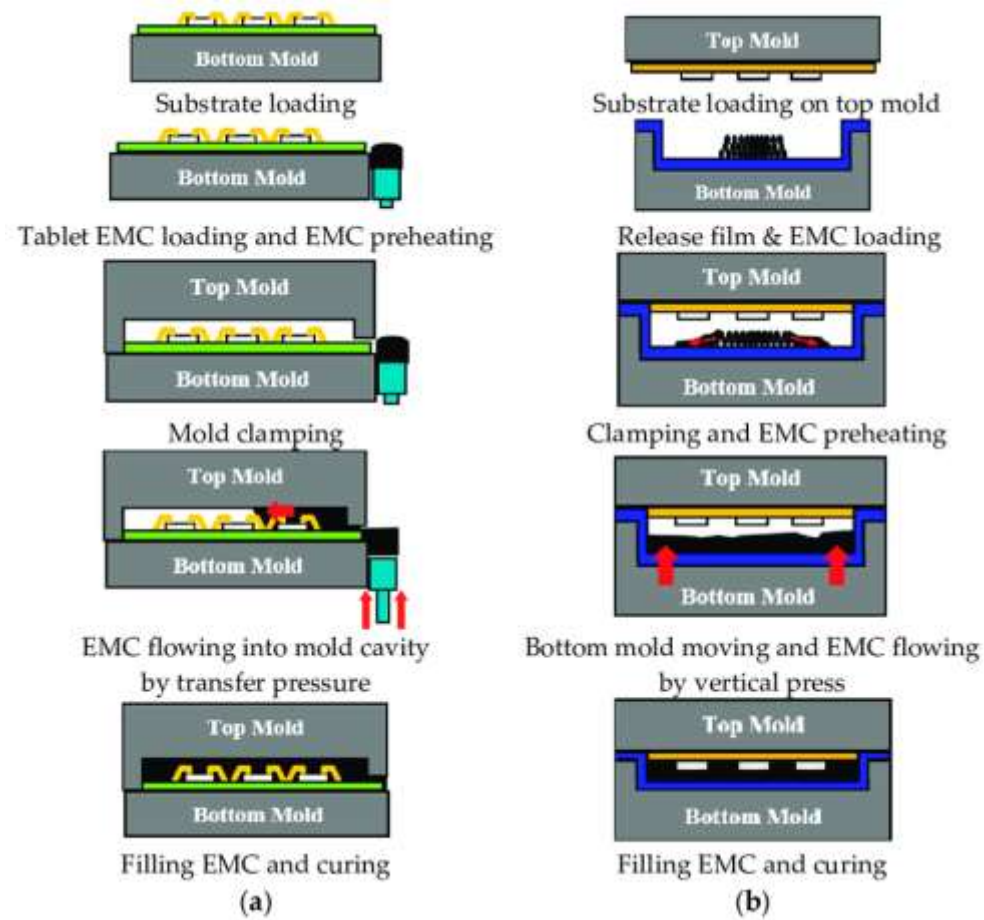
Technologie výroby nehermetických pouzder

Lisování

Ve **velkosériové výrobě** je metoda **lisování nejrozšířenější (95 % součástek)**. Lisovat lze dvěma způsoby:

- **Tlakovým vstřikováním** pouzdríci hmoty do dutiny
- **Lisování a přetlačování** pouzdríci hmoty do dutiny

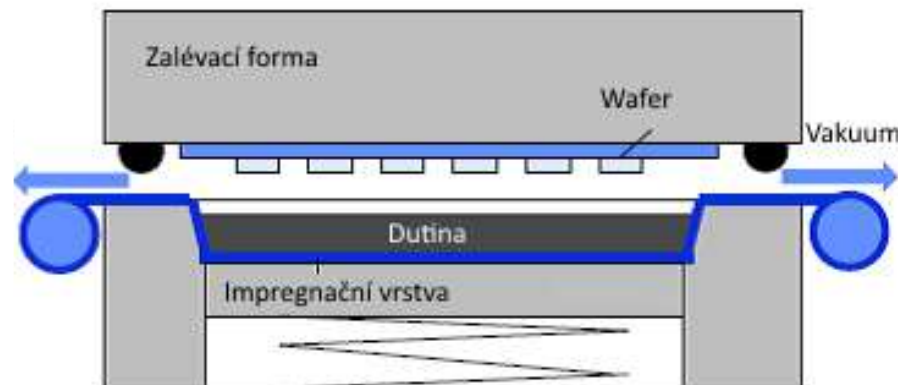
Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi **dobrou rozměrovou stálostí i vysokou přesností**. Vstřikováním lze zpracovat téměř **všechny druhy termoplastů a některé druhy reaktoplastů a kaučuků**.



Technologie výroby nehermetických pouzder

Lisování

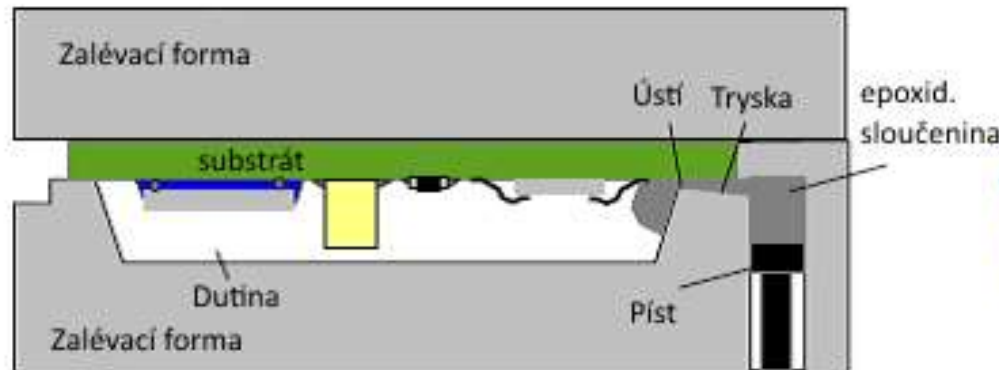
Lisování je metoda tváření ve vyhřáté ocelové formě za působení tlaku. Do dutiny formy je vložen plastický materiál o definovaném množství, který v důsledku kontaktu s vyhřívanou formou, jejíž teplota bývá v rozmezí 130 – 190 °C, přechází do plastického stavu. Na hmotu působí tlak tvárníku, který podporuje plastikaci a současně vyplňuje rovnoměrně celou dutinu. Lisovací tlak bývá v rozmezí 10 – 60 MPa. Hranice mezi nízkotlakým a vysokotlakým lisováním je 3,5 MPa. Následuje snížení tlaku tvárníku, čímž je zajištěno odplynění taveniny plastu. Působením tepla na taveninu dochází ke zdoluhavému procesu vytvrzování plastu. Doba vytvrzování je ovlivněna především druhem použitého materiálu, tloušťkou vrstvy a teplotou formy.



Technologie výroby nehermetických pouzder

Vstřikování

V současnosti je metoda lisování nahrazována metodou vstřikování. Ke vstřikování se používají **reaktoplastické zalévací hmoty**. Před samotným pouzdřením **čip ochráněn silikonovým kaučukem**. Následně do formy dochází ke vstřiku pouzdřicího materiálu při teplotě 150 až 160 °C a tlaku 4,5 až 6 MPa. Následuje polymerace po dobu 2 až 3 minut a proces vytvrzení při teplotě 150 až 160 °C. Následují dokončovací operace jako je očištění přívodů od přebytku zalévací hmoty, prostřihání obvodů, tvarování vývodů.



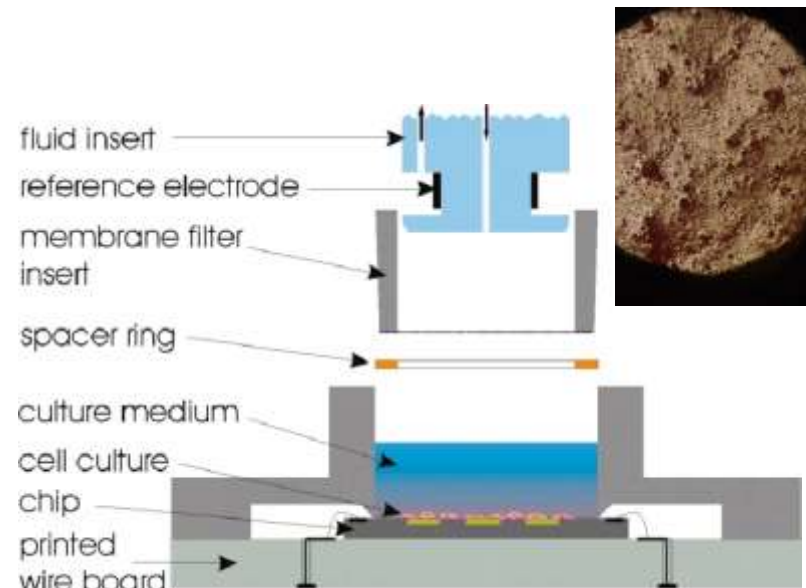
Technologie výroby nehermetických pouzder

Fluidizace

Jedná se o technologický proces, při kterém se **prachové částice pouzdřicího materiálu usazují na povrchu pouzdřeného vzorku**. Jemný prášek je vystaven současnému působení vzduchu a vibrací, čímž dochází k vytvoření tzv. „fluidu“. **Fluidum** je terminologie, kterou se označuje stav, při kterém získávají jemné **prachové částice hmoty vlastnosti kapalin**.

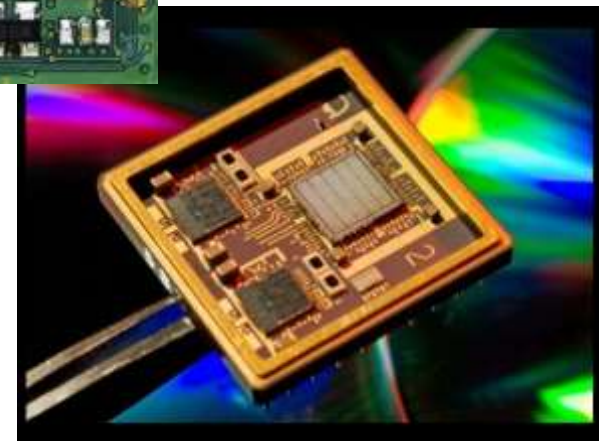
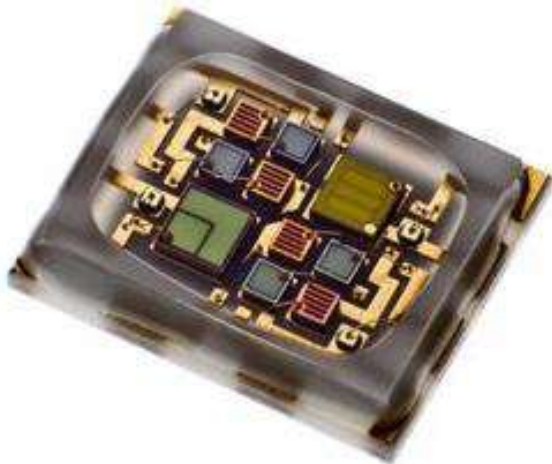
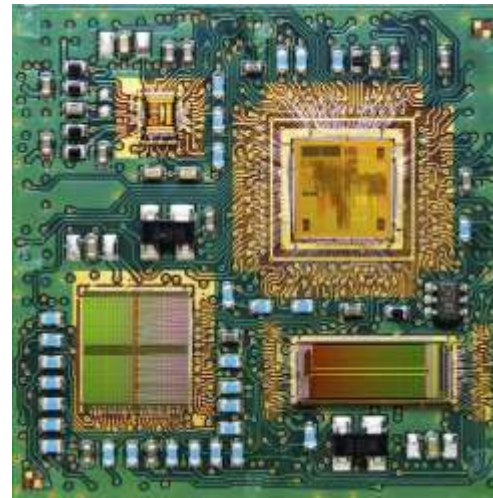
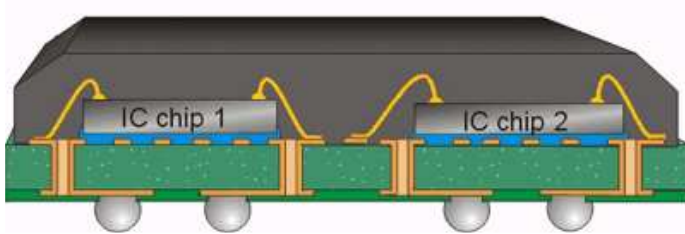
Ve fluidizačním zařízení jsou jemné práškové částice plastické hmoty – termosetu. **Proudící vzduch** přivádí částice do expandovaného stavu, který je označován právě jako fluidum.

Na předehřátý vzorek se usazují prachové částice a tím vytváří ochranný povlak součástky. Prvotní vložení vzorku do „fluidu“ trvá řádově jen několik sekund, poté je nutné součástku vyjmout a znovu ohřát. **Opětovným ohřátím** dojde k úplnému roztavení a slití termosetu, čímž dojde k vyrovnání povrchu. Celý proces fluidizace se opakuje, dokud není vrstva pouzdřicího materiálu dostatečně velká.



MCM – multičipové moduly

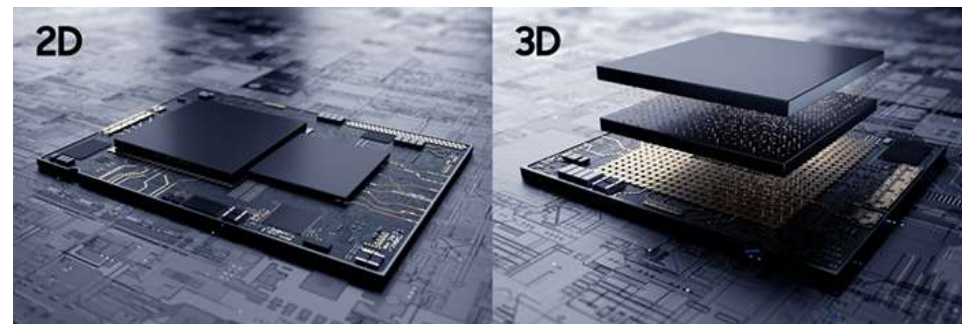
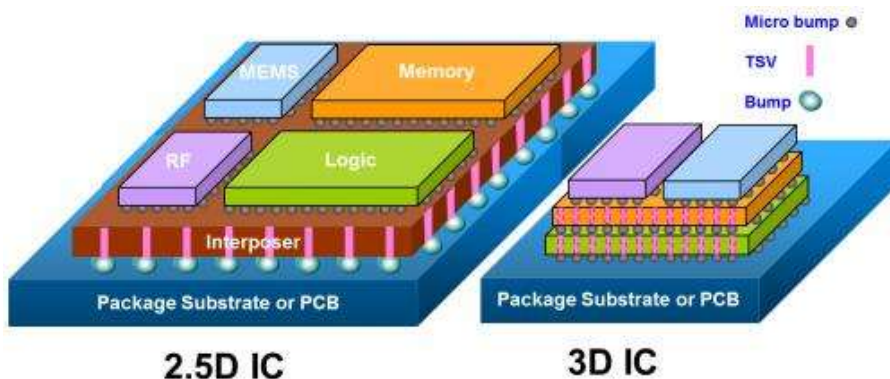
MCM – Multi Chip Module jsou průkopníky tzv. **trojrozměrného** uspořádání součástek. Jak je patrné již z názvu, je MCM technologie, která **v rámci jednoho pouzdra obsahuje několik integrovaných obvodů a čipů.**



3D pouzdra

Kompaktní pouzdra montovaná přímo na nosný substrát, jež jsou často **tvořena multičipovými strukturami (MCM)** na keramických nebo laminátových podložkách. Připojení těchto pouzder je provedeno některým ze standardních typů vývodů (J, L, BGA) nebo jinými speciálními technikami.

Multisubstrátové struktury (MSM) jsou **sestaveny z jednotlivých (dílčích) funkčních částí**, jež jsou flexibilně montovány na základě předem stanoveného postupu na základní nosný substrát. **Montáž se provádí nejen horizontálně ale i vertikálně**, což vytváří třírozměrnou strukturu.



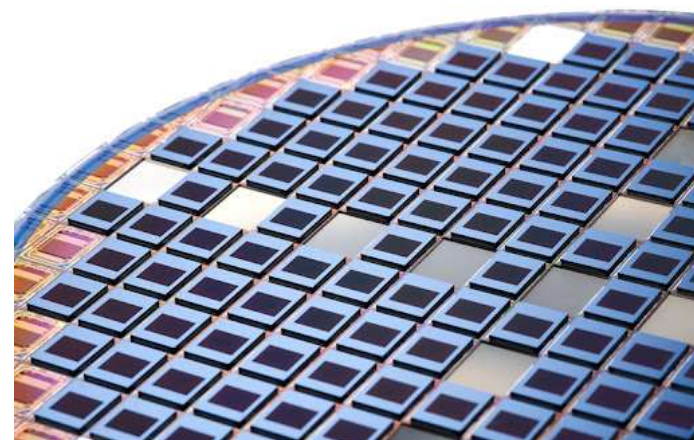
WLP – Wafer Level Packaging

V současnosti prochází vývojem **nová technologie pouzdření**. Technologie je označována jako **WLP – Wafer Level Packaging** a její **předností je pouzdření integrovaného obvodu ještě na waferu**. Přínosem nové technologie je kromě procesu pouzdření přímo na waferu zisk **menších rozměrů pouzdřených integrovaných obvodů**, které odpovídají velikosti čipu waferu.

QFP, BGA, Conventional CSP



Wafer Level CSP



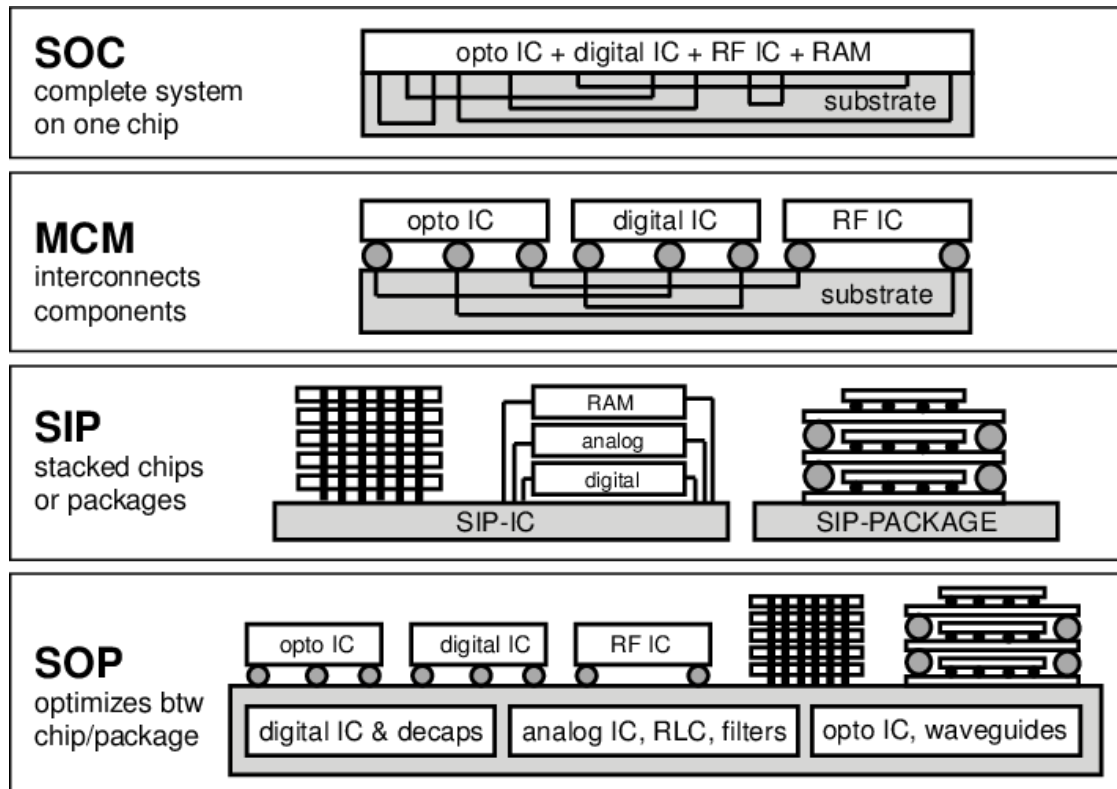
SOC – systém na čipu

Mikroelektronika se vyznačovala od dob, kdy byl uveden na trh tranzistor snahou integrovat na čip co nejvíce prvků a tak vznikaly stále **složitější integrované obvody**.

SOC je uspořádání, jež **na čipu sdružuje jednotlivé funkční bloky systému** (procesor, paměti, logické obvody atd.).

SIP – systém v pouzdře

Převážná část dnešní přenosné elektroniky využívá multičipové řešení (MCM) v různém provedení, jež obvykle **integruje heterogenní součástky na společném propojovacím substrátu ve 3D** (procesor, paměti, logické obvody...)



Chlazení polovodičových struktur

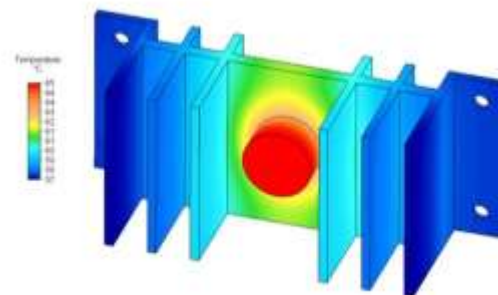
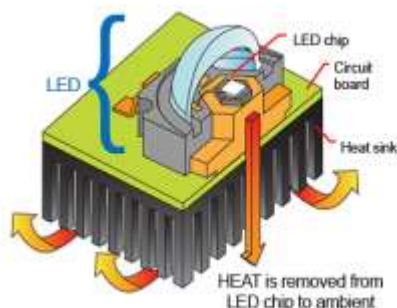
Při provozu polovodičových součástek vzniká **ztrátový výkon**, který má za následek **zvýšení teploty**. Zvýšená teplota má za následek:

- rostoucí teplotou je nepříznivě **ovlivňována řada parametrů** součástek
- možnost vzniku **tepelného průrazu**

Pracovní rozsah teplot elektronické součástky je omezen dvěma teplotami:

- nejnižší přípustná teplota T_{jmin}
- nejvyšší přípustná teplota T_{jmax}

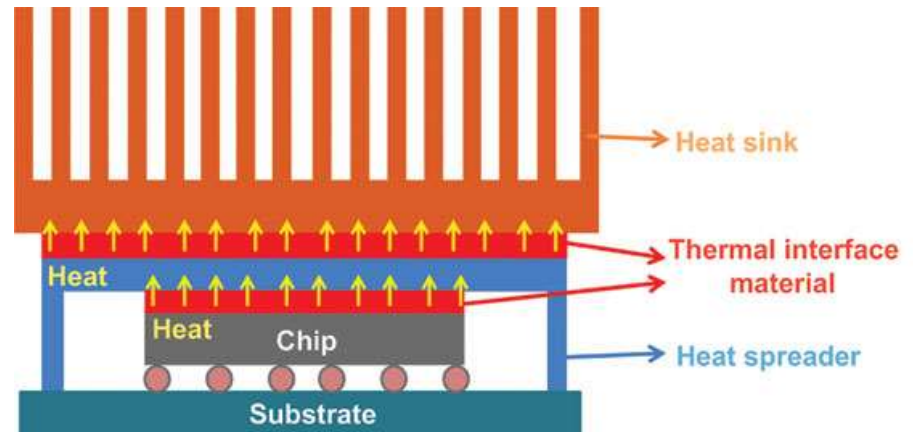
Pro **udržení provozních teplot** ve stanoveném teplotním intervalu je nezbytné **chlazení součástek**, tj. odvádění vznikajícího ztrátového výkonu z objemu součástky a **rozptylování do okolního prostředí**.



Vzduchové chlazení elektronických součástek

Ztrátové teplo vznikající např. v polovodičové struktuře je odváděno do chladiče vrstvou dobře **tepelně vodivého elektricky izolujícího materiálu**:

- korundová keramika (Al_2O_3)
- nitridová keramika (AlN)



Vzduch je přirozeným izolujícím prostředím, do kterého může být rozptylován ztrátový výkon. Nejčastěji se používají **chladiče profilové**. Při vzduchovém chlazení dochází k **přestupu tepla** dvěma základními mechanismy - **radiací a konvekcí**.

Pro přirozené chlazení se uplatní přenos tepla radiací. Při nuceném proudění vzduchu se na odvodu tepla v převážné míře podílí konvekce, odvod tepla radiací lze zanedbat.

Velikost **rozptýleného ztrátového tepla** je závislá především na **tepelné vodivosti materiálu** chladiče. Nejčastěji se využívají **hliníkové chladiče**.

Tepelné parametry vybraných materiálů

Materiál	Součinitel tepelné roztažnosti α (10^{-6} K^{-1})	Tepelná vodivost λ (W/mK)	Objemová tepelná kapacita c_v ($10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$)	Rezistivita ρ (Ωm)
Křemík (Si)	2,6	145	1,75	$10^{-6} - 10^2$
Arsenid galitý (GaAs)	5,5	50	2	$10^{-6} - 10^2$
Karbid křemíku (SiC)	3,3	490	2,35	$10^{-6} - 10^4$
Molybden (Mo)	5,4	152	2,75	5×10^{-8}
Wolfram (W)	4,5	167	2,75	$5,3 \times 10^{-8}$
Hliník (Al)	23,1	233	2,42	$2,7 \times 10^{-8}$
Zlato (Au)	14,2	294	2,5	$2,35 \times 10^{-8}$
Stříbro (Ag)	19,6	417	2,46	$1,6 \times 10^{-8}$
Měď (Cu)	17,3	382	3,42	$1,72 \times 10^{-8}$
Olovo (Pb)	29	37,4	1,46	$1,9 \times 10^{-7}$
Slída	9 - 13	0,3 – 0,5	0,54 – 0,66	$10^{13} - 10^{15}$
Korundová keramika (Al_2O_3)	7	25	3,31	10^{12}
Beryliová keramika (BeO)	6,5	200	3,68	$10^{11} - 10^{13}$
Alumium nitrid (AlN)	3,9	180	3,02	10^9
Silikonová vazelína		0,67		10^{13}

Parametry a výpočty související s návrhem pasivního chlazení

Při řešení problematiky budeme uvažovat **odvod tepla** generovaného v součástce **do chladiče a odtud do okolního prostředí**.

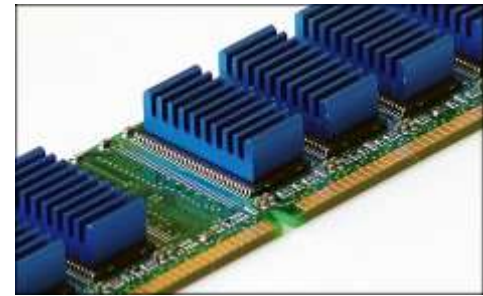
Tok tepelné energie materiálem o průřezu S a tepelnou vodivostí λ můžeme v jednorozměrném případě vyjádřit v ustáleném stavu vztahem:

$$P_{th} = \lambda S \frac{dT}{dx}$$

V případě materiálu o konstantním průřezu S a délce l lze vyjádřit:

$$P_{th} = \lambda S \frac{dT}{dx} = \lambda S \frac{\Delta T}{l} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

kde R_{th} je **tepelný odpor**.



Na styku dvou různých materiálů dochází k přestupu tepla. Na rozhraní vzniká rozdíl teplot ΔT a hustotu tepelného toku na rozhraní o ploše S je možno vyjádřit:

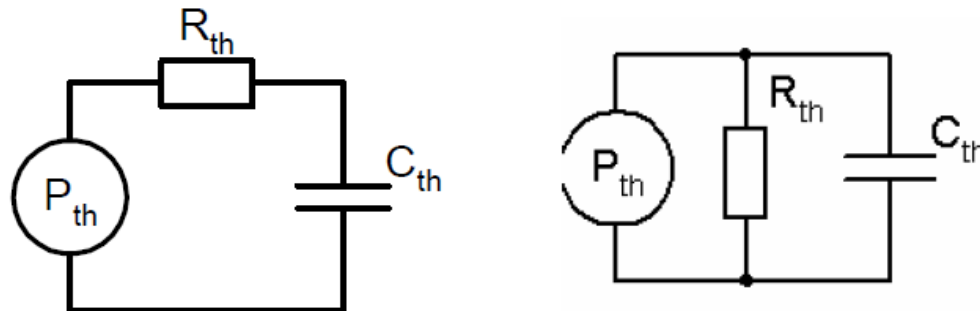
kde h je koeficient přestupu tepla.

$$\frac{P_{th}}{S} = h\Delta T$$

Pokud dochází k ohřevu tělesa s měrným teplem materiálu c o objemu V a hustotě ρ_m , pak tepelný tok lze vyjádřit:

$$P_{th} = \rho_m c V \frac{dT}{dt} = C_{th} \frac{dT}{dt}$$

Proces ohřevu tělesa je podobný nabíjení kondenzátoru a zavádí se **tepelná kapacita** C_{th} . Přejížděcí **proces odvodu tepla** tělesem při jeho současném ohřevu můžeme modelovat jako **nabíjení tepelné kapacity** C_{th} **přes odpor** R_{th} .



Teplo vzniká v křemíkové destičce a je rozptylováno chladičem do okolí chladiče o teplotě T_a . Vzniká-li v součástce ztrátový výkon P_z , je možno teplotu křemíkové destičky T_j vyjádřit vztahem:

$$T_j = P_z Z_{thja} + T_a \leq T_{jmax}$$

$Z_{thja}(t)$ je přechodná (tranzientní) tepelná impedance, která s časem roste.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Z_{thja}(t) = R_{th}$$

Pomocí tepelné analogie můžeme řešit komplexní systém výkonové polovodičové součástky s chladičem jako obvod, složený z dílčích tepelných odporů a tepelných kapacit.

$$P_z = \frac{T_j - T_a}{R_{thja}} = \frac{T_j - T_c}{R_{thjc}} = \frac{T_c - T_s}{R_{thcs}} = \frac{T_s - T_a}{R_{thsa}}$$

P_z je celkový ztrátový výkon generovaný v polovodičové struktuře

T_j je teplota ve středu křemíkové destičky

T_c je teplota pouzdra v místě styku s chladičem

T_s je teplota chladiče v místě styku s pouzdrem

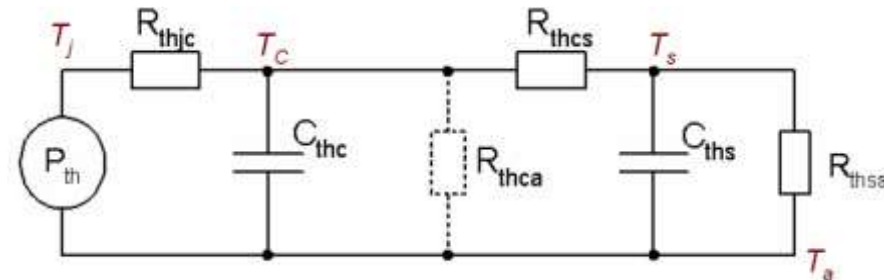
T_a je teplota okolí

R_{thja} je celkový tepelný odpor kombinace křemíkového čipu, pouzdra, chladiče a chladicího média

R_{thjc} je tepelný odpor mezi křemíkovým čipem a pouzdrem

R_{thcs} je tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem

R_{thsa} je tepelný odpor chladiče



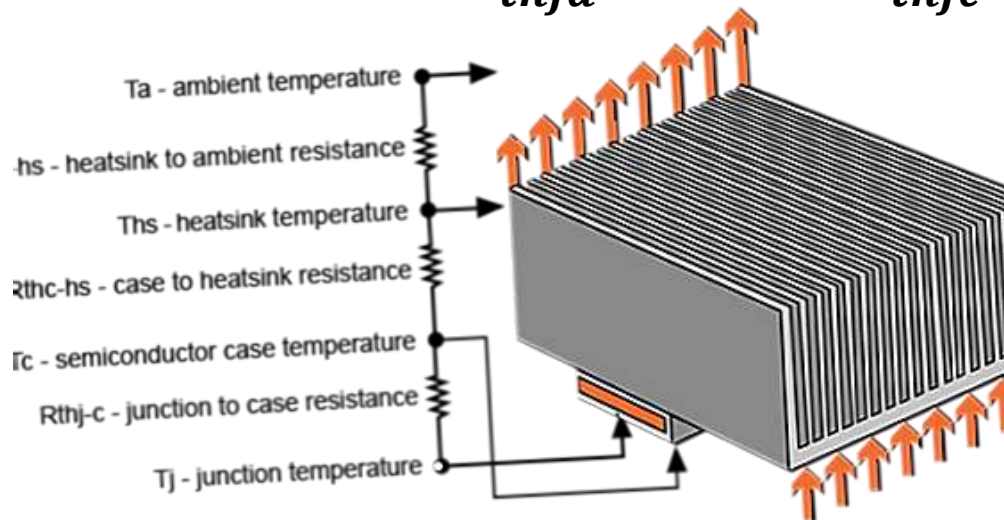
V ustáleném stavu platí:

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa} = \frac{T_j - T_a}{P_z}$$

Je-li **tepelný odpor** definované kombinace křemíkového čipu, pouzdra, chladiče a chladicího media R_{thja} , potom **maximální přípustný ztrátový výkon** v ustáleném stavu soustavy je:

$$P_{zmax} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{thja}} = \frac{T_{jmax} - T_c}{R_{thjc}}$$

S velikostí P_{max} je spojena proudová zatížitelnost součástky. Pokud součástka pracuje po dobu kratší, než je třeba k ustálení teplotních poměrů v teplotním obvodu, změnu teploty je třeba popsat pomocí přechodné tepelné impedance $Z_{th}(t)$.



Chladicí médium	Měrné teplo C_{th} (J/kgK)	Tepelná vodivost λ (W/mK)	Hustota ρ (kg/m ³)	Přestupní součinitel h (Wm ² /K)
Vzduch	1 006	0,027	1,09	8 - 20
Olej	2 130	0,181	850	540
Voda	4 180	0,6	995	6 500

Tepelný odpor chladiče R_{thsa} zabezpečuje přestup tepla z tělesa chladiče do okolního prostředí.

$$P_z = \frac{T_s - T_a}{R_{thsa}} = hS(T_s - T_a) \rightarrow R_{thsa} = \frac{1}{Sh}$$

U reálných chladičů není (vzhledem ke konečné tepelné vodivosti materiálu chladiče) teplota povrchu ve všech místech stejná. Celkový přestup tepla odpovídá menší efektivní ploše styku $S_{ef} < S$.

$$R_{thsa} = \frac{1}{S_{ef}h} = \frac{1}{Sh\eta}$$

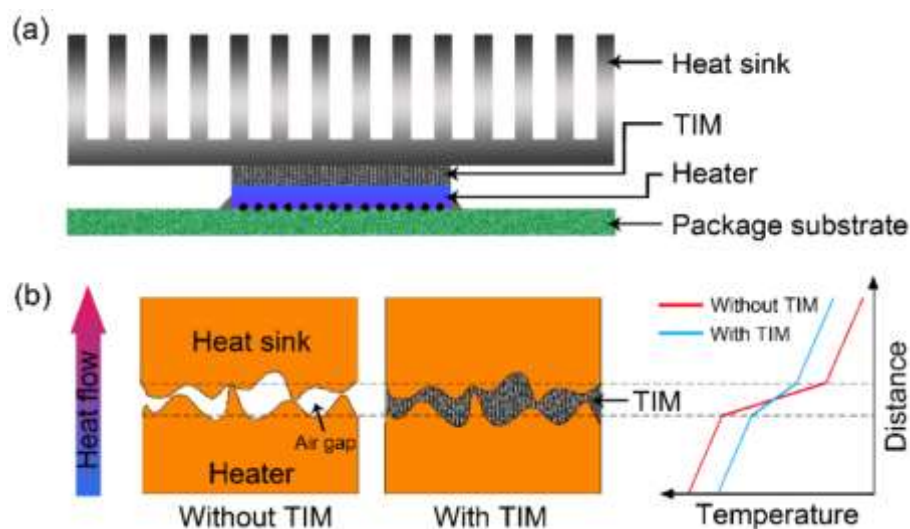
$\eta = S_{ef}/S$ je tzv. účinnost tělesa chladiče



Pro **dosažení maximální efektivní plochy chladiče** S_{ef} (při minimálním objemu zastavěného chladičem a minimální hmotnosti chladiče) se používají různě **profilované chladiče**, které umožňují efektivní rozptýlení tepla do okolí. Velikost součinitele přestupu tepla h závisí na mechanismu rozptylu tepla do okolního (chladicího) prostředí a na druhu chladicího media.

Tepelný odpor mezi pouzdem a chladičem R_{thcs} souvisí s mikronerovnostmi, které se částečně vyrovnají deformací při působení vnější síly.

Ke **zlepšení tepelného kontaktu** se používají **kontaktní pasty, silikonové vazelíny** s příměsí jemných částic kysličníků kovů (např. ZnO), nebo **koloidního stříbro**, které **zvyšují tepelnou vodivost** stykového media.



Kontrolní otázky

- Jakým způsobem se provádí kontaktování polovodičových čipů?
- Vysvětlete rozdíl mezi termokompresním, termosonickým a ultrasonickým bondováním.
- Jakým způsobem probíhá bondování na kuličku?
- Jakým způsobem probíhá klínové bondování?
- Jaké vlastnosti musí splňovat pouzdra čipů?
- Jaký je rozdíl mezi hermetickým a nehermetickým zapouzdračením čipů?
- Vysvětlete princip lisování a vstřikování pouzder čipů.
- Co je to fluidum a jakým způsobem se využívá při pouzdračení čipů?
- Vysvětlete zkratky MCM, SOC, SIP, WLP.
- Podle jakých parametrů navrhnete a vyberete vhodný chladič?
- Co je tepelná vodivost materiálů a jaká je její jednotka?
- Jak zlepším tepelný kontakt?
- Co je tepelný odpor materiálu?