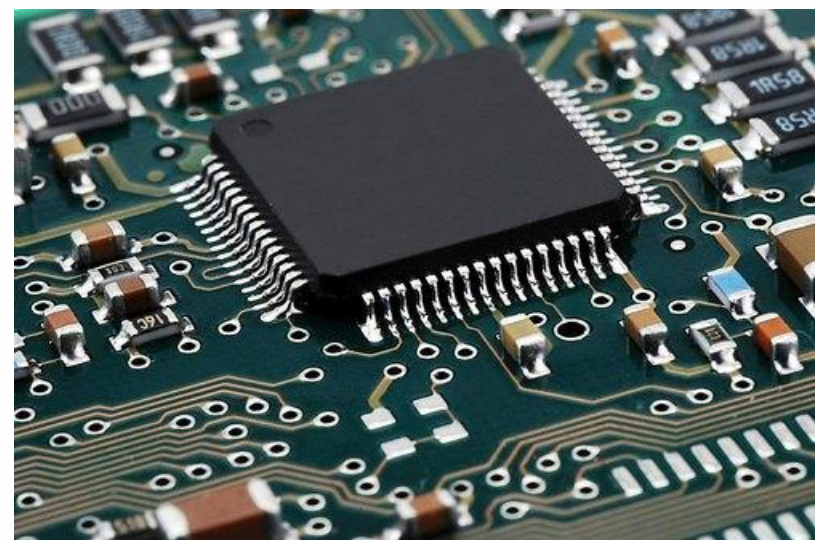


11

Konstrukční materiály pro elektrotechniku



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

MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, JAKÉ MATERIÁLY SE POUŽÍVAJÍ PRO KONSTRUKCI DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ, Z ČEHO SE SKLÁDAJÍ A JAKÉ PARAMETRY JSOU DŮLEŽITÉ.
- ZJISTÍTE, JESTLI LZE VYROBIT PLOŠNÝ SPOJ O DÉLCE NĚKOLIKA DESÍTEK METRŮ.
- DOZVÍTE SE, JAK SE ROZDĚLUJÍ PÁJKY POUŽÍVANÉ V ELEKTROTECHNICE A Z JAKÝCH MATERIÁLŮ JSOU SLOŽENÉ.
- POCHOPÍTE, JAKÝM ZPŮSOBEM OVLIVŇUJÍ NĚKTERÉ PRVKY VLASTNOSTI PÁJEK A JAK SE HODNOTÍ JEJICH KVALITA.
- ZJISTÍTE, CO JE TAJEMNÝ WOODŮV KOV.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ SE POUŽÍVAJÍ MATERIÁLY PRO KONSTRUKCI VLNOVODŮ A CO OVLIVŇUJE PŘENOS SVĚTELNÉHO PAPRSKU.
- DOZVÍTE SE, JAK NAVRHNOUT SPRÁVNÝ CHLADIČ PRO VÝKONOVÉ SOUČÁSTKY.
- ZJISTÍTE, JAK SE MĚNÍ NĚKTERÉ PARAMETRY MATERIÁLŮ V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI.

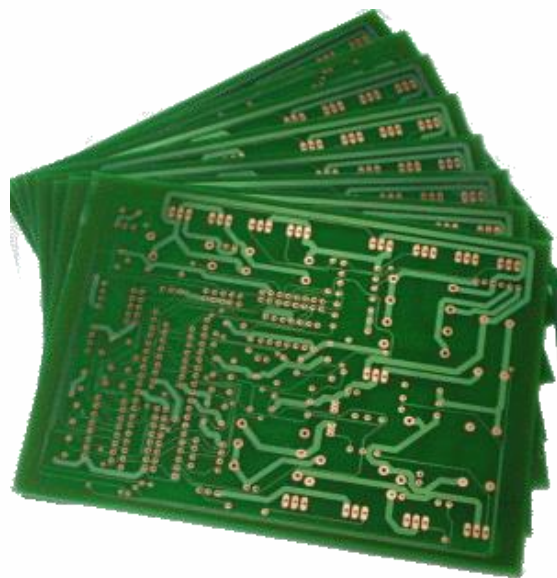


11.1 Materiály pro desky plošných spojů

Deska plošných spojů (DPS) je v elektronice deska určená k nesení a propojení elektronických součástek.

Mechanické a elektrické vlastnosti desek plošných spojů jsou nejvíce ovlivněny složením materiálu, ze kterého je základní deska zhotovena. Nejčastěji jsou užívány **fenolické nebo epoxidové pryskyřice v kombinaci s papírem nebo skleněnými vlákny**. Ve speciálních případech se také používají polyester, melaminy, silikony, polysulfony a další.

Plošné spoje jsou z hlediska své konstrukce **jednostranné, oboustranné nebo vícevrstvé**.



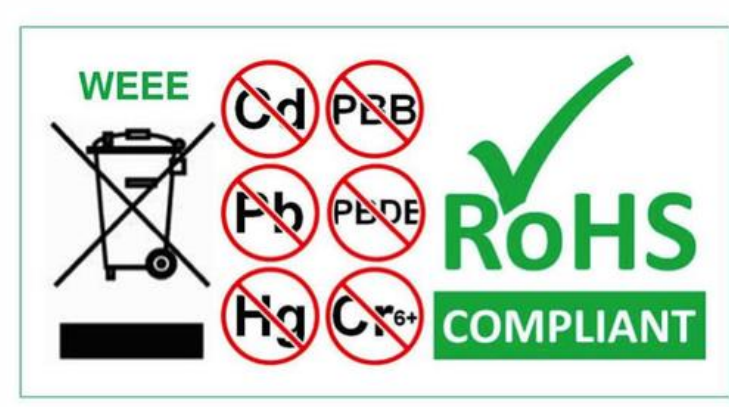
11.1.1 Materiálové složení desek plošných spojů

Materiálové složení DPS ovlivňuje směrnice **RoHS** (Restriction of Hazardous Substances), která zakazuje používání a stanovuje maximální obsahové limity vybraných toxických látek: **Kadmium (Cd)**, **Olovo (Pb)**, **Rtuť (Hg)**, **Šestimocný chrom**, **Polybromované Bifenylly (PBB)**, **Polybromované Bifenyl Etery (PBDE)**.

Materiály pro DPS se skládají z **výztuže**, **dielektrika** a **vodivé vrstvy**.

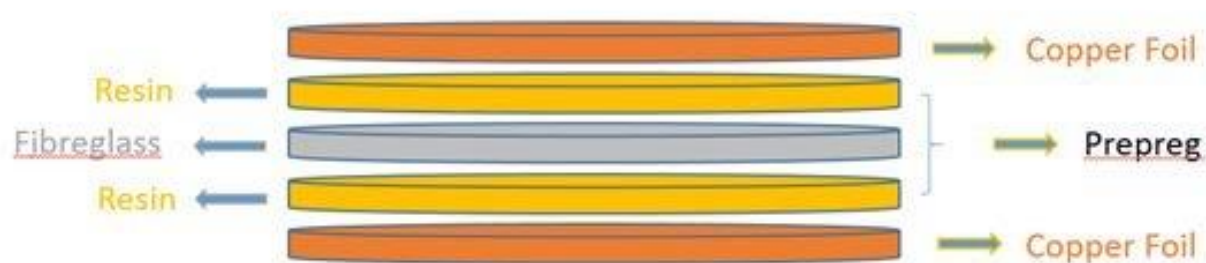
Výztuž

- Skelná tkanina
- Papír
- Kevlarové vlákno
- Uhlík
- Polymery



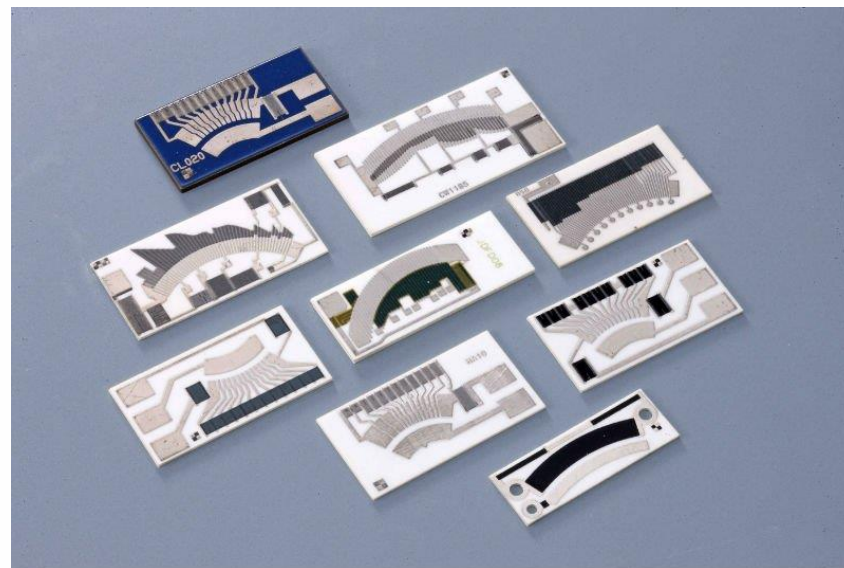
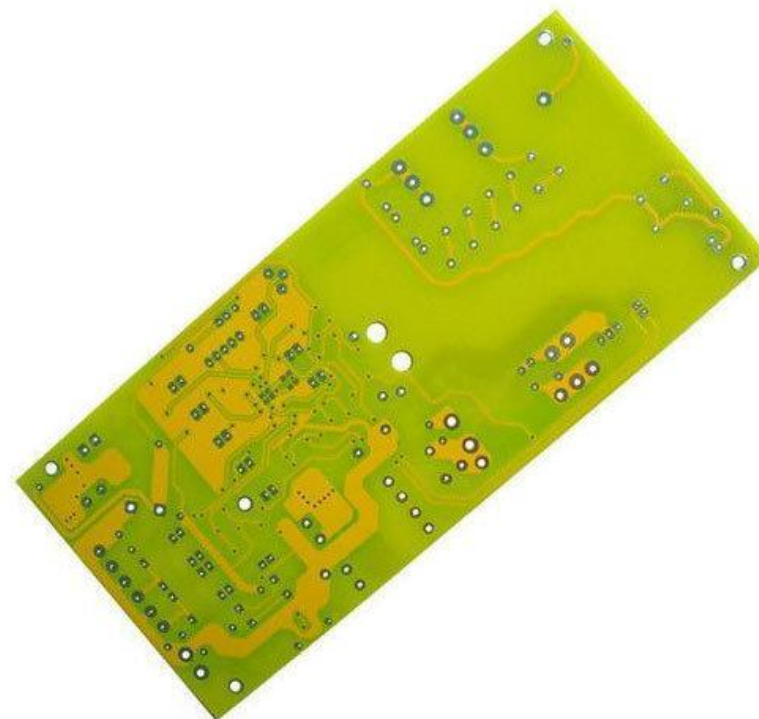
Dielektrikum (matrice)

- Epoxidová pryskyřice
- Fenolické pryskyřice
- PTFE
- Polyester, aramid
- Keramika



11.1.2 Rozdělení desek plošných spojů

- Fenolické substráty
- Epoxidové substráty
- Substráty s kovovou maticí
- Polyamidové substráty
- PTFE substráty
- Keramické substráty
- Ohebné substráty – bez výztuže



11.1.3 Sledované parametry materiálů pro desky plošných spojů

Elektrické vlastnosti

- Vnitřní a povrchová rezistivita
- Relativní permitivita
- Ztrátový činitel
- Elektrická pevnost

Stabilita parametrů

- Vliv vlhkosti
- Vliv prachu
- Vliv chemických nečistot

Tepelné vlastnosti

- SMD součástky → vyšší hustota zástavby → vyšší teplota
- Ovlivnění spolehlivosti
- Odvod tepla – proudění, vedení a sálání
- Teplota skelného přechodu

Mechanické vlastnosti

- Pevnost
- Nehořlavost
- Stálost rozměrů
- Rovinnost povrchu
- Odolnost vůči výrobním a provozním prostředí
- Tepelná roztažnost



11.1.4 Materiály na základě fenolických pryskyřic

DPS na základě **fenolických pryskyřic** jsou charakteristické **dobrými elektrickými vlastnostmi** (kromě odolnosti vůči elektrickému oblouku) a **nízkou cenou**. Z toho důvodu se nejvíce používají v oblasti **levné spotřební elektroniky**.

Výztuží je nejčastěji **vrstvený papír**, umístěný mezi měděné fólie, který se impregnuje ve vakuu **fenol-formaldehydovou pryskyřicí**. **Tlakem a zvýšenou teplotou** dojde k zesítní molekul a vzniká základní deska.

Obsah pryskyřice se pohybuje v rozmezí 35-60 %. Při **větším obsahu pryskyřice je materiál tvrdší a křehčí**, což komplikuje vrtání, ražení otvorů a mechanické opracování desky. Proto se dále používají materiály, které snižují křehkost.

Tvrdost se označuje symbolem X.
Křehkost symbolem P.



11.1.5 Materiály na základě epoxidových pryskyřic

Epoxidovou pryskyřicí rozpouštěnou v rozpouštědle se impregnuje většinou **skelná tkanina** (popřípadě papír), která se vysuší a nařeže na požadovanou velikost. Tím vzniknou tzv. **prepregy**, které se vloží mezi měděné fólie. Dále následuje **vytvrzování pryskyřice pod tlakem** za přítomnosti katalyzátoru v lisech. Vytvrzená pryskyřice je **stabilní a odolává kyselinám a zásadám**. Avšak při **zvýšené teplotě měkne**.

Pod označením **G10** se skrývá **nejpoužívanější materiál** pro výrobu desek plošných spojů. Vyznačuje se **dobrými elektrickými i mechanickými vlastnostmi**. Jako výztuž je použita **skelná tkanina**. Tento materiál lze použít do frekvencí až 40 MHz. **Nehořlavá varianta G10** se označuje **FR-4**.

Nejkvalitnější a také **nejdražší materiál** na bázi epoxidových pryskyřic má označení **G11**. Základem je **skelná tkanina a modifikovaný epoxid**. Hůře se opracovává, avšak má **vynikající tepelnou odolnost**.

Pro **SMD** je nejvhodnější **výztuž z aramidového vlákna** impregnované epoxidovou pryskyřicí. Má **nízkou tepelnou roztažnost**, a proto je vhodné pro SMD s velkým počtem vývodů a také tam, kde se vyskytují **teplotní cykly s extrémními teplotami**.

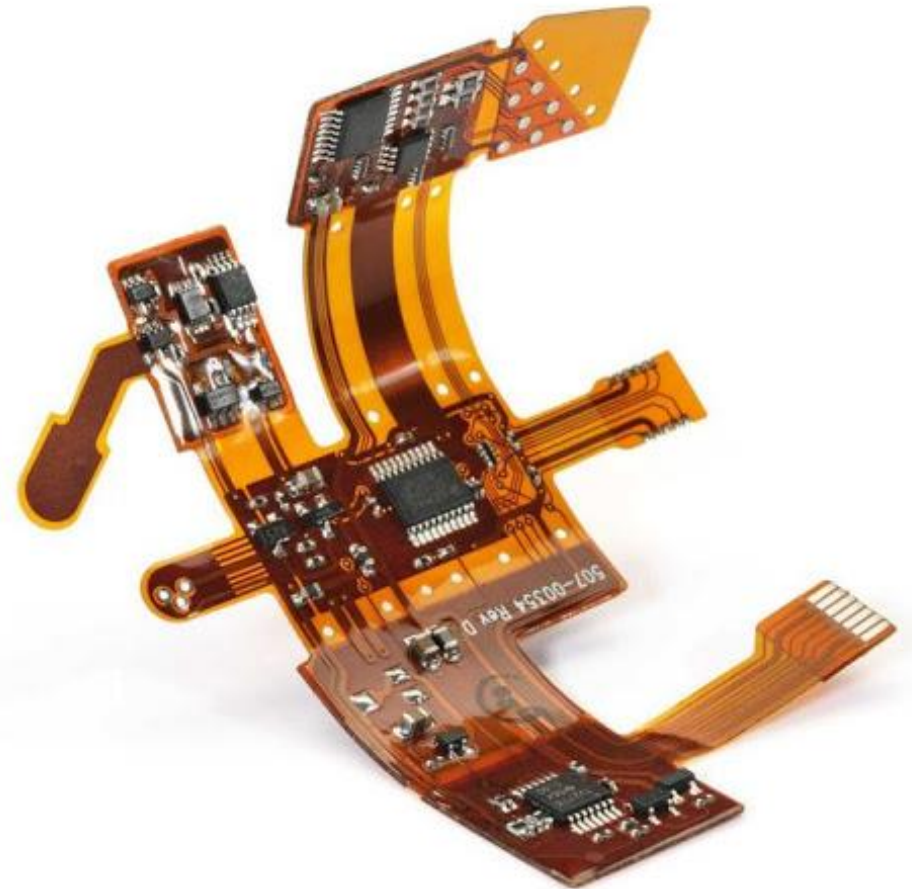


11.1.6 Materiály na základě polyamidů/polyimidů

Jedná se o **polyamidovou/polyimidovou pryskyřici se skleněnými vlákny**. Tyto materiály mají **vysokou tepelnou odolnost**, která může dosahovat až **290 °C**. Polyamid má **vysokou navlhavost** a je drahý, proto se používá pouze ve speciálních aplikacích.

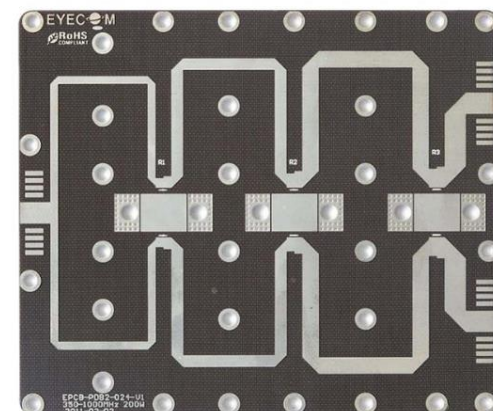
Polyimid = kapton

Polyamidová pryskyřice s aramidovými vlákny se díky nízkému TCE (tepelná roztažnost) užívá **pro pouzdra součástek s vysokým počtem vývodů** a tam, kde se předpokládají **extrémní podmínky** ve spojení s požadavkem **dlouhé životnosti**.



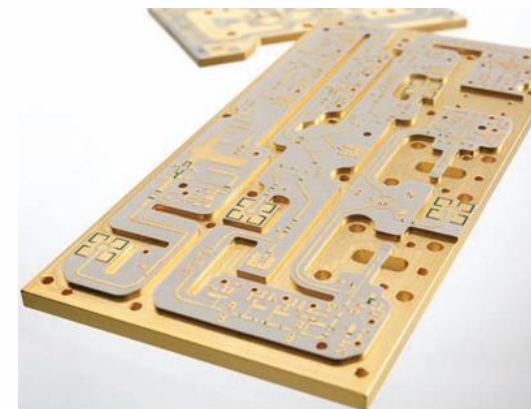
11.1.7 Materiály na základě polytetrafluoretylenu (PTFE)

Jedná se o kompozice se skleněnými vlákny. Výsledkem jsou **vynikající elektrické vlastnosti** materiálu, který lze **použít při vysokých frekvencích**. Materiál je velice drahý a obtížně se z něj vyrábí vícevrstvé desky.



11.1.8 Materiály s kovovou maticí

Kompozitní materiály s kovovou maticí tzv. MMC (metal matrix composite) jsou vyráběny **spojením kovu s jiným materiálem**. Matrice pro tento typ kompozitního materiálu většinou bývají lehké slitiny **hliníku, hořčíku, titanu**, mohou to být také slitiny železa, kobaltu, mědi. Pro **výztuž** se používají **keramické materiály**, jako třeba vlákna z karbidu křemíku nebo některé kovové materiály, například wolframová vlákna, ocel.

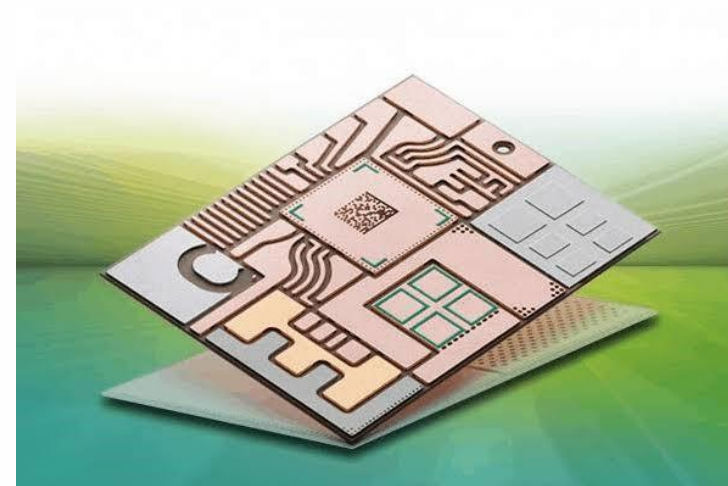
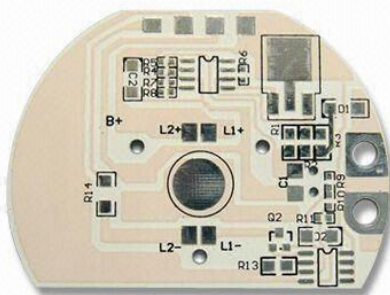
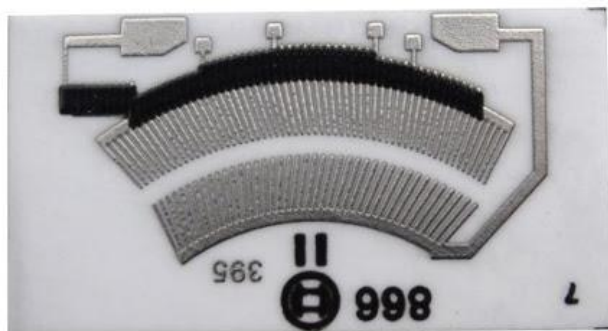


Kompozity s kovovou maticí mají velmi **vysokou pevnost, vysokou mez únavy, velkou houževnatost** **vysoký modul pružnosti**. Jsou žáruvzdorné, **elektricky i teplotně vodivé** a **odolné vůči vlhkému prostředí**.

11.1.9 Keramické materiály

Korundová Al_2O_3 , beryliová keramika BeO , keramika s nízkou teplotou zpracování LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic), aluminium-nitrid AlN se používají pro speciální konstrukce DPS. Tyto materiály jsou **neohebné** a jako klasické plošné spoje se používají velmi zřídka. Většinou se realizují pouze **menší elektronické moduly** pro speciální aplikace.

Keramika je **dobrým materiálem** v oblasti **vysokých teplot**. Keramické matrice při vysokých teplotách odolávají v tahu více než některé kovové matrice. Tyto materiály mají velmi dobrou tepelnou vodivost, dobrou mechanickou odolnost a malou hodnotu TCE (teplotní součinitel délkové roztažnosti). Jejich nevýhodou však je náročnější opracování, křehkost, vyšší hmotnost, rozměrová limitace a především cena.



11.1.10 Ohebné (flexibilní) plošné spoje

Ohebné plošné spoje mohou být zhotoveny za použití **polyesteru nebo polyimidu (kaptonu)** jako podkladového materiálu v závislosti na požadavcích propojovaných součástí. Touto metodou je možné realizovat jednovrstvé spoje na polyesterovém podkladu, ale i vícevrstvé spoje polyimidovém substrátu. Tloušťka materiálu bývá obvykle 0,1 mm, tloušťka mědi 35 nebo 18 μm .

Pro ohebné plošné spoje může být použit i materiál FR4 tloušťky 0,1 mm, nebo jiné speciální materiály.

*Britská firma Trackwise vyrobila **flexibilní plošný spoj**, založený na polyimidu o délce **26 metrů**, určený pro solární systém v křídle letounu.*



11.1.11 Měděná fólie

Jako měděná fólie se používá **elektrolytická měď čistoty 99 %**. Tloušťky měděné fólie jsou odvozeny z anglosaských jednotek vyjadřujících váhu mědi v uncích vztaženou na čtvereční stopu [oz/ft^2]. **Nejčastěji se používá materiál $1 \text{ oz}/\text{ft}^2$, čemuž přibližně odpovídá tloušťka fólie $35 \mu\text{m}$.** Měděné fólie se **vyrábí v tloušťkách $18, 35, 70$ a $105 \mu\text{m}$.**

Z konstrukčního hlediska Cu fólie tloušťky $18 \mu\text{m}$ používáme pro konstrukci jemných spojů, $35 \mu\text{m}$ pro běžné aplikace a $70 \mu\text{m}$ nebo $105 \mu\text{m}$ pro konstrukce, které vyžadují velkou proudovou zatížitelnost nebo odolnost vůči otřesům (automobilové aplikace).



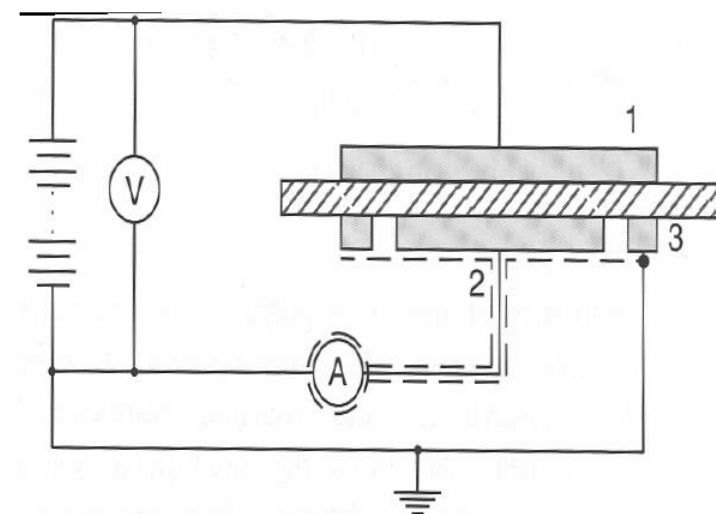
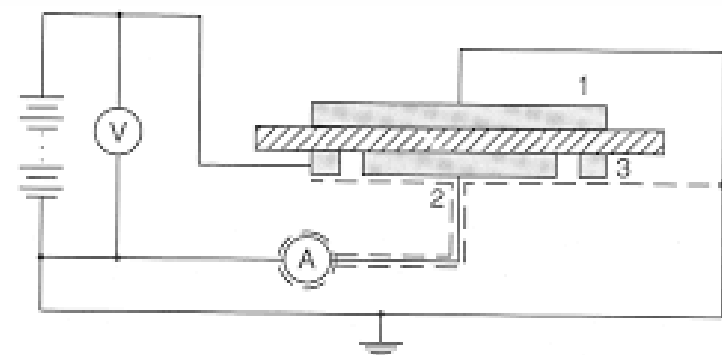
11.2 Parametry materiálů pro plošné spoje

11.2.1 Izolační odpor

Rozlišujeme měrný **povrchový izolační odpor** a měrný **vnitřní izolační odpor**. Vnitřní a povrchový odpor určuje práh vodivosti a zkratu.

Měrný povrchový odpor se měří mezi kruhově realizovanými elektrodami na plošném spoji. Měří se megaohmetrem při napětí 500 V. Změřená hodnota materiálu FR-4 bývá $R_p = 10^{12} \Omega$.

Měrný vnitřní odpor se měří mezi elektrodami na plošném spoji. Měření se provádí megaohmetrem, který je připojen mezi elektrodu z horní strany plošného spoje a elektrodu z dolní strany plošného spoje. Změřená hodnota materiálu FR-4 bývá $R_v = 10^{13} \Omega$.



11.2.2 Elektrická pevnost

Jedná se o elektrickou odolnost materiálu vůči elektrickému výboji kolmo k elektrodám. Materiál se vloží mezi kovové elektrody, na které se přivádí střídavé napětí 50 Hz s amplitudou, která se zvyšuje rychlostí 5 kV/s až do okamžiku, kdy dojde k průrazu mezi elektrodami. Výsledek se uvádí ve [V/m].

11.2.3 Průrazné napětí

Jedná se o elektrickou odolnost materiálu vůči elektrickému výboji ve směru laminátu. Výsledek se uvádí ve [V].

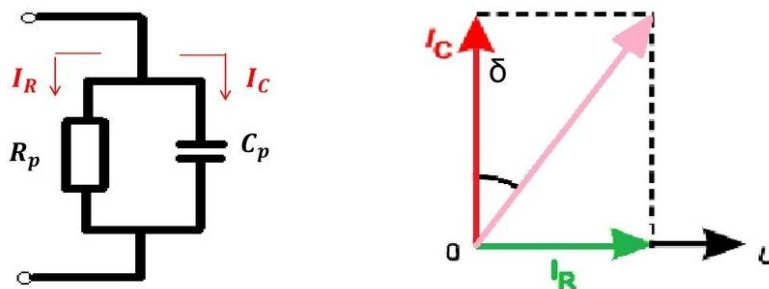
11.2.4 Dielektrická konstanta (relativní permitivita)

Jedná se o schopnost materiálu zachycovat elektrostatickou energii. Měří se kapacitním můstkem nejčastěji při 1 MHz. Závisí na frekvenci, teplotě a obsahu vlhkosti a složení základního materiálu. Ovlivňuje kapacitní vazby obvodů. Relativní permitivita je u kvalitnějších materiálu nižší. Její hodnota klesá s podílem skelné složky.



11.2.5 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel $\tan \delta$ je poměr mezi odporovou a kapacitní složkou impedance. Čím je ztrátový činitel nižší, tím je materiál vhodnější pro práci v rychlých impulsních, nebo vysokofrekvenčních obvodech. Jedná se o **míru dielektrických ztrát**. Závisí na frekvenci a teplotě. Ovlivňuje útlum signálů a ztráty vedením.



11.2.6 Tepelná roztažnost a teplota skelného přechodu

Tepelná roztažnost je jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla tělesu změní jeho délkové rozměry (objem) tělesa. Pro tepelnou roztažnost se uvádí **zkratka TCE** (*Thermal Coefficient of Expansion*). Významná změna TCE nastává při teplotě, kterou nazýváme **teplota skelného přechodu T_g** . Je to teplota, při které se materiál změní ze stavu tvrdého a relativně křehkého do stavu viskózního nebo pružného. Překročení této mezní hodnoty má za následek destrukci plošného spoje, jeho delaminaci, popřípadě popraskání vodivých cest nebo prokovů v otvorech. Pro materiál FR-4 bývá $T_g = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

11.3 Pájky

Pájky jsou slitiny, které se používají v roztaveném stavu k vytváření **nerozebíratelného spojení dvou kovů**. Princip pájení spočívá v tom, že **roztavená pájka smočí povrch kovů, proniká do jejich povrchu** a po ochlazení a ztuhnutí je pevně spojí. Přitom **nedochází k natavení spojovaných kovů**. Spojení je zajištěno dobrou přilnavostí pájky se spojovanými součástmi. O jejich použití rozhoduje řada fyzikálních, technologických i mechanických vlastností.

Při technologii pájení dochází na rozdíl od svařování k **difuznímu spojování dílů** nataveným přídavným materiálem pomocí **tavidla** za teploty nižší než je teplota tání spojovaných dílů. **Úkolem tavidla je odstranit povlak oxidu** na stykových plochách. Je vhodné při pájení **užít ochranného plynu**, např. argonu, který chrání spolehlivě stykové plochy před oxidací. Použít je možné i pracovních plynů s vysokou afinitou ke kyslíku, např. směsi dusíku s malým množstvím vodíku jako reakčního plynu.

Pájky jsou dodávány ve formě pásů, fólií, tyčí, drátů, dále jako trubičky s tavidlem, lité tyče a zrna.



11.3.1 Základní požadavky na materiály pro pájky

- **dobrá tepelná a elektrická vodivost**
- **nízká teplota při pájení**
- **dobrá smáčivost**
- **velká mechanická pevnost spojů**
- **odolnost spojů proti korozi**

Pájka musí mít vždy **nižší teplotu tání než spojované kovy**. Pájka **nesmí tvořit** s pájenými kovy **slitiny o podstatně nižší teplotě tání**. Pájka na rozdíl od svařovacího drátu nemusí mít stejné ani podobné chemické složení jako spojované kovy. Nečistoty obsažené v pájce výrazně zhoršují deformační vlastnosti přechodové oblasti spoje, resp. korozní odolnost pájeného spoje. Proto se vyžaduje **vysoká čistota surovin** pro jejich výrobu.



Pájka musí mít nejen **dobré mechanické vlastnosti** (pevnost ve smyku, v tahu, tažnost, popř. tvrdost), ale musí mít zvláště schopnost vytvářet **pevné spoje**. To je závislé na chemickém složení pájky a jakosti (složení) difuzní oblasti spoje.

Podle teploty tání rozlišujeme pájky:

- snadno tavitelné (do 200 °C)
- měkké (200 – 500 °C)
- tvrdé (nad 500 °C)

Měkké pájky dělí na **cínové** a **zvláštní** a **tvrdé** na **hliníkové**, **měděné** a **stříbrné**. Měkké pájky jsou slitiny kovů, které se taví při nízkých teplotách, např. Sn, Pb, Cd, Sb a Bi. Pro náročné účely lze využít zlatou difuzní pájku. U tvrdých pájek klesá jejich sortiment nad 1000 °C, popř. nad 1500 °C, kdy ubývá kovů s tak vysokou teplotou tání. Pájky používané v elektronice mají odlišné vlastnosti a patří do skupiny **speciálních pájek**. Jejich společným rysem je vysoká čistota použitých surovin.



11.3.2 Snadno tavitelné pájky

Jsou to obvykle binární nebo vícesložkové slitiny blízké eutektickému složení na bázi Pb-Bi-Sn-Cd lišící se teplotou tání v rozmezí 60 až 215 °C.

Některé z těchto slitin mají svoje názvy, např. **Woodův kov (Bi-Cd-Sn-Pb)** s teplotou tání 68 °C a **Roseův kov (Bi-Sn-Pb)** s teplotou tání 94 °C. Přidáním india lze snížit teplotu tání Woodova kovu až na 47 °C. Pájka galia s 8 % Sn má teplotu tání 20 °C, pájka galia s 24 % india dokonce teplotu tání pouze 16 °C. Indium a jeho slitiny ulpívají dobře na mnohých kovech i nekověch. Proto se snadno tavitelné slitiny **In-Cu-Ag** a **In-Cu-Au** používají na pájení slitin zlata.

Ze slitin této skupiny se vyrábějí např. **tepelné pojistky pro síťové transformátory**. Snadno tavitelné slitiny se hodí také pro plnění trubek (např. při výrobě vlnovodů) před jejich ohýbáním.



Woodův kov

11.3.3 Měkké pájky

Měkkými pájkami nazýváme **slitiny s nízkou teplotou tání**. Jsou to **slitiny cínu a olova**, které se užívají ke spojování mědi, mosazi, zinku, olova, lze pájet i ocel. Pájky s obsahem cínu pod 20 % jsou hůře tavitelné. Pájky s obsahem cínu do 30 % slouží ke klempířským pracím. Pájky s vyšším **obsahem cínu až do 90 %** patří k pájkám **používaným nejčastěji v elektrotechnice**. Pájky obsahující **60 % cínu** se vyznačují **nejvyšší pevností a tvrdostí**.

Obsah cínu v podstatné míře **ovlivňuje kvalitu pájení**. Naproti tomu **olovo** má **špatnou smáčivost** a se základním materiálem metalurgicky nereaguje.

Elektrická vodivost cínových pájek je v rozmezí 10 až 5 % vodivosti čisté mědi, přičemž vodivost se zvyšuje s rostoucím obsahem cínu.

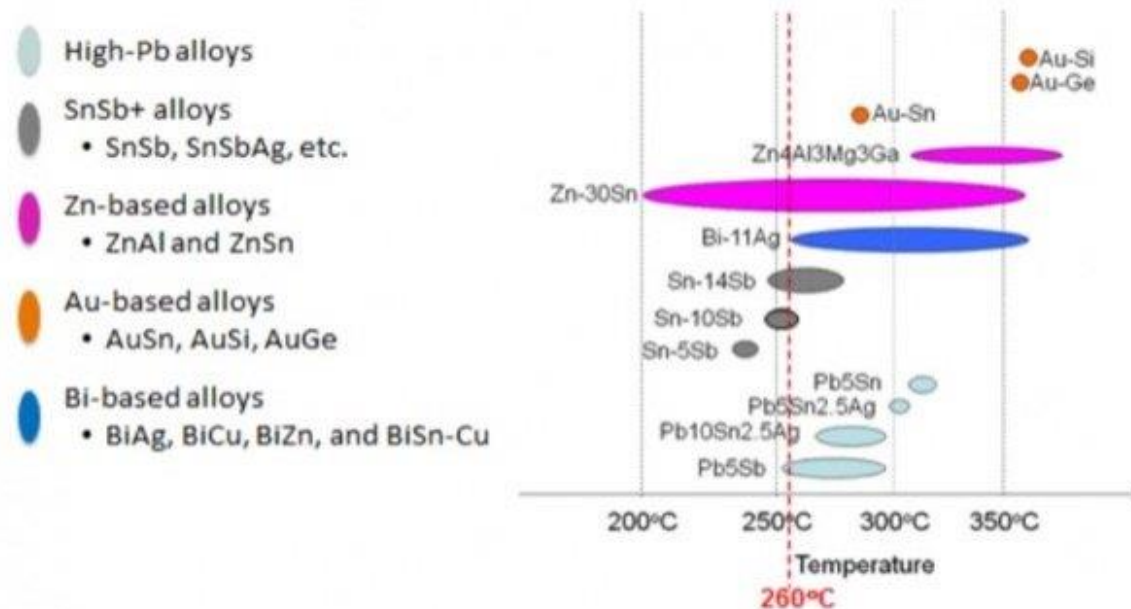
Nejlepší pájecí a mechanické vlastnosti mají cínové pájky Sn50Pb a Sn60Pb. Dosahují pevnosti v tahu 40 až 60 MPa a asi 40 % tažnosti. Pevnost pájeného spoje je však vyšší.



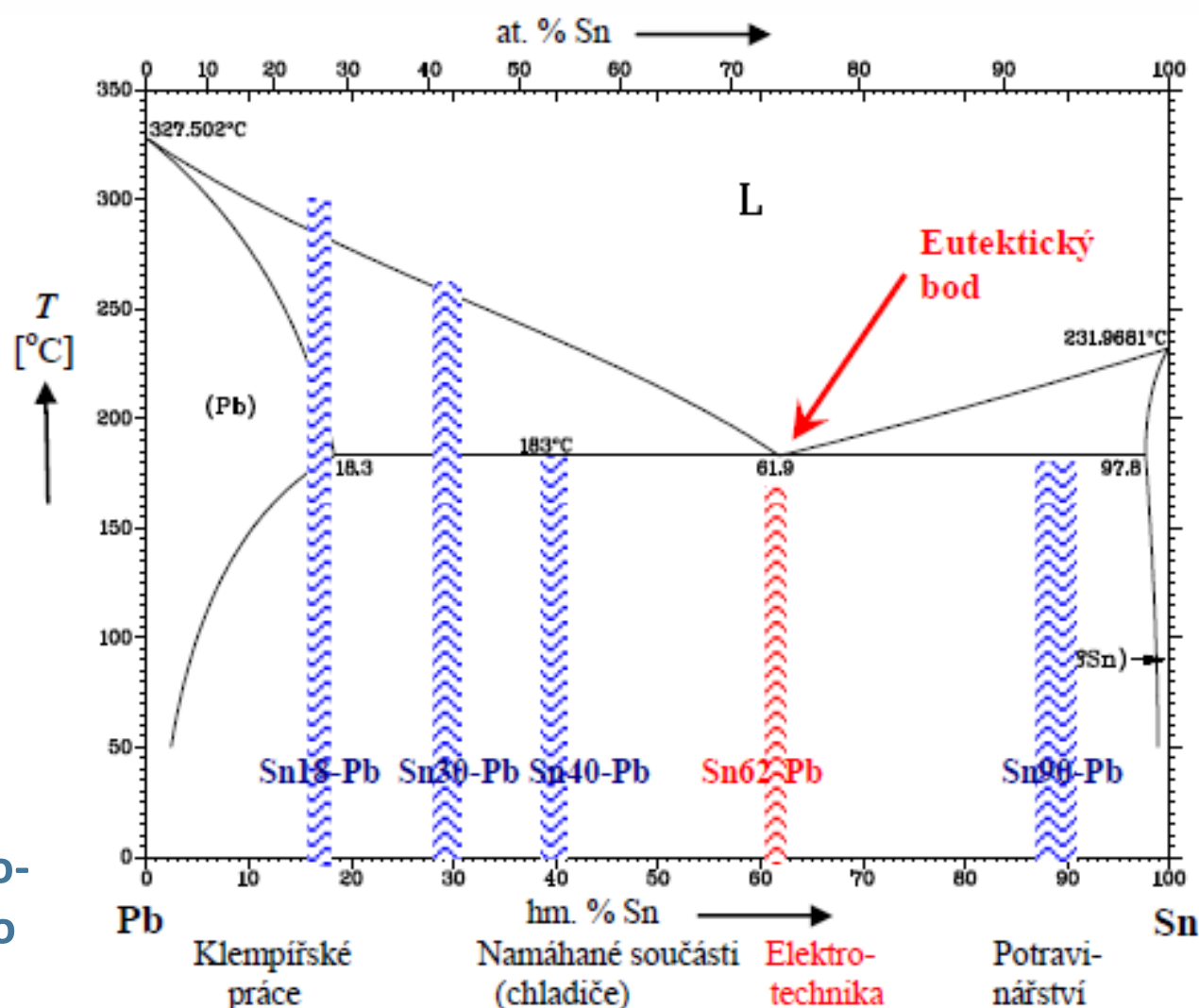
11.3.4 Bezolovnaté pájky

Největší **problémy z ekologického hlediska** způsobuje **olovo** v měkkých pájkách a **kadmium** v pájkách tvrdých. Alternativní **bezolovnaté pájky** jsou měkké pájky s **vysokým obsahem Sn** a **malým obsahem legujících prvků Ag, Cu, Bi, Sb, Zn, In, Mg** a jejich kombinace většinou eutektického složení. Při použití bezolovnatých pájek je třeba počítat se zvýšenou teplotou při procesu pájení. Z eutektických **binárních slitin cínu** mají nižší teplotu tání jen slitiny s vysokým obsahem **bismutu** (58 % Bi), **india** (52 % In) a **galia** (86,5 % Ga). Problémem je jejich vyšší cena, nedostatečné světové zásoby a nejasná dostupnost.

Nejčastěji se používají **ternární eutektické slitiny**, např. **SnAg_{3,5}Cu_{0,7}** s **teplotou tání 217 °C**, případně kvaternární slitiny cínu. V tomto případě jsou teploty tání vždy vyšší než u klasických olovnatých pájek Sn-Pb (minimálně o 30 °C).



Eutektikum je tuhá směs dvou látek, jejichž krystaly se vytvářely při tuhnutí společně. Čisté eutektikum vzniká v takovém mísícím poměru obou složek, při kterém je teplota tuhnutí směsi nejnižší.

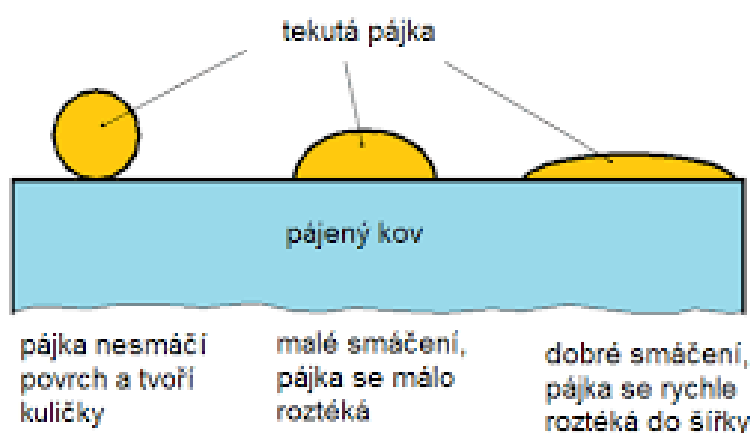


Binární diagram systému olovo-cín s vyznačením eutektického bodu.

11.3.5 Smáčivost

Smáčivost je definována jako **schopnost tekuté pájky přilnout** k čistému povrchu spojovaného materiálu při určité teplotě. Naproti tomu **roztékavost** je **schopnost tekuté pájky roztéci** se při určité teplotě po vodorovném povrchu základního materiálu. Smáčivost úzce souvisí s povrchovým napětím působícím mezi rozhraními.

Na hladině pájky vzniká povlak oxidů. **Nečistoty mají nežádoucí vliv na smáčivost pájky** a na její **mechanické vlastnosti**. Povrch spoje přestává být lesklý a začínají se objevovat dendrity. Roste tvrdost pájky, která křehne. Z těchto důvodů je třeba chemickému složení pájky věnovat pozornost a **sledovat obsah tzv. pájecích jedů**. Jedná se o zinek, kadmium, železo a hliník.



Měření smáčivosti povrchů:

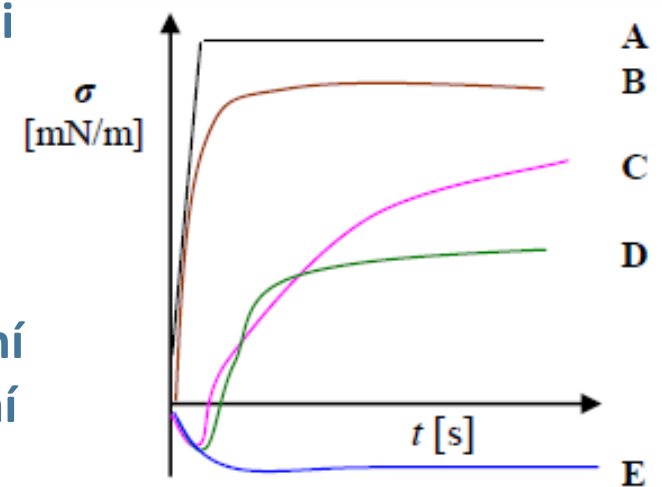
A: Dokonalé smáčení

B: Dobré smáčení

C: Pomalé smáčení

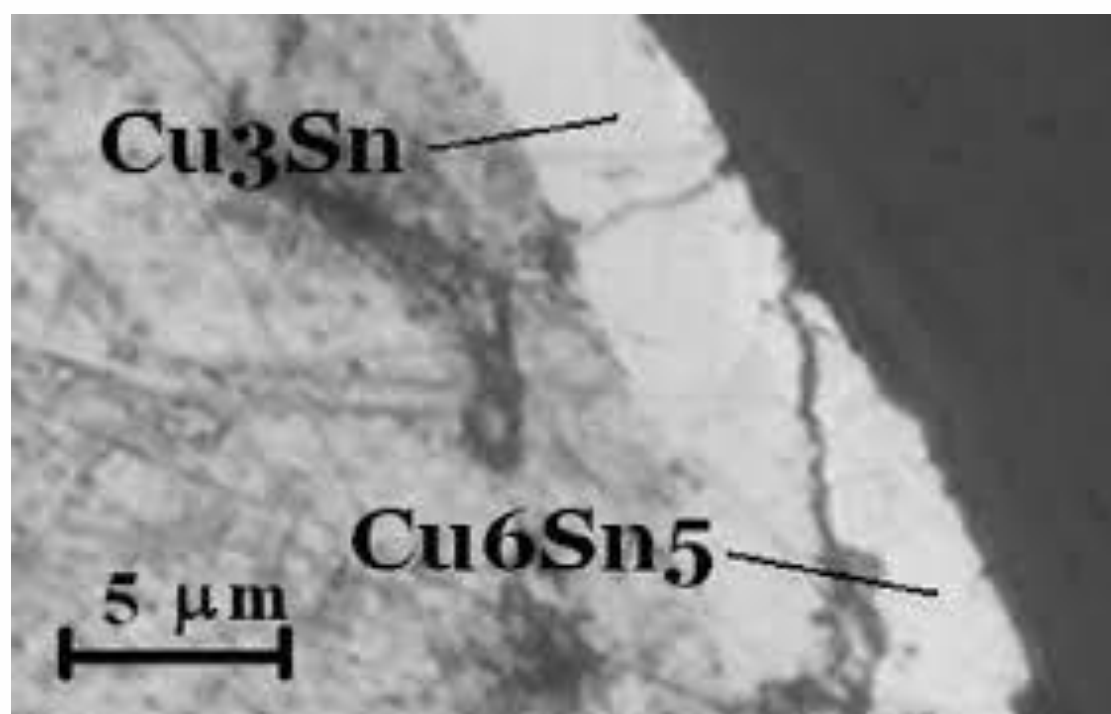
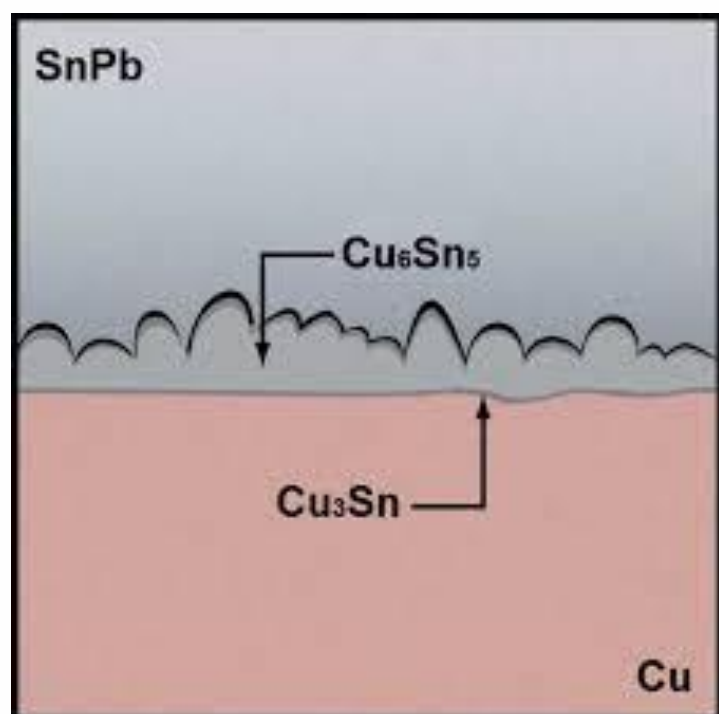
D: Špatné smáčení

E: Žádné smáčení



11.3.6 Intermetalické sloučeniny

Všechny pájky na bázi cínu reagují s mědí, železem a niklem za tvorby **intermetalické sloučeniny** na fázových rozhraních. Reagují-li cínové slitiny s mědí, vznikají intermetalické fáze **Cu_3Sn** a **Cu_6Sn_5** na fázovém rozhraní (Cu_3Sn blízko Cu substrátu a Cu_6Sn_5 ve styku s pájkou) a někdy i v pájce. Rychlost růstu fází se mění pro různé pájky. Fáze **Cu_3Sn** je vždy velmi tenká. Fáze **Cu_6Sn_5** mívá tvar „dlaždic“.



11.3.7 Tavidla pro měkké pájení

Slouží jako **pájecí prostředek při spojování kovů**. Tavidla se podílejí nejen na **kvalitě spojů**, ale jeho zbytky **ovlivňují chování zapájených desek** s plošnými spoji zejména ve vlhkém prostředí a tím ovlivňují funkci elektronického zařízení. Ke **spojení kovů pomocí pájek** dojde pouze v případě, když se dostanou **do styku odhalené mřížky jednotlivých dvojic kovů**. **Odstranit z povrchu kovů oxidy**, nitridy a zhmožděné povlaky s nečistotami je hlavním **úkolem tavidla**. Tavidla pro měkké pájení dělíme tradičně na **ostrá a mírná**. **Ostrá tavidla obsahují soli, kyseliny nebo organické sloučeniny halogenů** a výrazně zlepšují kvalitu pájených spojů. Rozpouštějí snadno oxidy kovů a odhalují kovovou mřížku. Jejich zbytky ale vyvolávají obávanou korozi. **Mírná tavidla naproti tomu působí pomaleji, zato nevyvolávají korozi**.

Kalafuna pro přípravu tavidel a pájecích laků

Používá se jako **základní složka** řady tavidel, pájecích laků a ochranných povlaků pájecích lázní. Protože jde o **přírodní produkt**, mohou být její vlastnosti kolísavé. Připravuje se **rafinací smůly**, která vytéká z ran jehličnatých stromů, zejména borovic.



11.3.8 Tvrdé pájky

Pájky s **teplotou tání nad 500 °C** (tzv. tvrdé pájky) slouží k **pájení mědi, oceli, litiny, niklu** apod. Tvrdým pájením lze spojovat i jiné kovy a slitiny tající za vyšší teploty. Tvrdé pájky se používají u spojů, které mají být **pevné i při vyšších teplotách, houževnaté, odolné proti únavě a korozi**.

Nejobvyklejší tvrdé pájky jsou **pájky mosazné s přísadami niklu, stříbra** a jiných prvků, např. normalizovaná pájka **Ms60-Ag** (teplota tání 870 až 900 °C), **MsNi8, Ms60-Si-Sn** atd. **Stříbrné pájky** s menším obsahem stříbra se používají k spájení masivních kusů z mědi a jejich slitin a nízkouhlíkových ocelí. **Stříbrné pájky** mají nižší teplotu tání než mosazné pájky, spoje mají dobré mechanické vlastnosti a odolávají chemickým vlivům. K pájení hliníku a jeho slitin slouží obvykle **tvrdá hliníková pájka**, což je slitina Al s křemíkem.

Tavidla pro tvrdé pájky

Nejběžnějším tavidlem při použití tvrdých pájek je **borax a kyselina boritá** a jejich směsi. Tavidla, která musí účinně rozrušovat velmi stálé oxidy, jak je tomu např. u slitin hliníku a ocelí, se skládají převážně z chloridů a fluoridů alkalických kovů. Zbytky tavidel jsou vesměs hygroskopické a musí se po pájení odstranit. Jinak nastává zhoubná **koroze spoje**.



11.4 Materiály pro vlnovody a světlovody

Optické vlnovody (světlovody) jsou prvky, které umožňují **přenos informace pomocí optického záření**. Zdrojem záření bývá nejčastěji **laser nebo laserová dioda**. Záření je modulováno v optickém modulátoru a vysílacím systémem je dále transportováno do optického prostředí. Po průchodu optickým prostředím je záření přijato fotodetektorem, který je přemění opět na elektrický signál.

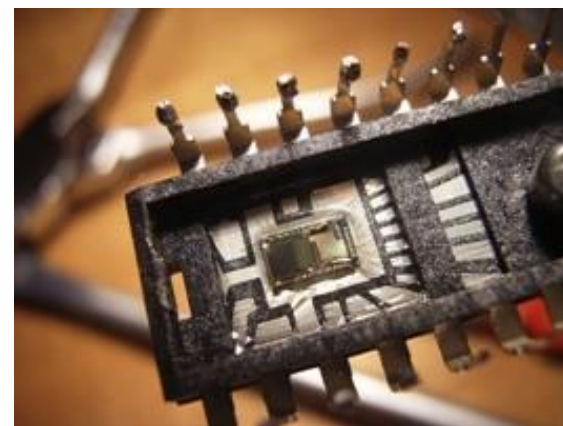
Optickým prostředím může být libovolné prostředí propustné pro optický signál, např. **atmosféra, vakuum nebo optický vlnovod**. Optoelektronické systémy využívají k **přenosu informace** optické signály **od infračervené oblasti spektra až po ultrafialové záření**. Jsou zkoumány možnosti, jak rozšířit toto pásmo také na oblast rentgenového záření. Optický přenos informace je dnes převážně realizován v oblasti **vlnových délek** mezi **0,4 a 1,2 μm** .



11.4.1 Planární světlovody

Planární světlovody jsou určeny pro **přenos** optického signálu **na krátkou vzdálenost** (jednotky cm až mm). Slouží k realizaci miniaturních světlovodů, různých optických spojů, optických integrovaných obvodů, atd. Pasivní světlovody jsou **vytvářeny polykrystalickými nebo amorfními tenkými vrstvami**. U integrovaných optických obvodů se k realizaci příslušným motivů užívá litografie.

Na podložce (substrátu) je vytvořena **dielektrická vrstva pasivního světlovodu**, kterou prochází světelný signál. Obklopující prostředí má **index lomu** n_o , podložka n_2 a optická vrstva n_1 .

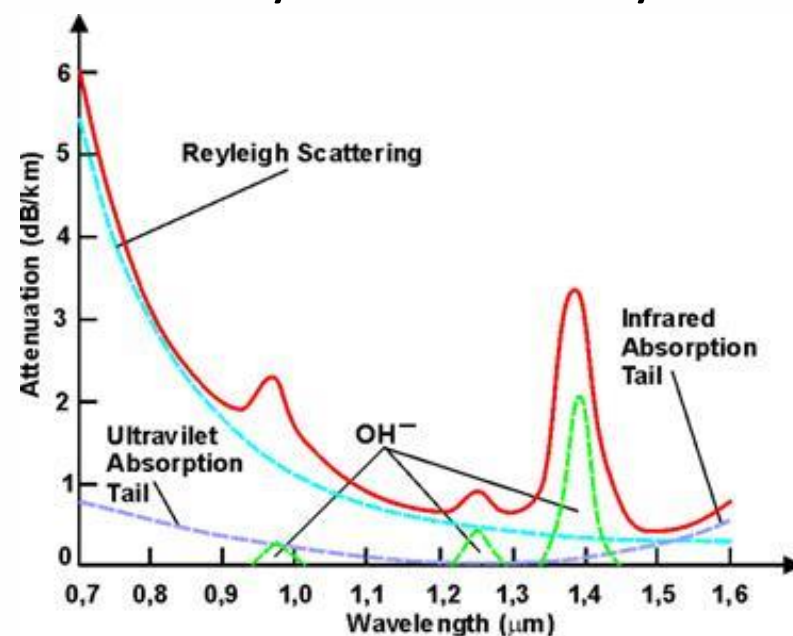
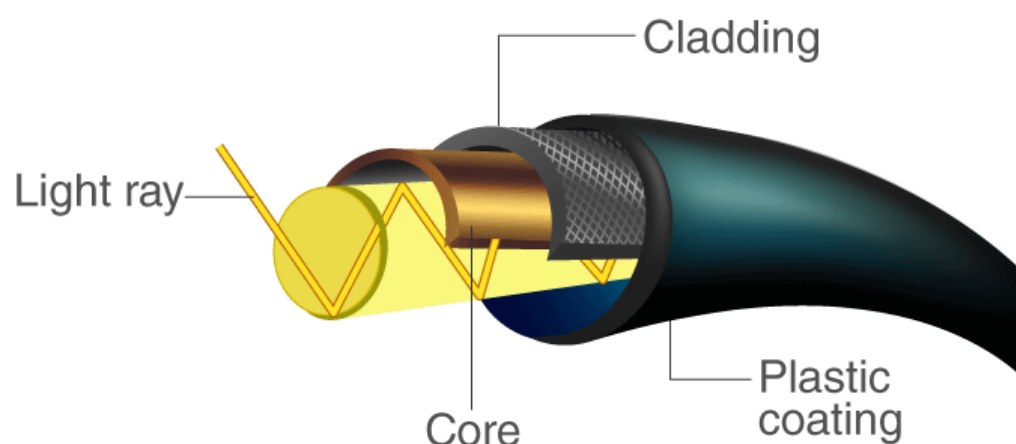


Materiálové požadavky

- totální odraz: $n_o < n_1 > n_2$
- **vhodný materiál** podložky i vrstvy – různá skla SiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , GaAs, ZnS, LiNbO_3 , některé organické materiály (polyester, hexametyloxan)
- vhodná technologie přípravy vrstev – **vakuové napařování** či **napařování** termická oxidace, iontové bombardování, plazmová polymerizace
- **vysoká čistota podložky** – defekty mohou ovlivnit aktivní vrstvu
- **vysoká optická propustnost** vrstvy - útlum menší než 0,1 dB/mm

11.4.2 Vlákňové světlovody

Hlavní oblastí užití je **přenos optické informace na velké vzdálenosti**. Proto jejich sledovanou vlastností je **útlum procházejícího signálu**. **Absorpce přenášeného signálu** v objemu materiálu je způsobena především **nečistotami v materiálu**. Nejzávažnějšími nečistotami jsou prvky **Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu** a další. Příčinou absorpce mohou být i **nehomogenity materiálu** vznikající při procesu výroby vláken pro světlovody. Absorpci mohou vyvolat **harmonické kmity radikálových skupin OH^-** , které jsou způsobeny přítomností vody v materiálu. S ohledem na spektrální charakteristiku základního materiálu vlnovodu, musí být vhodně vybrán také vysílač a přijímač přenosové trasy.



Materiálové požadavky

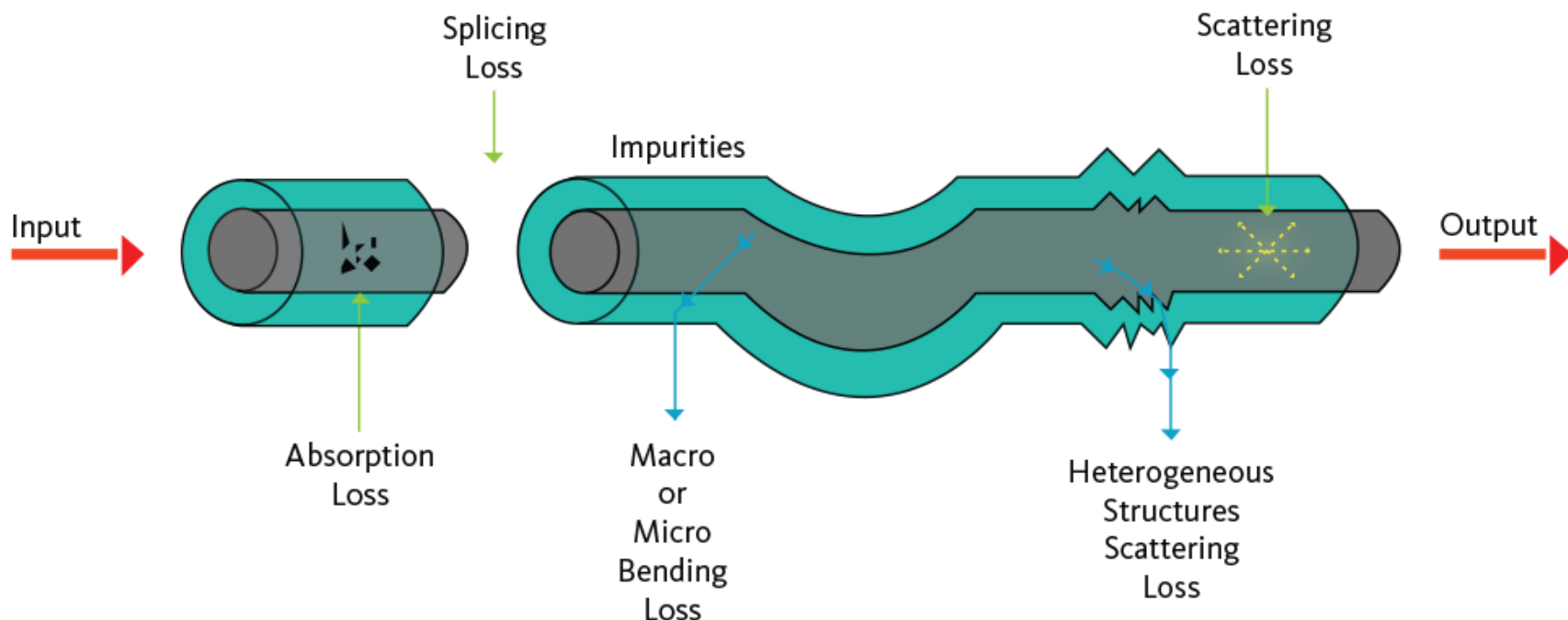
Vláknové světlovody jsou výhradně **vyráběny ze skel nebo** některých typů **plastů** (PMMA – polymethylmetakrylát, polyvinylidenfluorid, polymetylsiloxan) nebo kombinace skla a plastů. Používají se různé typy vícesložkových skel (sodno-vápenaté, borito-křemičité, fosforečnan-křemičitanové a alkalicko-olovnaté. Nejjednodušším vlnovodem je optické vlákno z homogenního materiálu obklopeného atmosférou. Světelný paprsek se vlnovodem šíří opakovanými odrazy na rozhraní vlákno-obklopující prostředí.

- splnění podmínky: $n_1 > n_2$ (n_1 - index lomu materiálu vlákna, n_2 - index lomu prostředí, které toto vlákno obklopuje)
- úhel, pod kterým dopadá svazek na rozhraní jádro-plášť, musí být menší než **kritický úhel pro úplný vnitřní odraz**
- všechny mnohonásobně odražené paprsky (vlny) se musí sčítat ve fázi a vzájemně se nesmí rušit

K dalším vlastnostem patří **mechanické vlastnosti** (pevnost v tahu, ohebnost), odolnost proti povětrnostním vlivům, časová a chemická stálost, malá závislost parametrů na teplotě a na ionizujícím záření. Praktický význam pro vedení elektromagnetických vln ve světelné oblasti na větší vzdálenost mají pouze vláknové optické vlnovody.



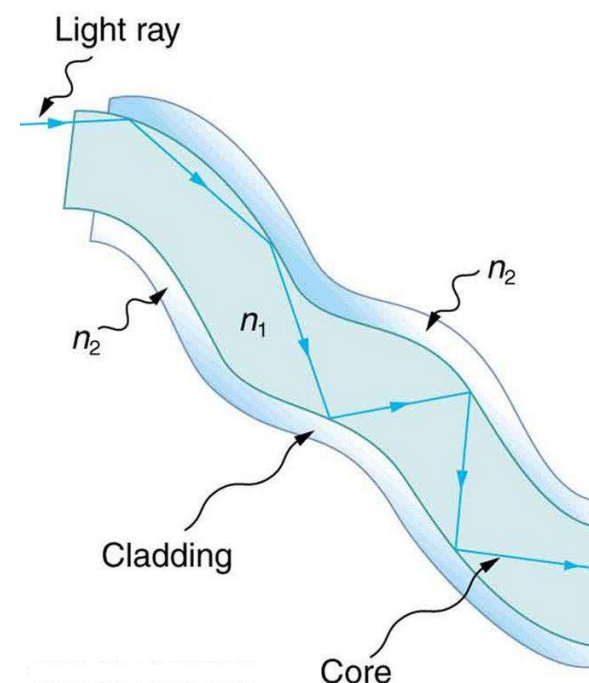
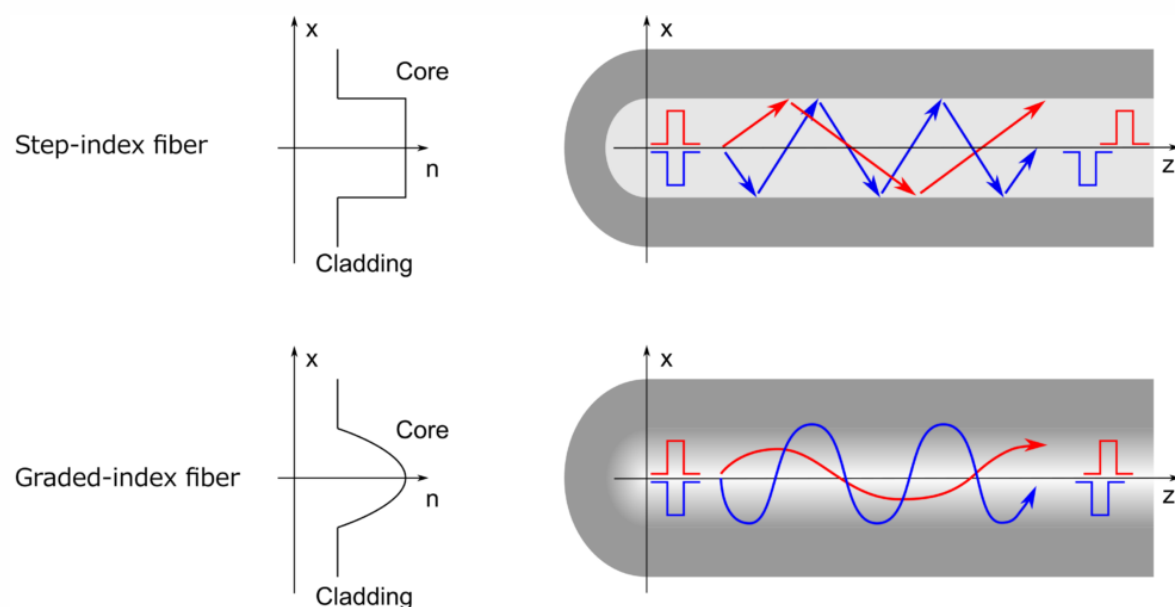
Jsou hledány materiály umožňující **přenos v oblasti vlnových délek nad $2\ \mu\text{m}$** , kde jsou malé ztráty absorpcí. Z materiálů nejlépe vyhovuje **ZnCl_2** . Teoretické **ztráty jsou $10^{-3}\ \text{dB/km}$** . Z dalších materiálů, které by mohly umožnit přenos signálu s velmi nízkým útlumem, jsou např. halogenní skla, jejichž základem je Te_2O_3 , AgCl a AgBr . Pro primární pláště světlovodů jsou nejvhodnějšími materiály epoxiakryláty, polybutadieny a silikony.



Obecně rozdělujeme vláknové vlnovody na **vlnovody se skokovou změnou indexu lomu** (step index vlákna) a **vlnovody se spojitě proměnným indexem lomu** (gradientní). **Index lomu je funkcí kmitočtu** a tato závislost má význam pro šíření signálu různých zdrojů vlnovodem.

Vlnovody se vyrábějí jako **jednovidové** nebo **vícevidové** (vid je charakterizován vzájemnou polohou vektorů intenzity elektrického a magnetického pole). **Jednovidové vlnovody** mají při velmi malém indexu lomu průměr jádra okolo $5\ \mu\text{m}$ a vnější průměr pláště asi $75\ \mu\text{m}$.

Vícevidové světlovody mají průměr jádra více než $60\ \mu\text{m}$ a vnější průměr pláště okolo $75\ \mu\text{m}$.

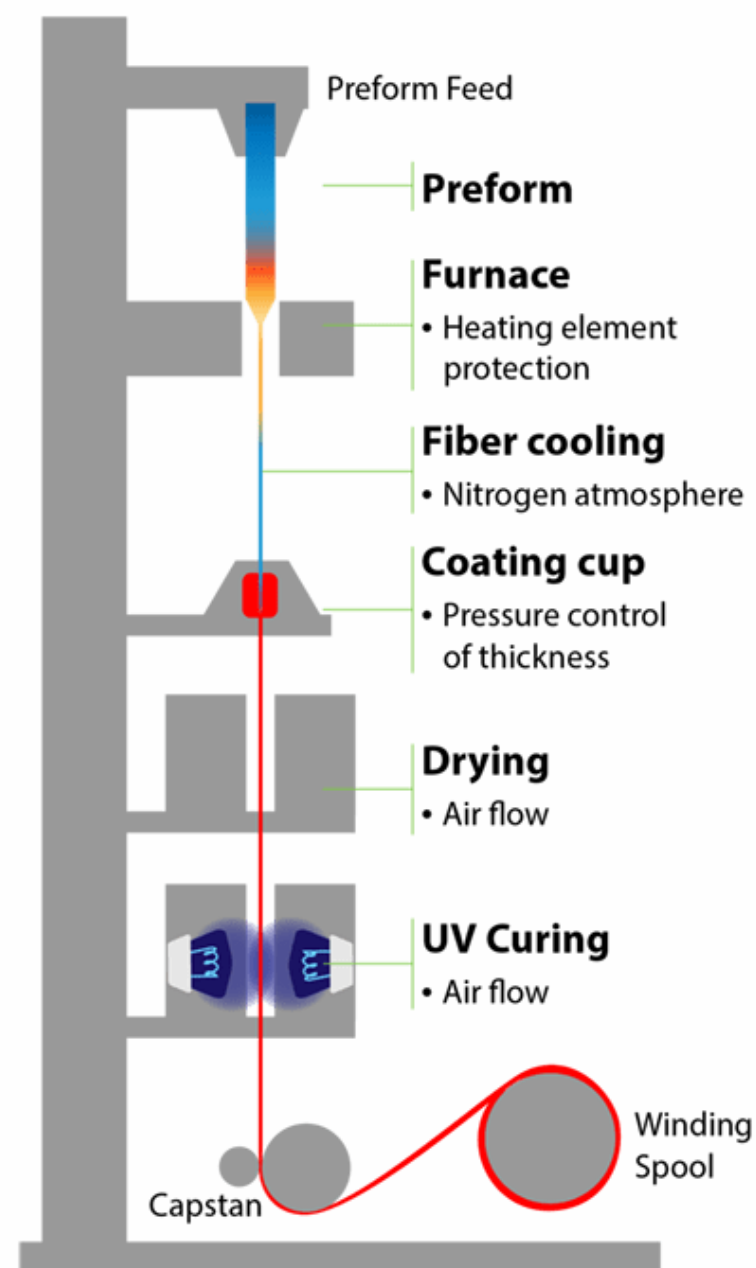


11.4.3 Technologie výroby skleněných vláknových světlovodů

Výroba vlnovodů je ekonomicky nákladná. Výchozí surovina pro křemenné optické vlnovody se získává nejčastěji **metodou CVD** (Chemical Vapor Deposition). SiO_2 se vylučuje z par, které vznikají tepelným rozkladem SiCl_4 v oxidační atmosféře. Vyloučený SiO_2 se usazuje na křemenném nebo keramickém nositeli. **Vrstvy bývají porézní, a proto se ještě sintrují. Změny indexu lomu se v tomto případě dosahuje zpravidla oxidy GeO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , TiO_2 (zvyšují index lomu) a dalších kovů nebo příměsemi B_2O_3 či fluoru, které snižují index lomu.** Teploty zpracování těchto skel bývají v rozmezí 1200 - 1500 °C a dají se snížit přidáním oxidů alkalických kovů.

Základní technologie

- tažení z preformy
- metoda dvojitého kelímku



11.5 Chlazení elektronických součástek

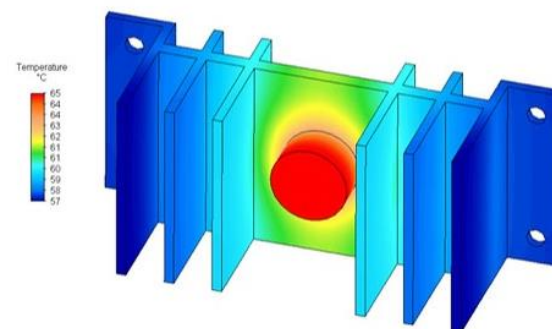
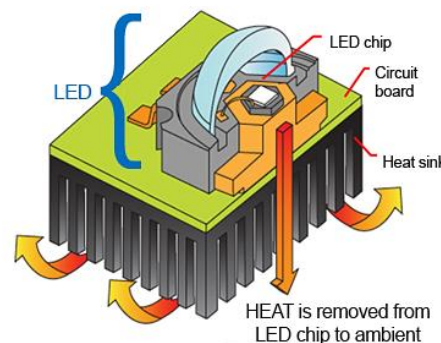
Při provozu polovodičových součástek vzniká **ztrátový výkon**, který má za následek **zvýšení teploty**. Zvýšená teplota má za následek:

- 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}

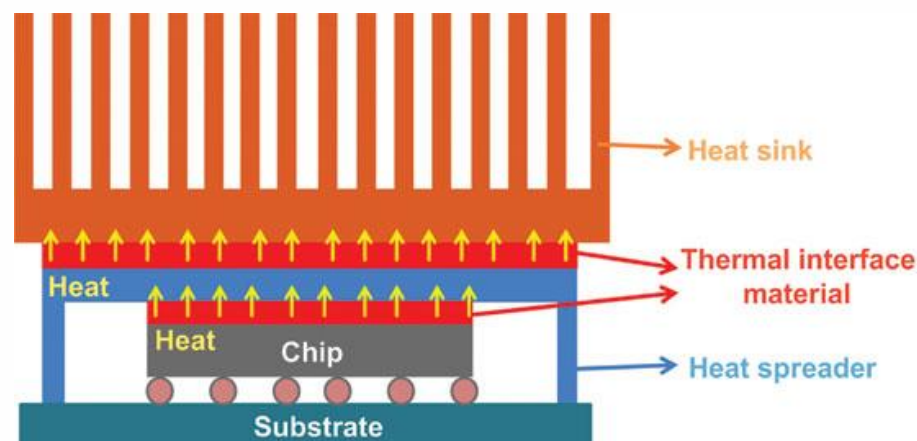
Pro **udržení provozních teplot** ve stanoveném teplotním intervalu je nezbytné **chlazení součástek**, tj. odvádění vznikajícího ztrátového výkonu z objemu součástky a **rozptylování do okolního prostředí**.



11.5.1 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 se **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}



11.5.2 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:

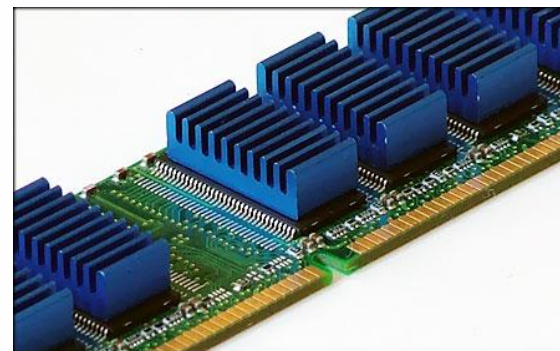
$$P_{th} = \lambda S \frac{dT}{dx} = \lambda S \frac{\Delta T}{l} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

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:

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

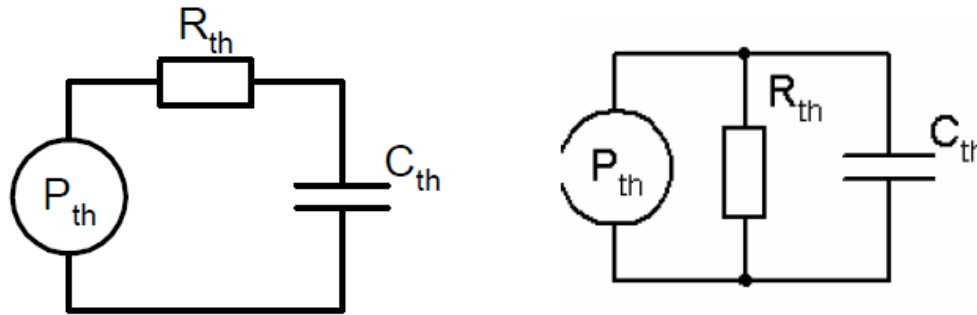
kde h je koeficient přestupu tepla.



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} . Přechodový **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 pouzdrém

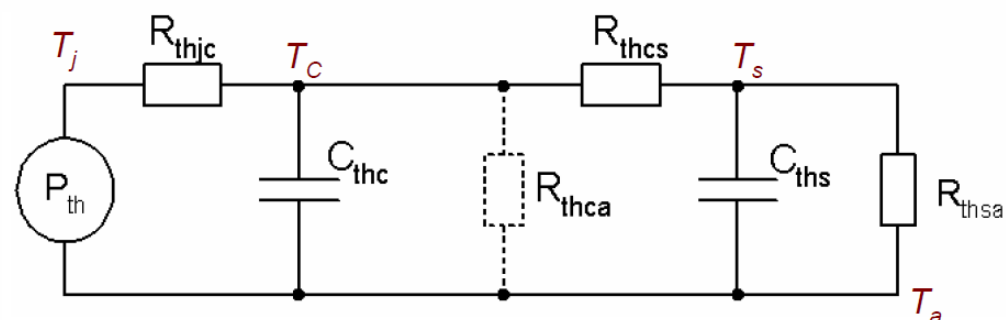
T_a je teplota okolí

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

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

R_{thcs} je tepelný odpor mezi pouzdrém a chladičem

R_{thsa} je tepelný odpor chladiče



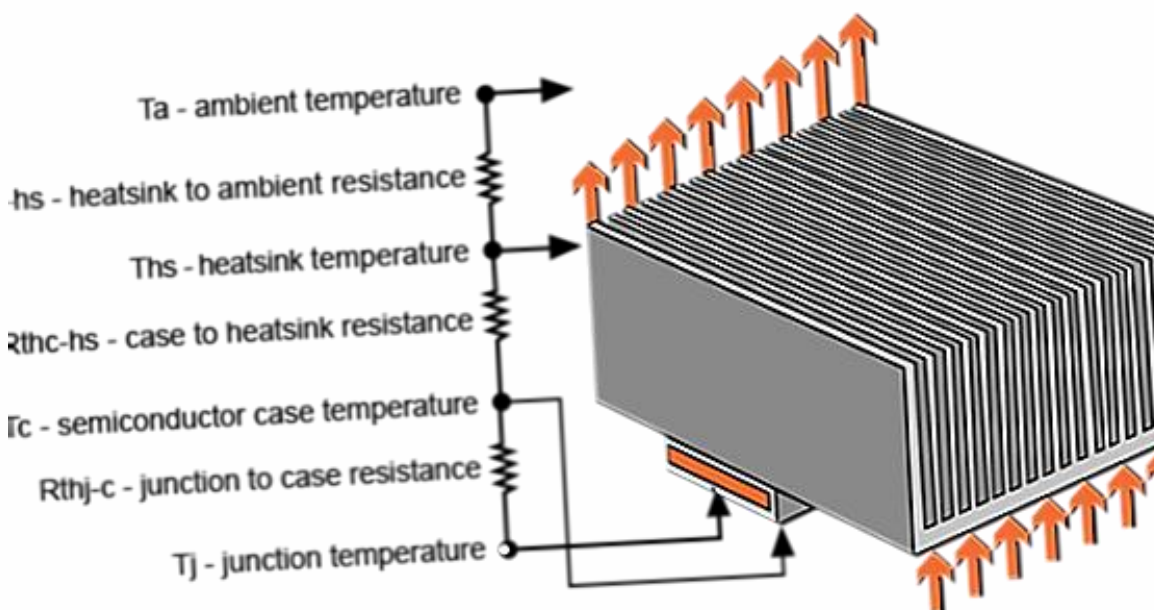
V ustáleném stavu platí:

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

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 $S_{ef} < S$.

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

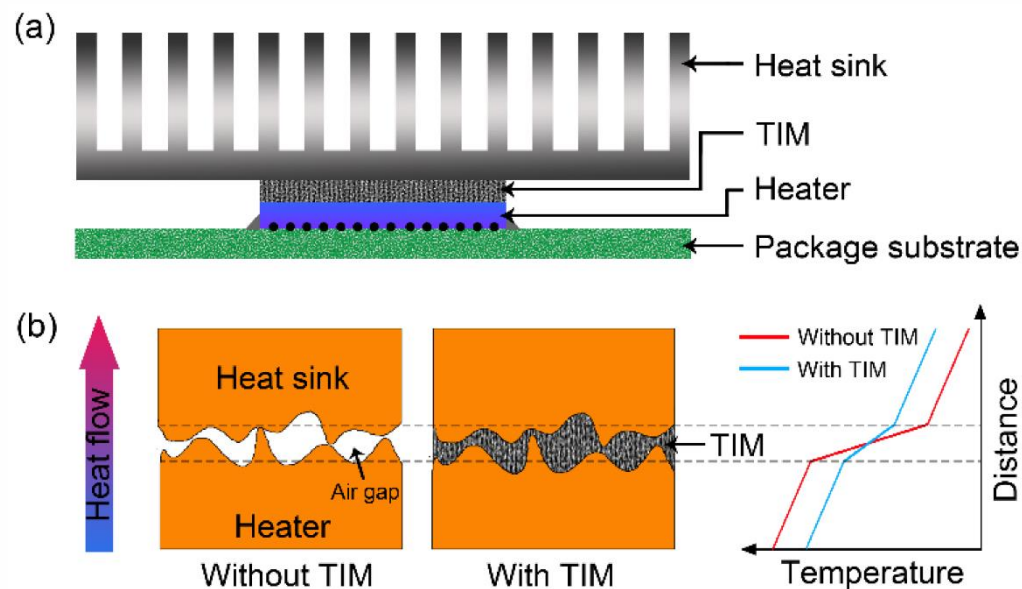
$\eta = S_{ef}/S$ je tzv. účinnost tělesa chladiče



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 pouzdrem 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.



11.6 Parametry materiálů pro VF aplikace

Vlastnosti materiálů při jejich aplikaci ve vysokofrekvenčních systémech mohou mít **odlišné vlastnosti** oproti nízkofrekvenčním systémům.

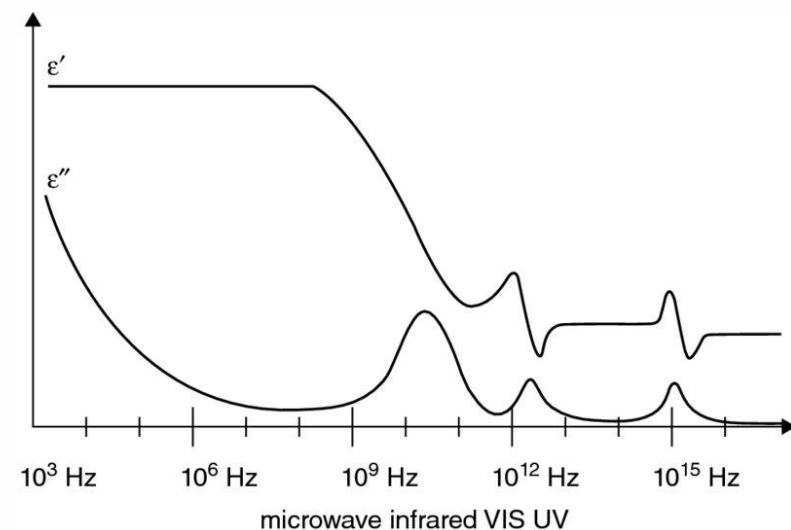
11.6.1 Dielektrické materiály

Dielektrikum se v **proměnném elektrickém poli** chová **odlišně** než v poli stacionárním. V proměnném elektrickém poli je nutné uvažovat **komplexní relativní permitivitu** dielektrických materiálů, která se **s frekvencí zásadně mění**. Relativní permitivita je tak složena z reálné a imaginární části.

Reálná složka komplexní permitivity ϵ' je vlastní **dielektrická konstanta**. **Imaginární složka** ϵ'' **určuje míru ztrát** vzniklých v dielektriku namáhaném střídavým elektrickým polem.

$$\epsilon_r(f) = \epsilon'_r(f) - j\epsilon''_r(f)$$

$$\operatorname{tg} \delta(f) = \frac{\epsilon''_r(f)}{\epsilon'_r(f)}$$



Rozměry mikrovlnných součástek jsou odvozené od vlnové délky přenášených signálů.

Relativní permitivita ovlivní rozměry mikrovlnných systémů, jelikož dochází ke změně vlnové délky signálů. Dále bude docházet ke **zpoždění přenášených signálů**, jelikož doba přenosu signálu v dielektrickém materiálu je opět závislá na relativní permitivitě. Průchodem signálu dielektrickým materiálem **dochází k útlumu signálu a ke zpoždění signálu**.

λ_d – vlnová délka signálu v dielektriku

λ_0 – vlnová délka signálu ve vzduchu

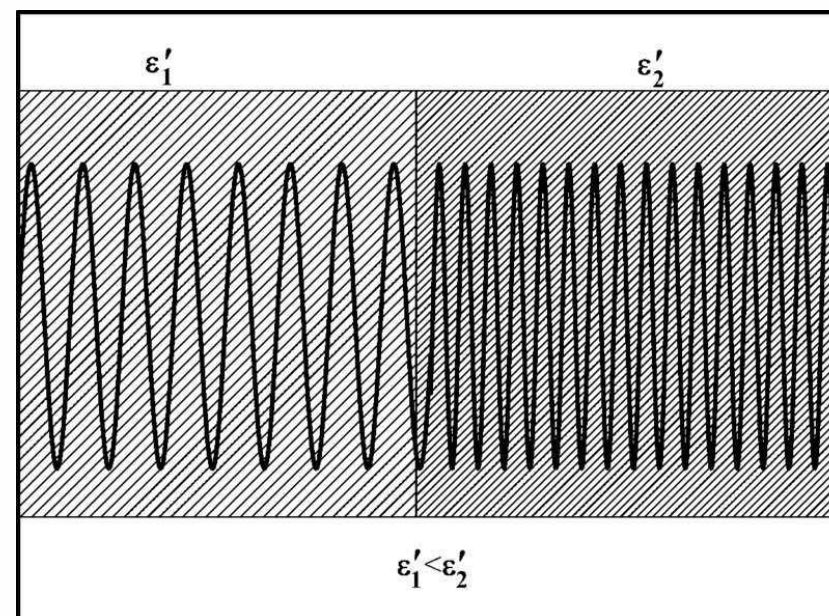
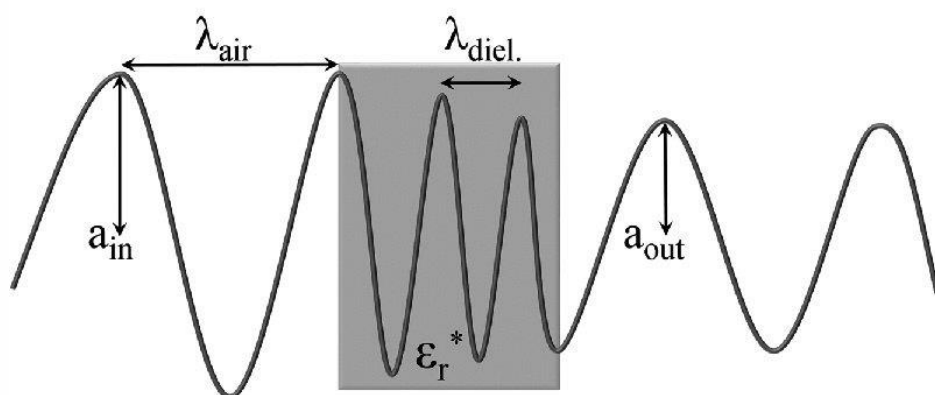
ϵ_r – relativní permitivita

t_d – zpoždění signálu

c – rychlost světla

l – délka přenosové cesty

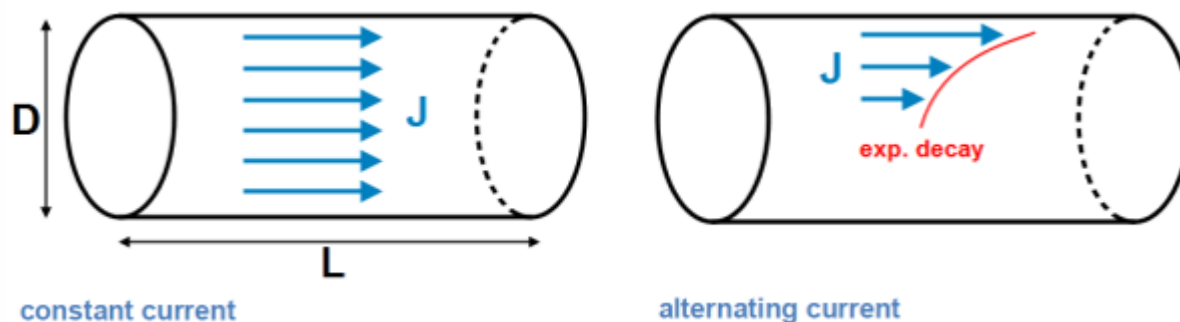
$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad t_d = \frac{l\sqrt{\epsilon_r}}{c}$$



11.6.2 Vodivé materiály

U **vodivých materiálů** (vodičů) se uplatňuje **povrchový jev - skin efekt**. Při **vysoké frekvenci** procházejícího střídavého elektrického proudu dochází k **vytlačení elektrického proudu na povrch vodiče**. K povrchovému jevu nedochází při průchodu stejnosměrného proudu vodičem a při frekvenci 50 Hz používané v síťových rozvodech je obvykle zanedbatelný. Nabývá na významu ve vysokofrekvenční technice.

Aby byl efekt minimalizován, používají se **vlnovody** - technicky jde o trubku, u které je třeba **maximalizovat povrch**, jenž se často dále upravuje pokovením (stříbro). Dochází tak k **minimalizaci ztrát** způsobených vedením proudu pouze v povrchové vrstvě materiálu. Stejný technický princip využívá **koaxiální kabel**.



Skin efekt je tím větší, čím je větší:

- **frekvence proudu**
- **průřez vodiče**
- **vodivost materiálu vodiče**
- **relativní permeabilita materiálu vodiče**

Střídavá **proudová hustota** J ve vodiči **exponenciálně klesá** od hodnoty J_s na povrchu vodiče až k nulové hodnotě v hloubce δ . **Koeficient** δ se nazývá **hloubka vniku**. Hloubka vniku je tedy definována jako hloubka pod povrchem vodiče, kde proudová hustota klesne na $1/e$ (asi 0,37) J_s . Hloubku vniku lze určit ze vztahu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

ρ - rezistivita (měrný odpor)

ω - úhlová rychlost proudu = $2\pi \times$ frekvence

μ - absolutní magnetická permeabilita vodiče

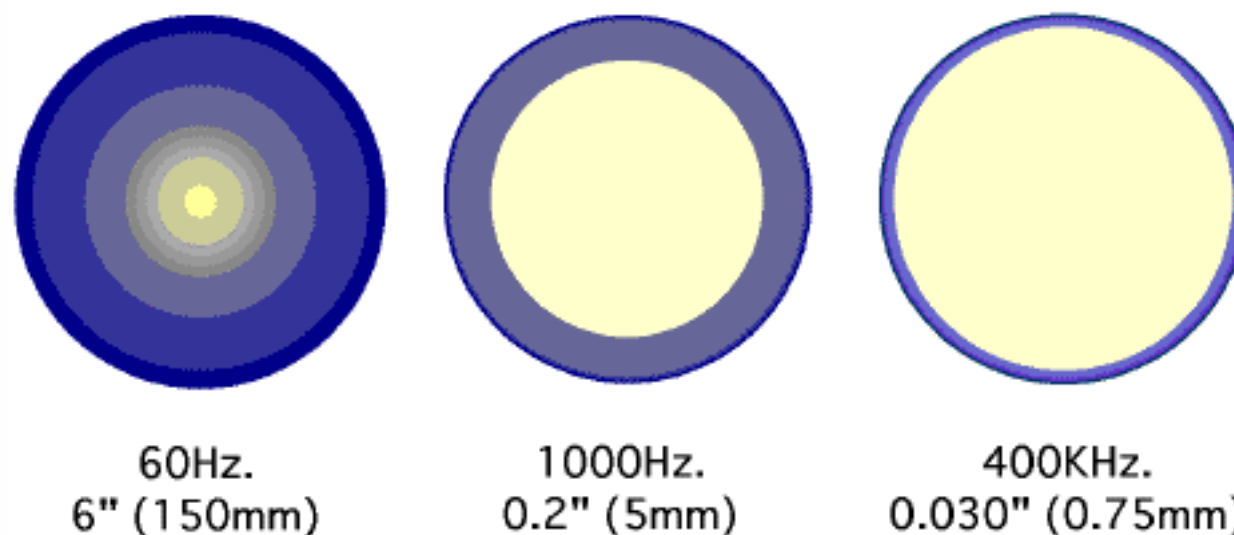


Efektivní odpor vodiče při skin efektu (když je výrazně tlustší než δ) odpovídá tomu, jako by proud procházel pouze vrstvou s tloušťkou δ . Můžeme tedy zhruba uvažovat průřez δ krát průměr vodiče.

Válcový vodič s průměrem D velkým ve srovnání s δ má odpor přibližně rovný válcové trubce s tloušťkou stěny δ . Při měrném odporu vodiče ρ platí pro odpor při průchodu střídavého proudu vodičem délky l :

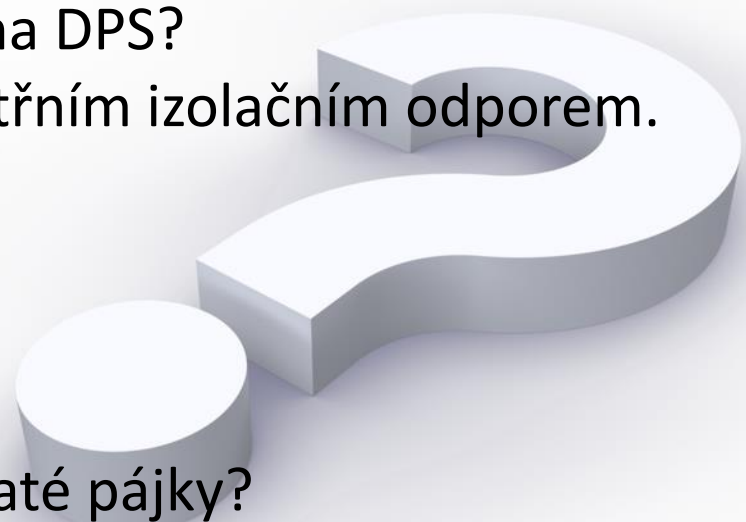
$$R = \frac{l\rho}{\pi(D - \delta)\delta} = \frac{l\rho}{\pi D\delta}$$

Vliv skin efektu



Kontrolní otázky

- Jaká je obecná konstrukce desek plošných spojů?
- Jaké materiály se používají pro desky plošných spojů?
- Vysvětlete, jaké parametry jsou důležité u materiálů pro desky plošných spojů.
- Jaké základní vlastnosti mají materiály na bázi epoxidových pryskyřic?
- Jaké základní vlastnosti mají materiály na bázi fenolických pryskyřic?
- Jaké základní vlastnosti mají DPS na bázi polyimidů/polyamidů?
- Jaké základní vlastnosti mají DPS na bázi keramických materiálů?
- Jaké se používají tloušťky měděné fólie na DPS?
- Vysvětlete rozdíl mezi povrchovým a vnitřním izolačním odporem.
- Vysvětlete, co je ztrátový činitel.
- Co je teplota skelného přechodu?
- Popište, jak se rozdělují pájky.
- Jaké parametry se sledují u pájek?
- Jaké vlastnosti mají olovnaté a bezolovnaté pájky?
- Vysvětlete, co jsou intermetalické sloučeniny.



Kontrolní otázky

- K čemu se používá tavidlo?
- Vysvětlete, co je smáčivost pájky.
- Vysvětlete, co je eutektikum.
- Co je planární světlovod a jaké materiály se používají pro jejich konstrukci?
- Co je vláknový světlovod a jaké materiály se používají pro jejich konstrukci?
- Jakým způsobem se šíří světelný paprsek ve světlovodu?
- Co ovlivňuje útlum světelného paprsku ve světlovodu?
- Popište postup při návrhu chladiče pro výkonové součástky.
- Co je tepelný odpor a tepelná kapacita?
- Jak zlepšíte tepelný kontakt?
- Vysvětlete, jak se mění relativní permitivita dielektrik v závislosti na frekvenci?
- Jak se změní vlnová délka signálu při průchodu dielektrikem?
- Co je skin efekt a jakým způsobem ovlivní návrh vodičů ve vysokofrekvenčních aplikacích?

