

# VLASTNOSTI ELEKTROTECHNICKÝCH MATERIÁLŮ

Materiály dělíme podle vodivosti na **vodiče, polovodiče a izolanty**.

## VODIČE

Mezi **vodiče** patří všechny **kovy**, které jsou základním materiálem pro výrobu kabelů, kontaktů, vinutí strojů, apod. Zpravidla u nich požadujeme minimální elektrický odpor, maximální pevnost v tahu, tvrdost, odolnost proti otěru a korozi.

Příčinou jejich vodivosti jsou **volné elektrony**. Kovy mají v pevném skupenství polykrystalovou strukturu. Jádra atomů, které tvoří krystalovou mřížku, mají kladný náboj. Vazby mezi jádrem atomů a valenčními elektrony jsou velmi volné, elektrony se pohybují neuspořádaně ve všech směrech.

Připojí-li se kovový vodič ke zdroji napětí, stane se tento pohyb uspořádaný ve směru vektoru intenzity elektrického pole **E**. Nazýváme jej **elektrický proud I**. Jeho **plošnou hustotu** označíme **J = I / S**, kde S je průřez vodiče. Platí, že **J = γ E**, kde γ je **měrná vodivost** (konduktivita) materiálu. Jedná se o základní vyjádření Ohmova zákona (diferenciální tvar), které platí v každém místě vodiče. Po jeho sumarizaci (integraci) zavedením obvodových veličin proudu a napětí získáme vzorec **R = U / I**.

Platí: **γ = n e μ**, kde n je počet elektronů v jednotce objemu, e náboj elektronu ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C) a μ pohyblivost elektronu. Vidíme tedy, že vodivost každého kovu určuje především jeho vnitřní struktura. Jednotkou měrné vodivosti je siemens na metr [S / m].

V praxi častěji používáme její převrácenou hodnotu, která se nazývá **měrný odpor** (rezistivita) ρ (ró)[Ω m]. U kovů bývá  $10^{-8}$  až  $10^{-5}$  Ω m.

**Rezistivita** materiálu udává číselně odpor, který bychom naměřili mezi dvěma protilehlými hranami krychle o straně 1 m. U většiny kovů je tato hodnota v rozsahu  $10^{-2}$  až  $10^1$  μΩm, u odporových materiálů v rozsahu 0,2 až 2 μΩm (μΩm = Ω · mm<sup>2</sup>/m udává číselně odpor drátu délky 1 m o průřezu 1 mm<sup>2</sup>).

Krystalová mřížka kovů klade uspořádanému pohybu volných elektronů určitý odpor. Ten závisí na délce l, průřezu S a materiálu vodiče. **R = ρ l / S**

Odpor kovů se udává při teplotě 20°C a roste s teplotou přibližně lineárně (v rozsahu 0 – 100 °C).  $R_t = R_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha_R (t - 20))$ , kde **α<sub>R</sub>** je **teplotní součinitel odporu**. Naproti tomu odpor uhlíku, elektrolytů a polovodičů s rostoucí teplotou klesá.

Teplotní součinitel odporu udává, o jakou hodnotu se změní odpor 1 Ω vodiče, zvýší-li se jeho teplota o 1 K. U většiny kovů má hodnotu 0,004 K<sup>-1</sup>.

Vzrůst odporu kovů s rostoucí teplotou vysvětlujeme tepelným pohybem jader atomů, které tak brání volným elektronům v pohybu.

**Velikost odporu kovů závisí** dále na jejich **čistotě** a na **technologii** jejich **zpracování** (kalení, žíhání, kování). Nečistoty způsobují poruchy krystalové mřížky a tím zvyšují odpor.

Při hlubokém ochlazení některých kovů nebo slitin pod tzn. kritickou teplotu, která je v blízkosti absolutní nuly, klesne náhle odpor na velmi malou, téměř nulovou hodnotu. Tento jev nazýváme **supravodivost**.

**Supravodiče** mohou umožnit bezztrátový přenos energie. Energetické náklady na ochlazení vodiče na teplotu blízkou absolutní nule jsou ale velmi vysoké, což znemožňuje většinu praktických aplikací (např. přenos energie na velké vzdálenosti). Pomocí supravodivosti je možné zvýšit proud tekoucí vinutím velkých cívek a získat tak velmi silné magnetické pole.

**Kryovodivost** je zmenšení odporu čistých kovů při teplotách blízkých absolutní nule na hodnotu malé zbytkové rezistivity.

Dalšími charakteristickými vlastnostmi vodičů jsou **hustota** (hmotnost objemové jednotky, udává se při teplotě 20 °C), **teplota tání** (přechod z pevného do kapalného skupenství, udává se při tlaku  $10^5$  Pa), **součinitel tepelné vodivosti**  $\lambda_t$  (množství tepla, které projde krychlí o hraně 1 m z dané látky mezi dvěma protilehlými stěnami za 1 s při teplotním rozdílu 1 K.) **Kovy s dobrou elektrickou vodivostí mají i dobrou tepelnou vodivost.**

**Teplotní součinitel délkové roztažnosti** udává číselně, o kolik se změní délka 1 m tyče při zvětšení teploty o 1 K. Mez pevnosti v tahu udává maximální poměr síly v tahu ku průřezu vedení, udává se v Pascalech.

Rozdělení vodičů: materiály s vysokou vodivostí (stříbro, měď, hliník), materiály těžko tavitelné, materiály pro zvláštní účely.

### Nejčastěji používané vodiče

Základním elektrovodným materiálem je **měď** (Cu) – 0,017 241  $\mu\Omega$  m,  $\alpha = 0,003$  93  $K^{-1}$ .

Má vysokou elektrickou i tepelnou vodivost. Přidáním příměsí se měrný odpor zvyšuje. Na jejím povrchu vzniká červená vrstva kysličníků, která chrání povrch před korozi.

Má dobré mechanické vlastnosti, je tvárná za studena i za tepla. Podle mechanických vlastností se dělí na měkkou (ohebná, kabely, šňůry, vinutí), polotvrdou a tvrdou (např. vodiče velmi vysokého napětí).

Není odolná proti kyselinám. Dobře se pájí i svařuje.

**Cuprexit** je tenká měděná fólie lepená na laminát (papír, sklotextil) pomocí epoxidové pryskyřice. Plošné spoje se leptají roztokem chloridu železitého ( $FeCl_3$ ).

**Bronz** je slitina mědi a cínu (Sn), hliníku (Al), křemíku (Si) nebo berylia (Be).

Cínový bronz je slitina mědi a 20 % cínu. Přidání fosforu (0,3%) zvýší jeho tvrdost a odolnost proti korozi. Dobře se pájí, používá se na kontakty.

Hliníkový bronz (Cu + 10 % Al) je lehký tvrdý a odolný proti korozi.

Křemíkový bronz (Cu + 5 % Si) je pevný tvrdý a odolný proti korozi.

Beryliový bronz (Cu + 2,5 % Be) je pevný a pružný.

**Mosaz** je slitina mědi a 40% zinku (Zn), pružná, odolná proti korozi, používá se na elektroinstalační materiál. Jeho výhodou je velká tažnost, snadno se zpracovává lisováním.

Značí se Ms. Ms 63 (63 % Cu) se používá na objímky žárovek a je součástí vypínačů. Speciální mosazi (niklové, cínové) jsou odolné proti korozi. Některé typy mosazi (Ms 54) se používají jako tvrdá pájka (teplota tání 750 °C) pro pájení mědi, mosazi a oceli.

**Hliník** má 1,6 krát větší měrný odpor než měď. Proto při náhradě měděného vodiče hliníkovým musí být použit 1,6x větší průřez, což znamená 1,27x větší průměr. Jeho hmotnost oproti mědi je poloviční. Je levnější než Cu, ale má horší mechanické vlastnosti, hlavně nízkou mez tečení. Spoj dotažený šroubem má snahu se uvolnit a vzniká na něm přechodový odpor. Proto je třeba používat na silnoproudé hliníkové vodiče vhodné typy svorek (pružné kontakty).

Venkovní vedení se z mechanických důvodů vyrábějí s hliníkovým pláštěm a ocelovým jádrem.

Na vzduchu je stálý, protože se na jeho povrchu vytváří **ochranná vrstva kysličníku**.

**Eloxováním** se na jeho povrchu pomocí elektrického proudu a kyselin tato vrstva zesílí. Současně můžeme přidáním vhodných příměsí měnit jeho barvu. Takto se chemicky černí chladiče, jejich účinnost je proti světlým chladičům dvojnásobná. Oproti natírání nebo stříkání barva drží nesrovnatelně lépe.

Hliník se dá **svařovat v ochranné atmosféře** a při dodržení vhodného postupu i pájet.

Čistý hliník je velmi měkký. Vhodnými přísadami (hořčík (Mg), mangan (Mn), železo a měď se zvýší jeho mechanická pevnost.

Hliník může být měkký, polotvrdý nebo tvrdý. S rostoucí tvrdostí ale klesá ohebnost, při ohybu o 90° může prasknout.

Nejznámější konstrukční materiál na bázi hliníku je **dural**, který je pro svou přiměřenou tvrdost (tvrdý materiál se lépe obrábí, nešpiní se od něj obráběcí nástroje) a dobrou tepelnou vodivost ideálním materiálem pro výrobu skříněk elektrotechnických přístrojů a chladičů. Oproti oceli je výrazně lehčí a lépe se obrábí. Je vhodný pro tváření.

Slitiny hliníku vhodné pro slévání (silumin) mají horší mechanické vlastnosti. Používají se na výrobu skříní elektrických strojů.

Hliník má relativní permeabilitu přibližně rovnou jedné. Hliníková skřín slouží proto (na rozdíl od železa) pouze jako elektrické (nikoliv magnetické) stínění.

**Stříbro** (Ag) je nejlepším vodičem elektrického proudu a tepla. Pro svou vysokou vodivost se používá k postříbření vysokofrekvenčních obvodů, např. postříbřený drát nebo dutiny rezonátorů (viz kapitola technika velmi vysokých kmitočtů). Ze slitin stříbra se vyrábějí kontakty a vodivé pájky.

**Zinek** (Zn) se používá k pozinkování železných součástí za účelem ochrany proti korozi, lze jej pájet. Kadmium (Cd) chrání železné součástky (např. šrouby) proti korozi, používá se v niklkadmiových akumulátorech. Je jedovaté.

**Cín** (Sn) je odolný proti korozi, není jedovatý. Dá se proto použít v potravinářském průmyslu (z pocínovaného plechu se vyrábějí konzervy). Pocínovaný plech má své uplatnění i v elektrotechnice jako materiál pro stínící kryty.

**Nikl** (Ni) se používá pro povrchovou ochranu železa nebo jako přísada do ocelí.

**Titan** (Ti) má dobré mechanické vlastnosti a je odolný proti korozi.

**Kobalt** (Co) má feromagnetické vlastnosti. Používá se v žáruvzdorných ocelových slitinách

**Chrom** (Cr) je odolný vůči většině chemikálií. Proto se používá jako povrchová ochrana ocelí (nanáší se galvanicky) nebo může být přísadou do ušlechtilých ocelí.

**Platina** (Pt) má vynikající odolnost proti atmosférickým i chemickým vlivům. Používá se na kontakty nebo přesné termočlánky.

**Paládium** (Pa) má podobné vlastnosti jako platina, je levnější. Používá se do kontaktních slitin a jako tvrdá pájka.

**Iridium** (Ir) je odolné proti kyselinám a má malou délkovou roztažnost.

**Zlato** (Au) je odolné proti korozi, dobře slévatelné, tvárné, dá se dobře zpracovávat tažením i válcováním. Používá se na kontakty, a tenké propojovací vodiče uvnitř integrovaných obvodů.

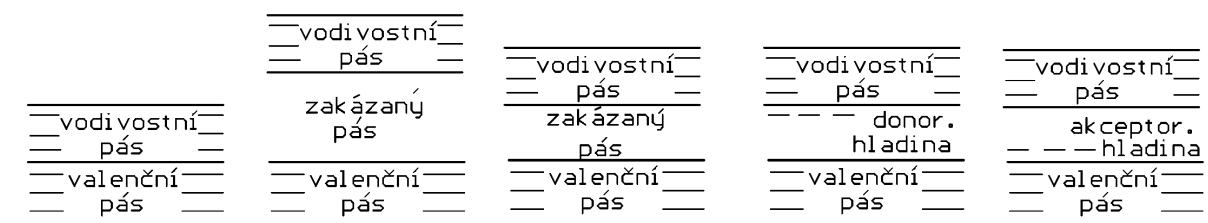
**Železo** (Fe) má podstatně vyšší měrný odpor ( $0,098 \mu\Omega \text{ m}$ ), a nižší teplotní vodivost než měď nebo hliník. Nelze jej ve většině případů používat jako chladič nebo vodič. Přidáním vhodných příměsí získáme levný konstrukční materiál s dobrými mechanickými vlastnostmi – tvrdost, pevnost, pružnost, který ale musí být chráněn proti korozi.

## Pásový model

Elektrické vlastnosti materiálů (hlavně polovodičů) popisujeme často pomocí pásového modelu. Energetické pásy znázorňují dovolené energetické stavy elektronů v látce. Podle Pauliho vylučovacího principu mohou být v jedné energetické hladině pouze dva elektrony. Dovolené pásy jsou od sebe odděleny zakázanými pásy, ve kterých se elektrony nemohou vyskytovat. Hladiny valenčních elektronů tvoří valenční pás.

Vodivostní pás představuje oblast dovolených energií volných elektronů, které vyvolávají elektrický proud.

U vodičů je malá nebo téměř nulová šířka zakázaného pásu. Proto se v nich vyskytují **volné elektrony**. U **izolantů** je **šířka zakázaného pásu** natolik **velká** (větší než 3 eV), že je pro elektrony prakticky nepřekročitelná. U polovodičů je možné při dostatečné energii tento pás překonat. (1 eV – elektronvolt =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J je práce potřebná k přemístění jednoho elektronu mezi místy s rozdílem potenciálů 1 V.)



a/ Pásový model vodiče b/ izolantu c/ čistého polovodiče d/ polovodiče N e/ polovodiče P

## POLOVODIČE

mají oproti vodičům silnější vazbu mezi jádrem a elektrony. Ke vzniku volných elektronů (odtržení valenčních elektronů od jádra atomu) potřebujeme dodat určité množství energie (ionizační energie). Vodivost polovodičů na rozdíl od vodičů roste s teplotou, elektrony mají větší energii a snadněji překonávají zakázaný pás. (Zmenšení pohyblivosti elektronů při nárazech na teplem kmitající atomy, které s teplem zvyšuje odpor vodičů, se zde tolik neuplatní.) Měrný odpor polovodičů se pohybuje v rozmezí  $10^{-6}$  až  $10^8 \Omega\text{m}$

Polovodiče jsou materiály ze 4. skupiny Mendělejevovy tabulky. Nejznámější jsou **germanium** (Ge) a **křemík** (Si). Každý atom má 4 vazby, pomocí kterých se váže na sousední atomy. V **čistém polovodiči** nejsou volné elektrony, proto vodi špatně elektrický proud. Při teplotě blízké absolutní nule se polovodič chová jako izolant, protože energie elektronů je velmi malá a nestačí na překonání zakázaného pásu. V rozsahu **běžných provozních teplot se polovodič rovněž chová jako izolant**. Teprve po dosažení tzn. **kritické teploty** má většina elektronů dostatečnou energii ke překonání zakázaného pásu. Polovodič se pak stává **vodivým**.

Mezi polovodiče patří také **selen** (Se), ze kterého se dříve vyráběly usměrňovače, nyní se používá pro výrobu fotocitlivých prvků.

Jako čtyřmocné polovodiče se chovají i sloučeniny trojmocného a pětímocného prvku, které mají některé zajímavé vlastnosti, vyplývající z větší šířky zakázaného pásu. Nejznámější z nich je **galiumarsenid** (GaAs). Je-i v něm více trojmocného galia, vznikne polovodič P, při převaze pětímocného arsenu zase polovodič N. Používá se pro výrobu LED diod, vysokofrekvenčních tranzistorů a diod.

Dále se používá **arsenid india** (InAs) pro výrobu laserů, Hallových sond, detektorů infrazáření a fotoelektrických článků, **antimonit india** (InSb), který má velkou pohyblivost elektronů –Hallova sonda) a **fosfit** (GaP, InP).

**Kritická teplota je tím větší, čím větší je šířka zakázaného pásu**. U germania je šířka zakázaného pásu 0,78 eV a kritická teplota 90 °C, u **křemíku** je šířka zakázaného pásu 1,11 eV a kritická teplota je **155 °C**. U galiumarsenidu (GaAs), který se chová podobně jako čtyřmocné polovodiče je šířka zakázaného pásu 1,36 eV a kritická teplota 250 °C.

Kritická teplota omezuje použití polovodičových součástek, při jejím dosažení se součástka ničí. Křemík má proto lepší vlastnosti než germanium, má větší rozsah pracovních teplot, požadavky na chlazení jsou menší.

U vlastní vodivosti je stejná koncentrace děr i elektronů.

S šířkou zakázaného pásu souvisí i velikost zbytkových proudů, která je u křemíku zhruba o tři řády nižší než u germania.

### **Vytváření přechodů PN – výroba tranzistorů a integrovaných obvodů**

Žiháním při teplotě 1000 °C (oxidace ve vodní páře nebo suchém kyslíku) na povrchu destiček vytvoříme **vrstvu kysličníku křemičitého** (skla). Tato vrstva je výborným izolantem, difunduje v ní probíhá o několik řádů pomaleji než v čistém křemíku. Vrstva skla se rovněž používá pro pasivaci povrchu. Její tloušťka je 0,2 – 1 mikrometr.

Foto litografie umožňuje rozlišit místa, kde se má difúze provést od míst, kde se provést nemá. Na povrch desky (na skleněnou vrstvu) se rovnoměrně (pomocí odstředivky) nanese fotorezist. Jedná se o látku, která se vytvrzuje ultrafialovým zářením. Deska se ozařuje přes masku. Z neozářených míst se potom fotorezist smyje organickými rozpouštědly. Tato technologie se trochu podobá výrobě plošných spojů, rozměry jsou ale mnohem menší (jednotky  $\mu\text{m}$ ) a s tím narůstají požadavky na kvalitu práce a čistotu prostředí. Kyselinou fluorovodíkovou se na těchto místech ochranná vrstva  $\text{SiO}_2$  odleptá.

**Výroba masky**: Po návrhu maskovacího obrazce se vytvoří tisíckrát **zvětšená předloha**, která se nejprve zmenší asi 30krát. Při dalším zmenšení se pomocí kamery s postupným snímáním provede její **optické vynásobení**. Na jedné křemíkové desce se totiž současně vyrábí větší počet stejných obvodů.

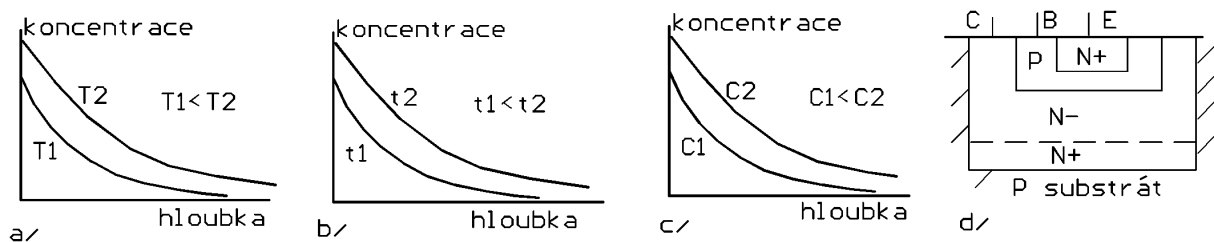
Vznikne tak **originální matrice**, která se velmi pečlivě kontroluje. Dále se z ní kopírují na skleněné desky (malá teplotní roztažnost) **pracovní matrice**. Ty se při výrobě přikládají na desky monokrystalu. Tím dochází k jejich mechanickému **opotřebení** a je proto nutné je vyměňovat.

Vlnová délka použitého UV záření musí být menší než nejmenší rozměry (tloušťky čar) na matici. Jinak by nastávaly interferenční jevy, které by zhoršovaly reprodukovatelnost výroby. S rostoucí složitostí integrovaných obvodů (např. mikroprocesory) rostou požadavky na zmenšování rozměrů jednotlivých prvků, zmenšuje se tloušťka čar v masce. Přechází se proto na stále kratší vlnové délky (rentgenové záření).

Destička se vloží do pece, kde je po určitou dobu vystavena působení par obsahující prvky 5. skupiny (nejčastěji fosfor a arzén) za teploty zhruba 1000 °C. Proběhne tzn. kolektorová **difúze**

Obdobným způsobem se vytvoří vrstva báze, kdy se vytváří polovodič P (příměs prvku 3. skupiny – bóru. Nakonec proběhne emitorová difúze, kdy vznikne bohatě dotovaná oblast N pro emitor.

Při difúzi potřebujeme zajistit správnou tloušťku dotované vrstvy a správnou koncentraci příměsí. Za tím účelem můžeme měnit teplotu (s rostoucí teplotou probíhá difúze rychleji), dobu difúze (má vliv na hloubku difúze) a koncentraci příměsí v párách.



*Závislost koncentrace příměsí na vzdálenosti od povrchu  
b/ v závislosti na čase c/ při různých koncentracích par*

*a/ při různých teplotách  
d/ tranzistor jako součást i. obvodu*

Dalším způsobem vytváření PN přechodů je **epitaxní růst**. Z par vzniká **krystalizací** (podobně jako v zimě jinovatka) vrstva křemíku, která je opačně dotovaná než podklad. Používají se páry chloridu křemičitého ( $\text{SiCl}_4$ ), který má teplotu tání  $-70\text{ °C}$  a teplotu varu  $+57\text{ °C}$ .

Tam, kde difúze má svá fyzikální omezení, používáme **iontovou implantaci**. Polovodič bombardujeme urychlenými ionty příměsí, které urychluje elektrostatické pole a zaměřuje zaostřovací systém. Iontová implantace se provádí za mnohem nižší teploty než difúze. Jejím použitím můžeme dosáhnout oproti difúzi **větších koncentrací příměsí ve velmi tenkých vrstvách** a vytvořit tak velmi **strmé přechody PN**.

## Rezistory

Používáme rezistory pro všeobecné použití, vysokoohmové, vysokonapěťové, přesné. Dělíme je také na pevné a proměnné.

**Jmenovitá hodnota** rezistoru se označuje buď barevným kódem, kombinací čísel a písmen (např. 4k7 = 4,7 k $\Omega$ ) nebo číselným označením (např. 124 = 12 · 10<sup>4</sup> = 120 k $\Omega$  = M12). Jmenovité hodnoty jejich odporu odpovídají číslům z geometrických řad E12, E24, případně i E48, E96 a E192. Číslo za písmenem E udává počet hodnot v dekádě. Pro příklad si uvedeme řadu E24, tučně vtištěné hodnoty tvoří řadu E12.

**1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1; 10.....**

Většina rezistorů se vyrábí v rozsahu hodnot od 1  $\Omega$  do 10 M $\Omega$ .

Dále se udává **tolerance**. Nyní se většina rezistorů vyrábí v toleranci 1 %, dá se ale dosáhnout přesnosti výroby mnohem větší (výběr součástek, přesné nastavení hodnoty pomocí laserového paprsku).

Dalším parametrem je **zatížení – ztrátový výkon**, který rezistor trvale snese. Ten ale závisí na teplotě prostředí. Při provozní teplotě v zařízení nad 60 °C musíme ztrátový výkon na rezistoru omezit. Pracovní teplota většiny rezistorů při jmenovitém zatížení je okolo 150 °C. Rezistory jsou odolnější proti přehřátí než polovodiče. Přesto ale platí zásada, že trvale vysoká provozní teplota zkracuje životnost součástky. Ke zlepšení chlazení rezistorů pro výkonovou ztrátu do 1 až 2 W lze využít i vhodně navržený plošný spoj (odvod tepla přes vývody do velkého obrazce plošného spoje). Ztrátovým teplem z větších (výkonově) rezistorů nemají být zbytečně namáhány další součástky (elektrolytické kondenzátory, polovodiče, plošný spoj). Rezistory se vyrábějí nejčastěji ve výkonových řadách 0,25 W, 0,6 W, 2 W, 5 W, 20 W. SMD rezistory v pouzdru 1206 mají výkonovou ztrátu 0,1 W.

**Teplotní součinitel odporu** udává závislost odporu na teplotě. Odpor uhlíkových rezistorů se zmenšuje se vzrůstající teplotou. Malá teplotní závislost je u metalizovaných rezistorů, jejich teplotní součinitel je typicky  $\pm 50$  ppm. To znamená změnu  $50 \cdot 10^{-6}$  z jejich hodnoty při změně teploty o 1 °C. U m

**Napěťový součinitel odporů** vyjadřuje poměrnou změnu odporu rezistoru při změně napětí o 1 V (u lakovaných rezistorů je to  $-1 \cdot 10^{-4} \text{ V}^{-1}$ )

Maximální provozní napětí je u SMD rezistorů 150 V, u ostatních typů 350 až 500 V.

Každý rezistor vytváří **šum** – malý rušivý výkon v celém pásmu elektronů. Jeho příčinou je tepelný pohyb elektronů a jeho velikost závisí na přiloženém vnějším napětí a jmenovité hodnotě odporu. Pro hodnoty nad 100 k $\Omega$  velikost šumu vzrůstá. Dalším parametrem je **stabilita** – změna odporu rezistoru v závislosti na čase.