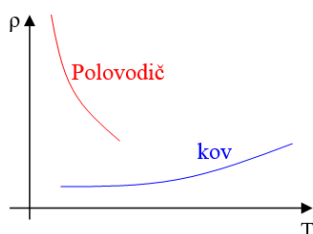


17. Elektrický proud v polovodičích, užití polovodičových součástek

Polovodiče se od kovů liší především tím, že mají větší rezistivitu ($10^{-2}\Omega\cdot m$ až $10^9\Omega\cdot m$), (kovy $10^{-8}\Omega\cdot m$ až $10^{-6}\Omega\cdot m$). Tato rezistivita u polovodičů s rostoucí teplotou rychle klesá, zatímco u kovů roste:

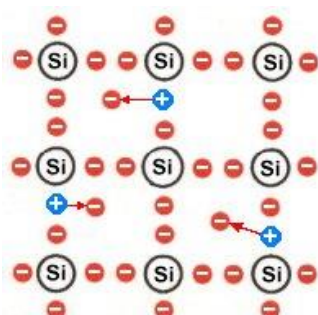


Mezi polovodiče patří např. prvky Si, Ge, C(grafit), Se, Te, sloučeniny PbS, CdS, ... i některé organické sloučeniny, např. hemoglobin a chlorofyl.

Největší praktické uplatnění má Si a Ge.

Nosiči elektrického náboje v polovodičích jsou záporné **elektrony** a kladné **díry** (prázdná místa po uvolněných valenčních elektronech).

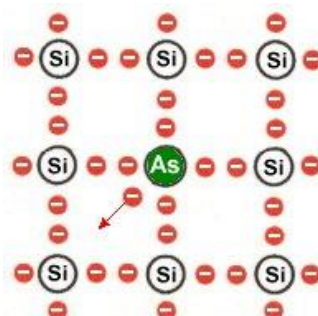
Vodivost polovodičů:



1. vlastní

Například křemík je čtyřmocný (má 4 valenční elektrony) a jeho atomy jsou uspořádány v krystalové mřížce. Při nízkých teplotách jsou valenční elektrony silně poutány v mřížce, křemík proud nevede. Při zahřátí se ionty v krystalové mřížce rozkmitají a dochází k uvolňování valenčních elektronů. Opustí-li elektron své místo v mřížce (na obr. šipky), objeví se místo, kde chybí záporný náboj. Toto prázdné místo se nazývá "**díra**" a chybějící záporný náboj se navenek projeví jako náboj kladný (na obr. vyznačen modře). Do "díry" může přeskočit jiný elektron z krystalové

mřížky a doplnit chybějící záporný náboj. Dojde k **rekombinaci**. Kladná "díra" se však objeví na místě, odkud elektron přeskočil, vypadá to tedy, jako by se "díry" stěhovaly v krystalové mřížce z místa na místo. *Při vlastní vodivosti se elektrony a díry podílejí na vodivosti stejně.*



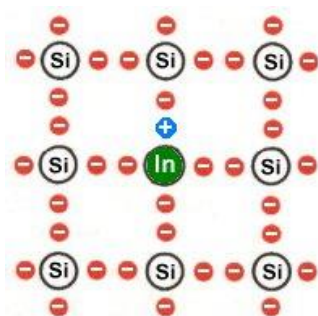
2. příměsová

a) Vodivost typu N (negativní):

V krystalu křemíku jsou některé atomy nahrazeny pětímocnými atomy, např. arzenu. Jejich čtyři valenční elektrony se účastní vazeb, ale páté se již v chemických vazbách nemohou uplatnit. Jsou velmi slabě vázané a již při nízkých teplotách se stanou volnými elektrony, ale díry po nich nevzniknou.

*V křemíku s příměsí pětímocného prvku (říká se mu **donor**) je počet volných elektronů mnohem větší než počet volných děr*

*(vzniklých procesem vlastní vodivosti). Elektrony jsou majoritní, díry jsou minoritní. Převaha volných elektronů, způsobuje u tohoto typu polovodiče **elektronovou vodivost** typu N.*



b) Vodivost typu P (pozitivní):

Zabudují-li se do krystalové mřížky atomy trojmocného prvku se třemi valenčními elektrony, např. india, chybí pro obsazení všech chemických vazeb elektrony. V místě nenasycené vazby vznikne "díra" s kladným nábojem. Tuto "díru" může zaplnit elektron z některé jiné vazby a "díra" se v krystalu přesune na jeho místo, aniž by současně vznikl volný elektron.

*Příměs trojmocného prvku (říká se mu **akceptor**) vytváří v krystalu křemíku nadbytek kladných "děr" nad volnými elektrony*

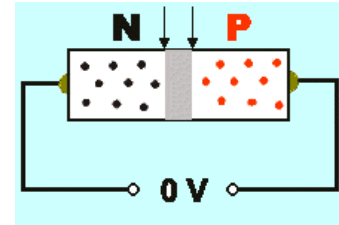
*(vzniklými jevem vlastní vodivosti). Volné díry jsou majoritní, volné elektrony jsou minoritní. Převaha volných děr způsobuje u tohoto typu polovodiče jeho **děrovou vodivost** typu P.*

Diodový jev a jeho užití (usměrňovač):

Největší využití v elektronice má **přechod PN**. Nazývá se tak oblast styku dvou polovodičů s opačným typem vodivosti. Přechod PN má tu vlastnost, že v jednom směru jím proud může procházet, zatímco v opačném směru nikoli.

Součástka s jedním PN přechodem se nazývá **polovodičová dioda**.

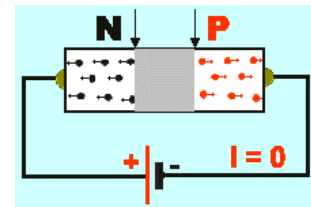
a) **PN přechod (dioda) bez zdroje napětí:** V oblasti styku obou polovodičů se část elektronů z oblasti **N** dostane (difunduje) do oblasti **P** a část "děr" z oblasti **P** přejde (difunduje) do oblasti **N**. Volné elektrony rekombinují s "děrami", takže kolem přechodu **PN** se vytvoří nevodivá oblast bez volných nábojů (na obrázku vyznačena šedou barvou), která má velký elektrický odpor, tzv. **hradlová vrstva**.



b) **Zapojení diody v závěrném směru**

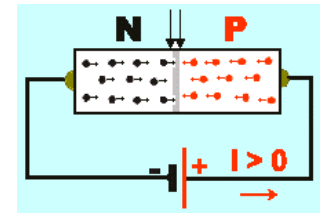
Připojíme-li k polovodiči **P** záporný pól a k polovodiči **N** kladný pól zdroje, vzdalují se působením elektrických sil volné náboje od přechodu **PN**, oblast bez volných nábojů se rozšíří, její odpor vzroste a elektrický proud přechodem **PN** nemůže procházet. Říkáme, že dioda je zapojena v **závěrném směru**.

Poznámka: Ve skutečnosti prochází diodou v závěrném směru nepatrný proud, tvořený minoritními elektricky nabitými částicemi.



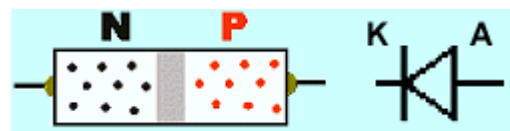
c) **Zapojení diody v propustném směru**

Změníme-li polaritu připojeného zdroje, přecházejí působením elektrických sil volné elektrony přes přechod **PN** ke kladnému pólu a "díry" jsou přitahovány k zápornému pólu. Výsledkem je zúžení hradlové vrstvy a zmenšení jejího odporu. Takto zapojeným přechodem **PN** proud prochází. Říkáme, že je dioda zapojená v **propustném směru**.

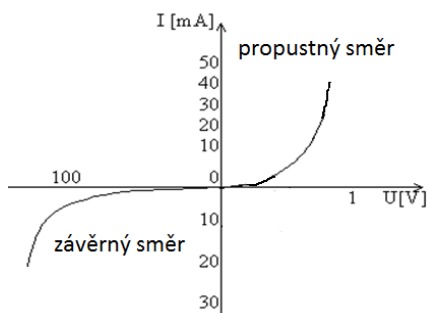


Popsaný jev, při kterém závisí odpor PN přechodu na polaritě připojeného zdroje, nazýváme **diodový jev**. Aby diodou protékal proud, musí být polovodič **P** připojen ke kladné elektrodě, nazývané **anoda**, polovodič **N** je připojen k záporné elektrodě, ke **katodě**.

Na obrázku je znázorněn vztah mezi strukturou diody (vlevo) a její schématickou značkou.



Voltampérová charakteristika polovodičové diody

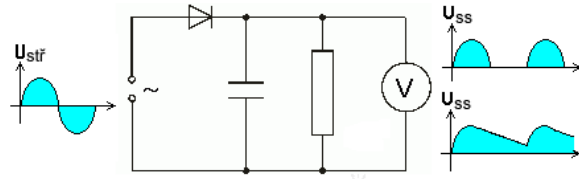


Dioda je polovodičová součástka, jejíž odpor závisí na polaritě a velikosti napětí, k němuž je připojena. Z grafu je zřejmé, že v **propustném směru** prochází diodou proud již při malém napětí (na obr. menším než 1 V). S rostoucím napětím odpor diody rychle klesá. Naproti tomu v **závěrném směru** dioda proud téměř nepropouští ani při „velkém“ napětí (na obr. menším než 100 V).

Dioda jako usměrňovač střídavého napětí

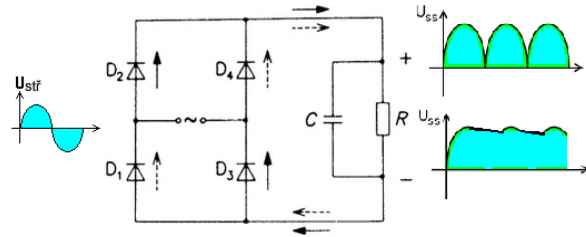
a) jednocestný

Na dalším obrázku je schéma jednoduchého diodového jednocestného usměrňovače. Ze vstupního střídavého napětí zdroje získáme po průchodu diodou pulzující stejnosměrné napětí (obr. vpravo nahoře). K potlačení pulzací slouží vyhlazovací kondenzátor, který se během půlperrody, v níž dioda propouští proud, nabíjí a ve druhé půlperiodě se vybíjí, čímž zmírňuje pulzace (obr. vpravo dole).



b) dvoucestný

Na obrázku je zakresleno Graetzovo zapojení čtyř diod, které umožňuje usměrňovat v každé půlperiodě. Vyhlazovací kondenzátor opět zmenšuje pulzace usměrněného napětí. V praxi se k vyhlazení používají složitější filtry složené z kondenzátorů, rezistorů, tlumivek, ...

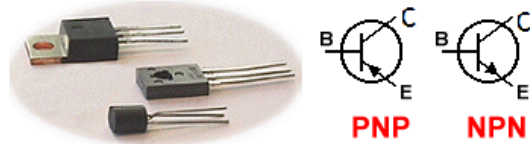


Tranzistor

Tranzistor je polovodičová součástka, která obsahuje dva PN přechody. Skládá se ze tří částí, která nazýváme elektrodami - emitorem **E**, bází **B** a kolektorem **C**.

Vyrábí se ve dvou modifikacích:

- **NPN** (emitor je polovodič typu **N**, báze je vrstvička polovodiče typu **P** a kolektor je opět polovodič typu **N**)
- **PNP** (emitor je polovodič typu **P**, báze je vrstvička polovodiče typu **N** a kolektor je opět polovodič typu **P**)



Poznámka: Rozdíl mezi tranzistorem typu NPN a typu PNP spočívá v podstatě jen v opačné polaritě při jejich napájení. Tranzistory jsou v obvodech zapojeny třemi možnými způsoby: "se společnou bází", "se společným kolektorem" nebo "se společným emitorem". Poslední zapojení je v elektronických přístrojích nejčastější.

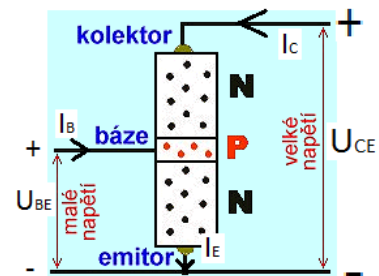
Zapojení tranzistoru typu NPN se společným emitorem

Bázový obvod je tvořen přechodem báze – emitor a je zapojen v propustném směru k „malému“ napětí U_{BE} . Obvodem prochází malý bázový proud I_B . Kolektorový obvod je tvořen oběma přechody PN mezi emitorem a kolektorem a je připojen k „velkému“ napětí U_{CE} , jak je patrné z obrázku.

Je zřejmé, že platí: $I_E = I_B + I_C$

Dále platí: $I_C \approx I_E$, protože proud I_B je mnohem menší než I_C a I_E .

Přesto zde má tenká báze podstatný význam, protože pokud by byl proud I_B nulový, netekl by žádný proud ani kolektorem ani emitorem, neboť PN přechod C-B zapojený v závěrném směru by proud nepropustil. Takže malé napětí U_{BE} vyvolá malý proud I_B , který vede k velkému poklesu odporu tranzistoru jako celku a z velkého zdroje napětí U_{CE} lze odebírat



velký proud I_C . **Malé změny bázevého proudu I_B vyvolají velké změny proudu kolektorového I_C .** V tom je podstata zesilování. Malé střídavé napětí například z mikrofonu, které chceme zesílit, připojíme do bázevého obvodu a mnohonásobně zesílené je odebíráme v kolektorovém obvodu.

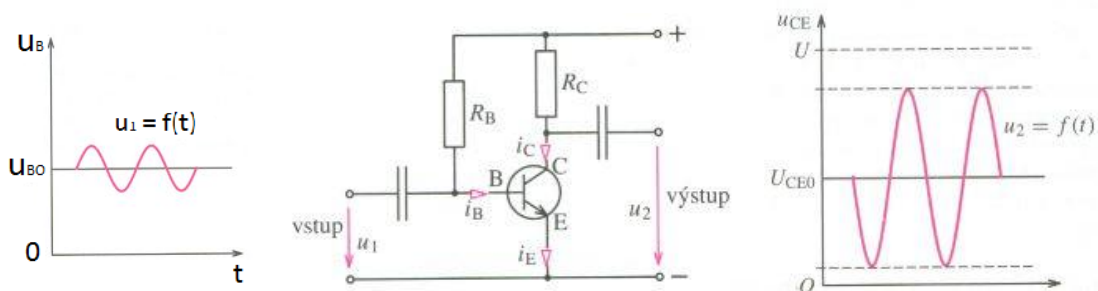
Důležitým parametrem tranzistoru je jeho **proudový zesilovací činitel**: $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

Hodnota zesilovacího činitele v podstatě udává zesílení tranzistoru a dosahuje podle typu a funkce v zapojení hodnot několika desítek nebo stovek.

Poznámka 1: Tranzistor je polovodičová součástka, jejíž odpor lze v uvedeném zapojení ovládat malým bázevým proudem, čehož využíváme k zesilování.

Poznámka 2: Při zesilování musí platit zákon zachování energie. Na zesilování je dobré pohlížet jako na děj, při kterém zdroj malé energie řídí odběr ze zdroje velké energie.

Schéma zapojení tranzistoru jako zesilovače střídavého napětí

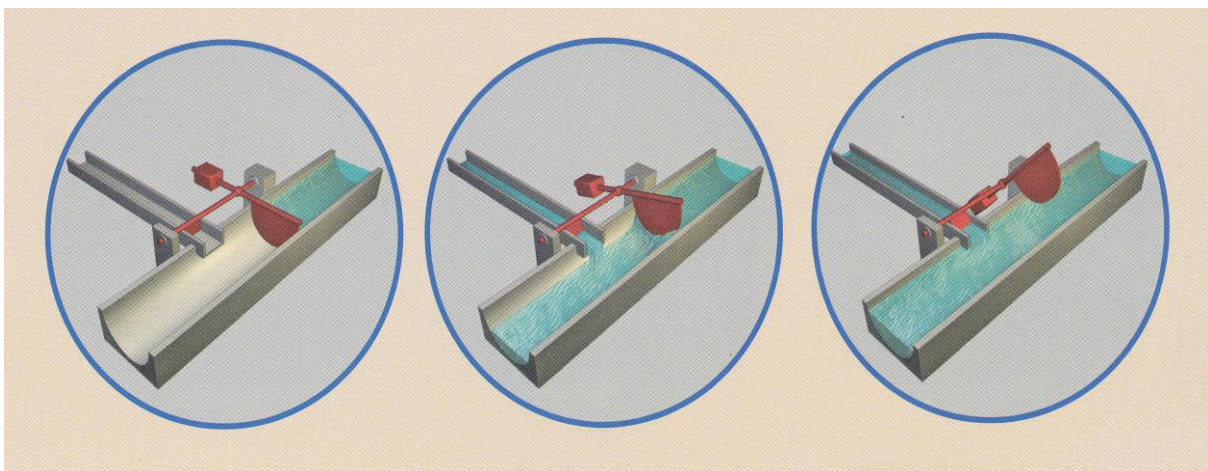


vstup: zesilované napětí u_1

výstup: zesílené napětí u_2 , výstupní napětí má opačnou fázi než vstupní napětí

Poznámka: Podrobné vysvětlení schématu se probírá v hodinách fyziky a je ponecháno na studentovi.

Pro lepší představu, jak lze malou změnou bázevého proudu vyvolat mnohem větší změnu kolektorového proudu může posloužit následující obrázek, který podobný jev demonstruje na proudu vody. Malé pootočení malého stavidla, způsobené malou změnou proudu, v levém korytě, vyvolá pootočení s ním spojeného velkého stavidla a tím velkou změnu proudu širokým korytem.



Polovodičové prvky a jejich funkce

V praxi se setkáváme s mnoha polovodičovými prvky. Uvedeme alespoň některé.

- **Termistor** – je polovodičová součástka (teplotně závislý odpor), která se používá jako teplotně citlivá součástka. Jeho odpor klesá s teplotou, přičemž změna odporu s teplotou je daleko rychlejší než u kovů.
- **Fotorezistor** - je polovodičová součástka, jejíž odpor závisí na osvětlení (snižuje se se zvyšující se intenzitou dopadajícího světla).
- **Světelná dioda** - když diodou prochází proud, dochází na PN přechodu k rekombinaci elektronů a děr. Přitom se uvolňuje energie, která se může vyzářit ve formě fotonu o příslušné vlnové délce. Svítivou diodu je nutno vždy zapojovat do série s rezistorem (ochranný rezistor), který omezuje maximální proud procházející diodou.
- **Fotodioda** - polovodičová dioda, která se po osvětlení stává zdrojem elektrického napětí, aniž je připojena k jinému zdroji. Velikost napětí je asi 0,5 V na jeden článek (jednu fotodiodu). Fotodioda v tomto zapojení se často nazývá *sluneční (solární) článek*, případně *fotočlánek*. Fotodioda se může zapojit jako odporová, a pak se používá stejně a ve stejném zapojení jako fotorezistor.
- **Integrovaný obvod** – tvořen diodami a tranzistory, ale také tzv. pasivními prvky (rezistory, kondenzátory, vodivé spoje,...) – provádí logické operace, pro něž byl vyroben. Nelze jej naprogramovat.
- **Mikroprocesor** – velmi složitý integrovaný obvod, který na jediné malé destičce křemíku soustřeďuje tisíce tranzistorů, diod, rezistorů. Jeho funkce lze naprogramovat.