

5 ELEKTRONIKA

Ciele

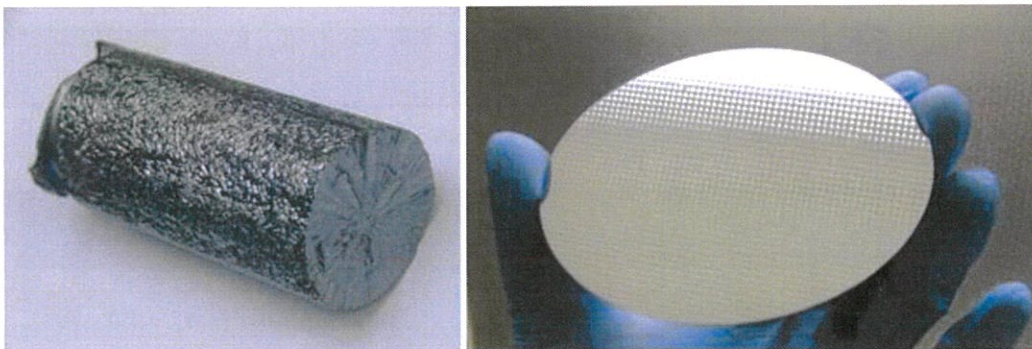
Po preštudovaní kapitoly by mal byť študent schopný:

1. Charakterizovať polovodiče z hľadiska ich použitia v elektronike
2. Vysvetliť rozdiel medzi vlastnou a nevlastnou vodivosťou polovodičov
3. Definovať polovodiče typu P a typu N
4. Popísať funkciu PN priechodu bez pripojeného napätia a po pripojení na napätie
5. Vysvetliť princíp činnosti diódy, nakresliť jej V-A charakteristiku a popísať jej základné parametre
6. Klasifikovať tranzistory z hľadiska ich princípu činnosti
7. Vysvetliť princíp činnosti bipolárnych a unipolárnych tranzistorov a popísať ich základné charakteristiky a parametre
8. Charakterizovať tyristor a triak, vysvetliť ich princíp činnosti a nakresliť ich symboly a charakteristiky

5.1 Stručný úvod do fyziky polovodičov

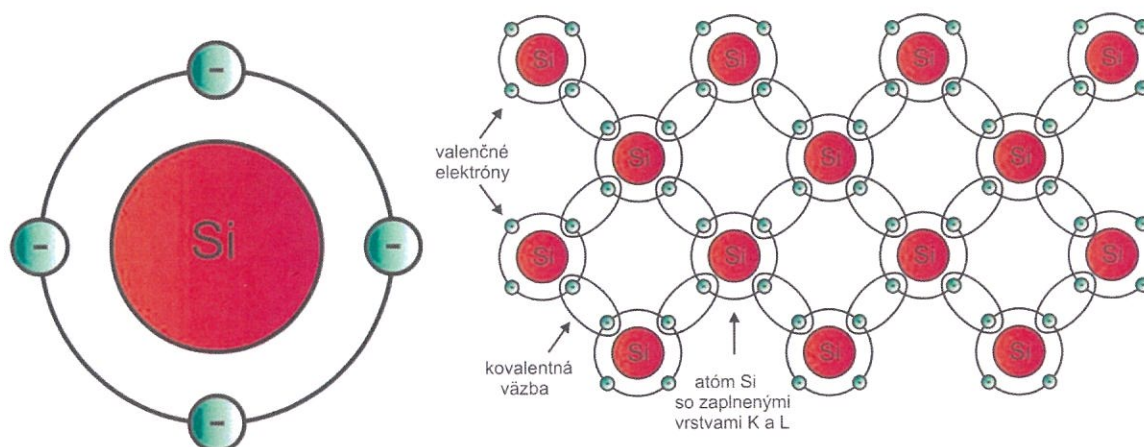
Základom *elektronických súčiastok*, ktoré sa využívajú v elektronických prístrojoch a zariadeniach sú **polovodiče**. Polovodiče sú materiály, ktorých *elektrická vodivosť* sa nachádza na rozhraní medzi izolantmi a vodičmi. K týmto materiálom patria predovšetkým *kremík*, *germánium*, *selén* a rôzne typy zlúčenín *gália* a *india* (napr. gárium-arzenid, gárium-fosfid, indium-fosfid, indium-antimonid a ďalšie). V súčasnosti majú najväčší význam kremík a germánium a uvedené zlúčeniny (nazývajú sa tiež intermetalické).

Kremík je z hľadiska hmotnostného zastúpenia ôsmy najbežnejšie sa vyskytujúci prvok vo vesmíre, avšak v čistej forme sa vyskytuje len veľmi zriedkavo. Väčšina kremíku sa vyskytuje v podobe oxidu kremičitého, ktorý môžeme nájsť napr. v piesku, kmeni a acháte. Z oxidu kremičitého je potom možné pomocou rôznych chemických metód získať čistý kremík v pevnej forme. V elektronike sa vyžaduje výrazne vyššia čistota kremíka ako v oblasti metalurgie – tradičným postupom (tzv. Siemensovým procesom) sa získava kremík s 99,9999999% až 99,999999999% čistotou (čo znamená, že na 10^9 až 10^{11} atómov kremíka pripadá jeden atóm nečistoty – Obr. 5.2 vľavo). V procese výroby elektronických súčiastok má kremík formu valcových tyčí s priemerom až 300 mm z ktorých sa režu veľmi tenké pláty s hrúbkou približne 0,75 mm (Obr. 5.1 vpravo).



Obr. 5.1 Tyč z kremíka s veľmi vysokou čistotou vyrobená Siemensovým procesom (vľavo) [16] a tenký plát rezaný z kremíkovej tyče používaný pri výrobe elektronických súčiastok (vpravo) [27]

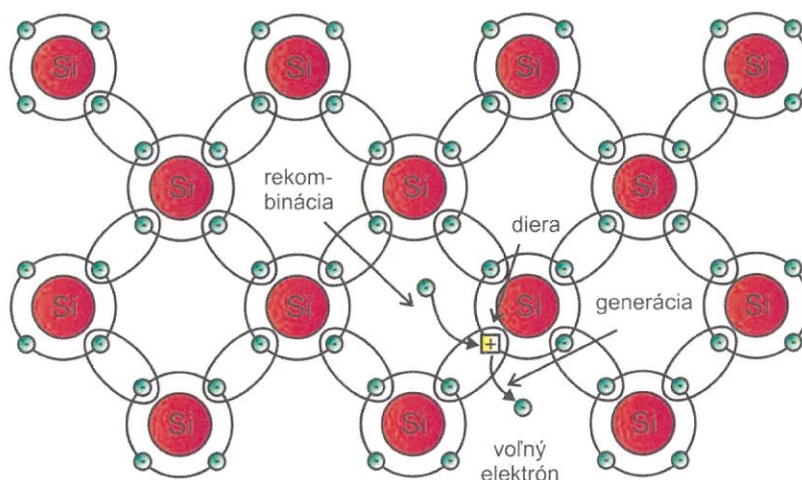
Pre funkciu elektronických súčiastok sú rozhodujúce *chemické vlastnosti* príslušného polovodičového materiálu. Zo základnej chémie vieme, že atómy sú tvorené jadrom a obalom. V jadre sa nachádzajú protóny (majú kladný náboj) a neutróny (nemajú náboj) a v obale sa nachádzajú elektróny (majú záporný náboj). Elektróny sú okolo jadra rozmiestnené vo vrstvách (označených K, L, M, N, O, P, Q), ktorých energia stúpa v smere od jadra, pričom majú tendenciu zaujímať stavy s najnižšou energiou (najbližšie k jadru). Z hľadiska vytvárania chemických väzieb je najdôležitejšia vonkajšia vrstva nazývaná **valenčná vrstva**. Kremík obsahuje v prvej vrstve 2 elektróny, v druhej vrstve 8 elektrónov a tretej vrstve 4 elektróny (Obr. 5.2 vľavo). Materiály, ktoré nemajú zaplnenú valenčnú vrstvu nie sú stabilné a stabilitu môžu získať len prijatím ďalších elektrónov, ktoré by zaplnili valenčnú vrstvu. Keďže veľmi čistý kremík používaný pri výrobe elektronických súčiastok má len veľmi malý počet atómov nečistôt s ktorými by mohol vytvárať väzby, vytvárajú kremíkové atómy väzby navzájom – zdieľajú svoje valenčné elektróny v **kovalentnej väzbe** (Obr. 5.2 vpravo).



Obr. 5.2 Zjednodušený model atómu kremíka s vyznačením valenčných elektrónov (vľavo) a kovalentná väzba medzi atómami kremíka vytvárajúca pravidelnú (kryštalickú) štruktúru

5.1.1 Vlastná vodivosť polovodičov

Je dôležité si uvedomiť, že polovodičové materiály ako kremík majú za normálnych okolností pomerne veľký merný elektrický odpor a sú teda slabými vodičmi elektrického prúdu. Pri veľmi vysokej čistote kremíka používaného v elektronike sú takmer všetky jeho atómy viazané kovalentnými väzbami a vytvárajú kryštalickú mriežku. Ak by sme uvažovali teplotu rovnú absolútnej nule ($0\text{ K} = -273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$) boli by všetky atómy v pokojovom stave a v štruktúre mriežky by sa nevyskytovali žiadne poruchy – kremík by bol dokonalý izolant. Dodaním energie (napr. tepelnej pri zvýšení teploty) začnú atómy kmitať pričom sa znižuje ich vzdialenosť elektrónového obalu od jadra čo znamená menšiu elektrostatickú silu väzby medzi jadrom a obalom (Coulombov zákon). Keďže valenčné elektróny sú viazané k jadru slabšie ako elektróny v nižších vrstvách môže dôjsť k tomu, že valenčný elektrón opustí kovalentnú väzbu a stane sa **voľným elektrónom** (Obr. 5.3). Po tomto elektróne ostane vo väzbe prázdne miesto, ktoré môže obsadiť iný elektrón a nazýva sa **diera** (Obr. 5.3). Vytvorenie voľného elektrónu a diery sa nazýva **generácia páru elektrón-diera**. Obsadenie voľného miesta (diery) iným voľným elektrónom sa nazýva **rekombinácia**.

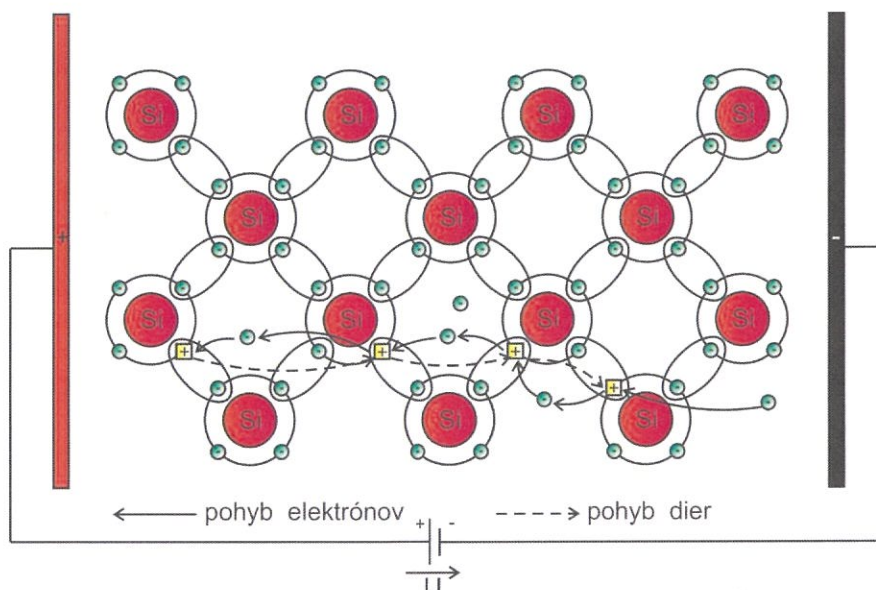


Obr. 5.3 Generáciu páru elektrón-diera a rekombináciu v kryštáli kremíka

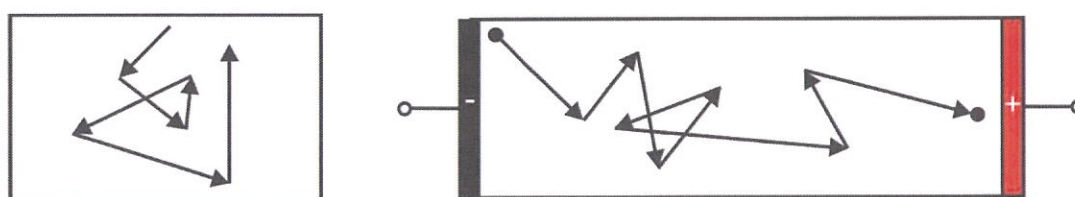
Oba deje (generácia a rekombinácia) sú v rovnováhe pričom počet párov elektrón-diera je závislý na teplote – s rastúcou teplotou sa ich počet zvyšuje. Počet párov je pri izbovej teplote veľmi nízky (jedna porušená väzba pripadá približne na 10^9 väzieb) a na každých 10K sa zväčší asi na dvojnásobok. Závislosť polovodičových materiálov na teplote je výraznejšia ako u vodičov a ich *teplotný koeficient merného elektrického odporu je záporný* - so stúpajúcou teplotou ich odpor klesá, pretože sa zvyšuje počet porušených väzieb, a teda rastie počet nosičov náboja.

Ak pripojíme kryštál kremíka k zdroju napätia (Obr. 5.4), vo vytvorenom elektrickom poli sa voľné elektróny pohybujú smerom ku kladnému pólu (vyznačené plnou šípkou). Pri pohybe rekombinujú s vytvorenými dierami, pričom pohyb dier možno vnímať ako opačný k pohybu elektrónov (vyznačené prerušovanou šípkou). Je potrebné si uvedomiť, že diera nie je v skutočnosti časticou s kladným nábojom ale iba narušenie väzby s uprázdneným miestom po elektróne, ktoré môže zaujať iný voľný elektrón. Pri tom ako sú elektróny vytrhávané z kovalentnej väzby a pohybujú sa smerom ku kladnému pólu, zdá sa akoby narušenia väzby (diery) smerovali k zápornému pólu.


Pri teplote vyššej ako absolútna nula sa elektrón pohybuje kryštálom kremíka náhodne pričom získava tepelnú energiu kmitajúcej kryštálovej mriežky (štruktúra, ktorú vytvárajú atómy kryštálu), ktorá sa môže meniť na kinetickú energiu. Vďaka tomu sa elektrón pohybuje určitou, tzv. **tepelnou rýchlosťou**, ktorá je rádovo 10^5 m.s⁻¹. Elektrón sa však nepohybuje priamočiara pretože pri svojom pohybe neustále naráža do iných kmitajúcich atómov mriežky alebo atómov nečistôt (Obr. 5.5 vľavo). Po pripojení kryštálu kremíka k zdroju napätia sa začnú pohybovať elektróny v jednom smere tzv. **driftovou (unášavou) rýchlosťou** (Obr. 5.5 vpravo). Pohyb tepelnou rýchlosťou však neustáva a je superponovaný na pomalý pohyb driftovou rýchlosťou.



Obr. 5.4 Pohyb dier a elektrónov po pripojení polovodiča k zdroju napätia



Obr. 5.5 Tepelný pohyb elektrónu (vľavo) a superpozícia tepelného pohybu na drift elektrónu v elektrickom poli

 Rozdiel medzi obvyklými hodnotami tepelnej rýchlosti a driftovej rýchlosti nosičov náboja v elektrickom poli je mnoho rádov (tepelné rýchlosti majú rádovo hodnoty $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a driftové rádovo $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (pozri tiež príklad 1.12). Je prirodzené zamyslieť sa nad tým ako je možné, že pri takých malých driftových rýchlostiach sú prejavy elektrického poľa takmer okamžité (napr. čas, ktorý ubehne medzi zapnutím vypínača a zasvietením je veľmi malý). Zaujímavé vysvetlenie je uvedené v [12] prostredníctvom záhradnej hadice – ak je hadica prázdna a jej dĺžka je povedzme 30 m, bude trvať niekoľko sekúnd kým sa dostane voda z čerpadla až k tryske na konci hadice. Ak je však hadica plná vody, začne striekať z trysky takmer okamžite. Materiál používaný vo vodičoch (napr. meď alebo hliník) obsahuje veľké množstvo voľných nosičov náboja v celom objeme, a preto po pripojení k zdroju napätia a vytvorení elektrického poľa, ktoré ich usmerňuje sú ich účinky takmer okamžité.

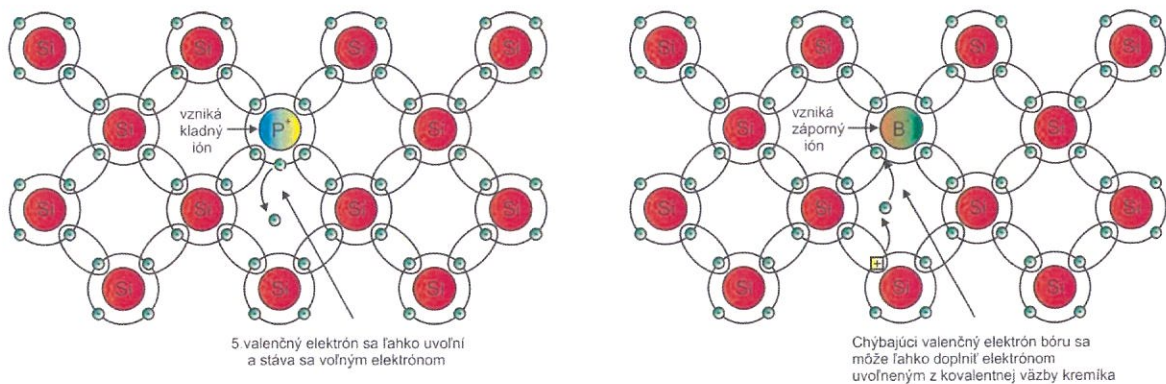
5.1.2 Nevlastná vodivosť polovodičov. Polovodič typu N a typu P

V predošlej podkapitole sme si uviedli, že kremík má za normálnych okolností pri izbovej teplote veľmi nízku vodivosť pretože počet narušených väzieb pri ktorých sa uvoľní voľný elektrón je veľmi malý. Hlavný význam polovodičových materiálov pri ich využití v konštruovaní elektronických súčiastok súvisí s ovplyvňovaním ich vodivosti (ako aj ich teplotnej závislosti) žiaducim spôsobom. To sa dosahuje umelým zavedením určitých typov nečistôt (prímesí) do štruktúry polovodičového materiálu. Tento proces sa nazýva **dotovanie**.

Pre dotovanie kremíka sú vhodné prvky, ktoré majú o jeden valenčný elektrón viac alebo menej a teda patria do III. alebo V. skupiny v periodickej tabuľke. Pridaním prímies do vlastného polovodiča vzniká **nevlastný polovodič**, nazývaný tiež extrinsický. Vhodnými materiálmi z piatej skupiny sú napr. fosfor (*P*), arzén (*As*) a antimón (*Sb*) a z tretej skupiny bór (*B*), hliník (*Al*), gálium (*Ga*) a indium (*In*).

Ak pridáme do polovodičového materiálu prímies v podobe päťmocného prvku (napr. fosforu) budú štyri valenčné elektróny viazané v kovalentnej väzbe (Obr. 5.6 vľavo) pričom piaty valenčný elektrón nebude viazaný na žiaden atóm v okolí. Na uvoľnenie tohto elektrónu z atómu fosforu stačí podstatne nižšia energia ako na uvoľnenie valenčného elektrónu z kovalentnej väzby. Preto už i pri izbovej teplote bude obsahovať takto dotovaný polovodič značne vyšší počet voľných nosičov náboja (elektrónov). Atómy prvkov s vyšším počtom valenčných elektrónov sa preto nazývajú **donory** (od slova „darovať“). Po uvoľnení piateho valenčného elektrónu sa z atómu fosforu stáva nepohyblivý *kladný ión* – jeho počet protónov v jadre je o jeden vyšší ako počet elektrónov v obale. Keďže v takto dotovanom polovodiči koncentrácia elektrónov výrazne prevyšuje koncentráciu dier, označujeme tento ho ako **polovodič typu N** (negatívne vodivý). Väčšinové nosiče náboja potom nazývame **majoritné** (tu elektróny) a menšinové nazývame **minoritné** (tu diery).

Ak pridáme do polovodičového prvku prímies v podobe trojmocného prvku (napr. bóru), budú tri valenčné elektróny súčasťou kovalentnej väzby a jedno miesto ostane prázdne (diera). Toto miesto môže zaujať elektrón z kovalentnej väzby iného atómu, pričom po jeho presune opäť vzniká diera. Takto dotovaný polovodič teda obsahuje vysoký počet voľných nosičov náboja (diery). Atómy prvkov s nižším počtom valenčných elektrónov sa preto nazývajú **akceptory** (od slova „prijat“). Po prijatí elektrónu sa z atómu bóru stáva nepohyblivý *záporný ión* – jeho počet protónov v jadre je o jeden nižší ako počet elektrónov v obale. Keďže v takto dotovanom polovodiči koncentrácia dier výrazne prevyšuje koncentráciu elektrónov, označujeme tento ho ako **polovodič typu P** (pozitívne vodivý). Majoritnými nosičmi náboja sú v polovodiči typu P diery a minoritnými sú elektróny.

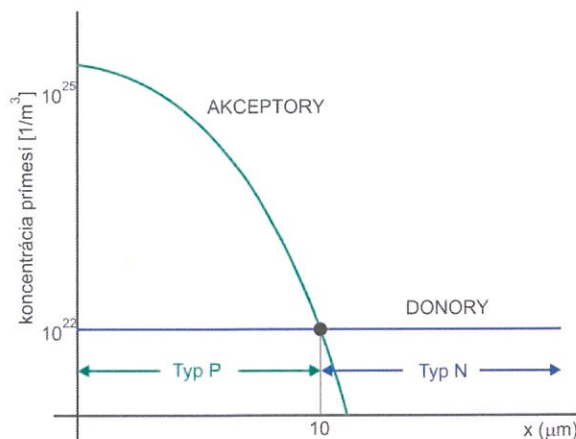


Obr. 5.6 Dotovanie kremíka atómom päťmocného prvku (fosfor) pre získanie polovodiča typu N (vľavo) a dotovanie kremíka atómom trojmocného prvku (bór) pre získanie polovodiča typu P

5.1.3 PN priechod

PN priechod vzniká pri spojení polovodiča typu P a polovodiča typu N. Takýto priechod má veľký význam pri konštrukcii elektronických prvkov a pre jeho správnu funkciu je nutné ho realizovať takým spôsobom aby bol priechod medzi oboma typmi polovodičov plynulý. Zabezpečiť požadovanú plynulosť priechodu je možné napr. umiestnením malého množstva

india na kúsok kremíka typu N a jeho zahriatím v peci na teplotu asi 600 °C. Pri tejto teplote začnú atómy india zaplavovať kremík, čím vznikne v oblasti okolo umiestnenia india zóna s podstatne vyššou koncentráciou dier ako elektrónov. Tým dochádza k predotovaniu kremíka z pôvodného typu N (s vyššou koncentráciou elektrónov) na kremík typu P (s vyššou koncentráciou dier). Na Obr. 5.7 je znázornené vytvorenie PN priechodu pomocou predotovania kremíkovej doštičky typu N na typ P.

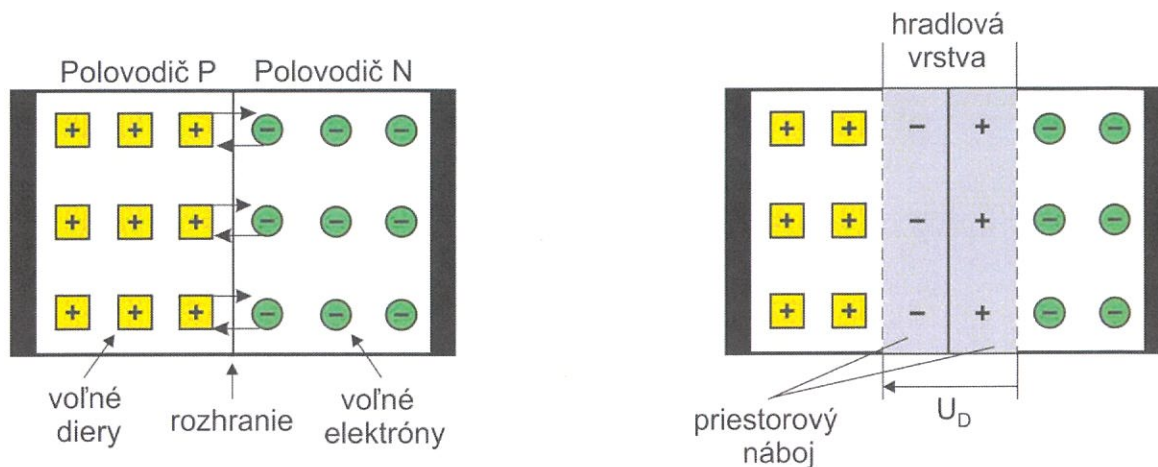


Obr. 5.7 Predotovanie doštičky kremíku typu N trojmocným prvkom pre vytvorenie PN priechodu. Vo vyznačenom bode je vytvorený metalurgický priechod.

Bez priloženého napätia dochádza na rozhraní oboch typov polovodičov k samovoľnému priechodu nosičov náboja v smere z oblasti vyššej koncentrácie do oblasti nižšej koncentrácie – tento jav sa nazýva **difúzia**. V tomto zmysle dochádza k priechodu *dier* z oblasti P (vyššia koncentrácia) do oblasti N (nižšia koncentrácia) a k priechodu *elektrónov* z oblasti N (vyššia koncentrácia) do oblasti P (nižšia koncentrácia). Diery, ktoré prejdú z oblasti P do oblasti N nachádzajú dostatok voľných elektrónov a rovnako elektróny, ktoré prejdú z oblasti N do oblasti P nachádzajú dostatok voľných dier čím dochádza k rekombinácii. Z tohto dôvodu sa vytvára oblasť, ktorá obsahuje podstatne menej voľných nosičov náboja ako ktorákoľvek z oblastí (N alebo P) a má teda omnoho menšiu vodivosť. Táto oblasť sa nazýva tiež **hradlová vrstva** a jej šírka býva v rozsahu 1-5 μm. Zároveň po odchode voľných elektrónov z oblasti N po nich ostávajú kladné ióny vytvárajúce **kladný priestorový náboj** a po odchode voľných dier z oblasti P záporné ióny vytvárajúce **záporný priestorový náboj** (Obr. 5.8 vpravo). Tieto ióny sú nepohyblivé, a preto sa vytvorená nábojová dvojvrstva chová ako dielektrikum s vysokou hodnotou intenzity elektrického poľa. Toto elektrické pole odsáva minoritné nosiče náboja z oboch oblastí (tzv. **drift**) – elektróny z oblasti P sú priťahované kladným priestorovým nábojom v hradlovej vrstve zatiaľ čo diery z oblasti N sú priťahované záporným priestorovým nábojom. V PN priechode teda dochádza k dvom procesom prebiehajúcich v opačnom smere – k difúzii a k driftu voľných nosičov náboja. Ak sa prúdová hustota elektrónov spôsobená difúziou a driftom vyrovnajú a to isté nastane aj pre diery, bude PN priechod *rovnováha* a nebude ním pretekať prúd. V rovnováhe je na hradlovej vrstve vytvorené **difúzne napätie** (U_D), ktoré predstavuje energetickú bariéru voči ďalšiemu prenikaniu voľných nosičov náboja vplyvom difúzie (teda procesu prebiehajúceho pri nerovnakých koncentráciách). Jeho veľkosť závisí na type polovodičového materiálu a pre konkrétny materiál zase od teploty a koncentrácie prímiesi:

$$\text{germánium: } U_D = 0,2 \text{ až } 0,4 \text{ V}$$

$$\text{kremík: } U_D = 0,5 \text{ až } 0,8 \text{ V}$$



Obr. 5.8 Znáznornenie procesu difúzie majoritných nosičov do príslušných oblastí s nižšou koncentráciou (vľavo) a vytvorenie hradlovej vrstvy s priestorovým nábojom a difúzneho napätia U_D

5.1.4 PN priechod po pripojení napätia

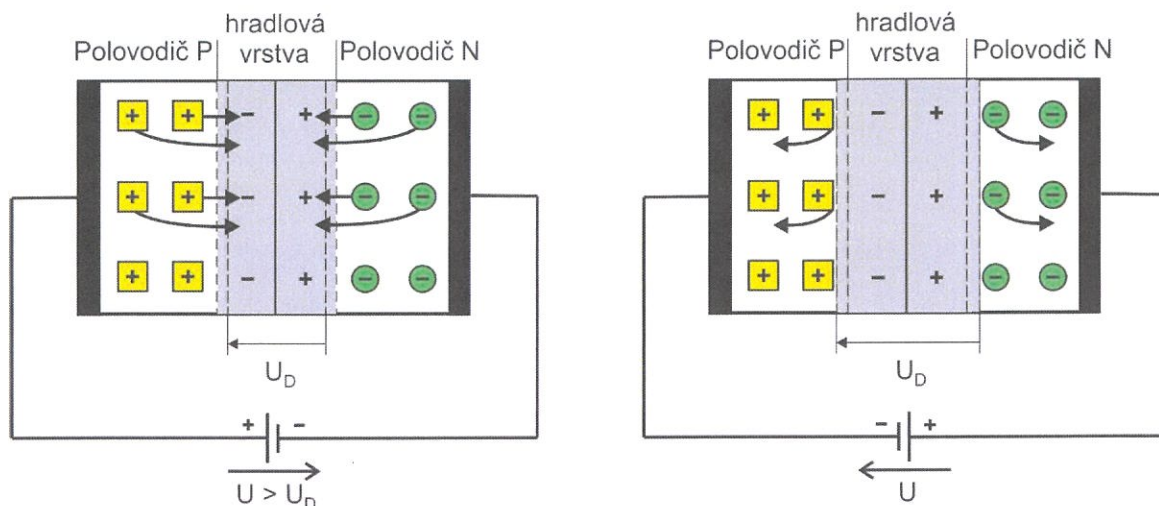
Priepustný smer

Ak ku PN priechodu pridáme kontakty a pripojíme ho k zdroju napätia tak, že časť s polovodičom typu P pripojíme ku kladnému pólu zdroja a časť s polovodičom typu N k zápornému pólu zdroja, budú smerovať elektróny v polovodiči N a diery v polovodiči P smerom k hradlovej vrstve (Obr. 5.9 vľavo). Keďže hradlová vrstva má veľký odpor práve kvôli absencii voľných nosičov náboja, jej šírka sa v tomto prípade zmenší a jej odpor zníži. Ak je napätie vonkajšieho zdroja dostatočne veľké, hradlová vrstva sa prakticky úplne odstráni a PN priechodom bude pretekať veľký prúd vyvolaný vonkajším zdrojom. Zdroj pripojený týmto spôsobom vyvolá zníženie energetickej bariéry predstavovanej difúznym napätím priestorového náboja čo umožní tok nosičov náboja do príslušných oblastí vplyvom difúzie aj *driftu*. Po pripojení vonkajšieho napätia však majú drift aj difúzia nosičov náboja rovnaký smer. Takto zapojený PN priechod je zapojený v tzv. **priepustnom smere**. Prúd bude PN priechodom pretekať až v prípade, že je vonkajšie napätie *väčšie* ako difúzne napätie – čo pre kremík znamená napätie 0,5 až 0,8 V.

Záverny smer

Po pripojení PN priechodu s polovodičom P k zápornému pólu zdroja a polovodičom N ku kladnému pólu dochádza k pohybu dier v polovodiči P a elektrónov v polovodiči N smerom ku kontaktom (od hradlovej vrstvy) čím dochádza k ďalšiemu ochudobneniu oblastí o voľné nosiče náboja a teda aj rozšírenie hradlovej vrstvy voči prípadu PN priechodu bez vonkajšieho napätia. Smer difúzneho napätia je zhodný so smerom napätia vonkajšieho zdroja. Takto pripojený zdroj spôsobuje zväčšenie energetickej bariéry predstavovanej difúznym napätím, ktorá zabraňuje toku majoritných nosičov náboja z príslušných oblastí. Na druhú stranu, pre minoritné nosiče náboje (elektróny v polovodiči P a diery v polovodiči N) pôsobí toto zapojenie zdroja ako zapojenie v priepustnom smere čím dochádza k ich presunu PN priechodom. Ich koncentrácie sú však také nízke, že hodnota takéhoto prúdu je veľmi malá. Takto zapojený PN priechod je zapojený v tzv. **závernom smere**. Malý prúd tvorený tokom

minoritných nosičov náboja sa nazýva **prúd v závernom smere** (nazývaný tiež *saturačný prúd*).



Obr. 5.9 Zapojenie PN priechodu v priepustnom smere (vľavo) – polovodič typu P je pripojený ku kladnému pólu zdroja a polovodič typu N je pripojený k zápornému pólu zdroja a zapojenie v závernom smere (vpravo) – polovodič typu P je pripojený k zápornému pólu zdroja a polovodič typu N je pripojený ku kladnému pólu zdroja

Tento prúd má hodnoty:

$$\begin{aligned} \text{germánium: } I_R &= 10 \text{ až } 500 \mu\text{A} \\ \text{kremík: } I_R &= 5 \text{ až } 500 \text{ nA} \end{aligned}$$






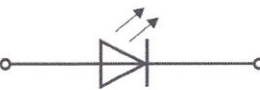
Záverne napätie z vonkajšieho zdroja nemôže byť ľubovoľne veľké pretože od istej hodnoty bude elektrické pole na valenčné elektróny pôsobiť silnejšie ako Coulombovské sily, ktoré ich viažu k jadrú a dôjde k prietoku veľmi veľkého prúdu, ktorý môže zničiť PN priechod.

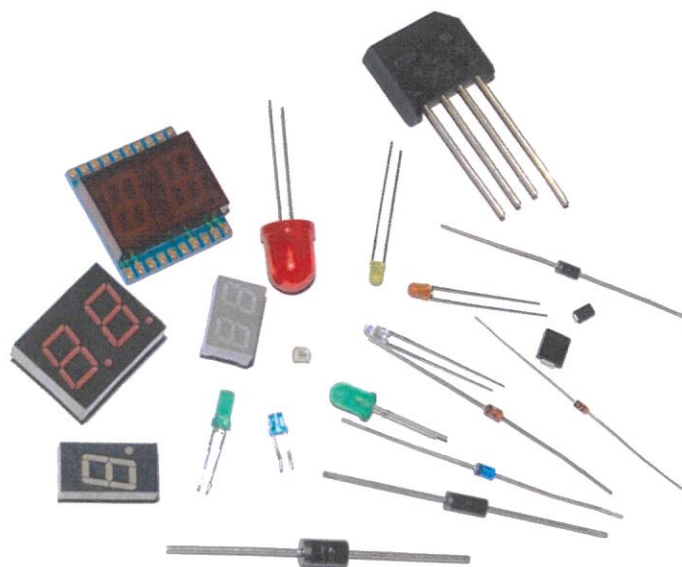
V závernom smere sa využíva ešte jedna zaujímavá vlastnosť PN priechodu – ako bolo uvedené vyššie, priestorový náboj v hradlovej vrstve tvorí vlastne dielektrikum s relatívne malou kapacitou a funguje teda ako kondenzátor. S rastúcim záverným napätím šírka hradlovej vrstvy rastie čo odpovedá rastúcej vzdialenosti dosiek kondenzátora a v dôsledku toho menšej kapacite hradlovej vrstvy. Uvedený jav sa využíva v **kapacitných diódach**.

5.2 Diódy

Diódy sú elektronické súčiastky, ktoré majú dva vývody (odtiaľ názov „di-“, (dva) a skratka elektródy) a vedú elektrický prúd iba v jednom smere (v závislosti od polarity priloženého napätia). Tento efekt sa v diódach dosahuje využitím energetickej bariéry na rozhraní dvoch oblastí s odlišnými vlastnosťami, ktorú je možné vhodne znižovať pomocou vonkajšieho napätia. Najpoužívanejším typom rozhrania je PN priechod a priechod kov-polovodič.

Tab. 5.1 Značky a použitie niektorých typov diód

Typ diódy	Schematická značka	Použitie
Usmerňovacia dióda		Pre usmernenie striedavých veličín a pre ochranu súčiastok pri spínaní indukčnej záťaže
Zenerova dióda		Ako zdroj referenčného napätia v stabilizátoroch
Kapacitná dióda (varikap, varaktor)		V napätím riadených oscilátoroch, zosilňovačoch a násobičoch frekvencie
Schottkyho dióda		Usmerňovacie aplikácie v spínaných zdrojoch
Tunelová dióda		V oscilátoroch a zosilňovačoch pre veľmi vysoké frekvencie (až do 10 GHz)
Svetelná dióda		Ako indikátory a v segmentových zobrazovačoch

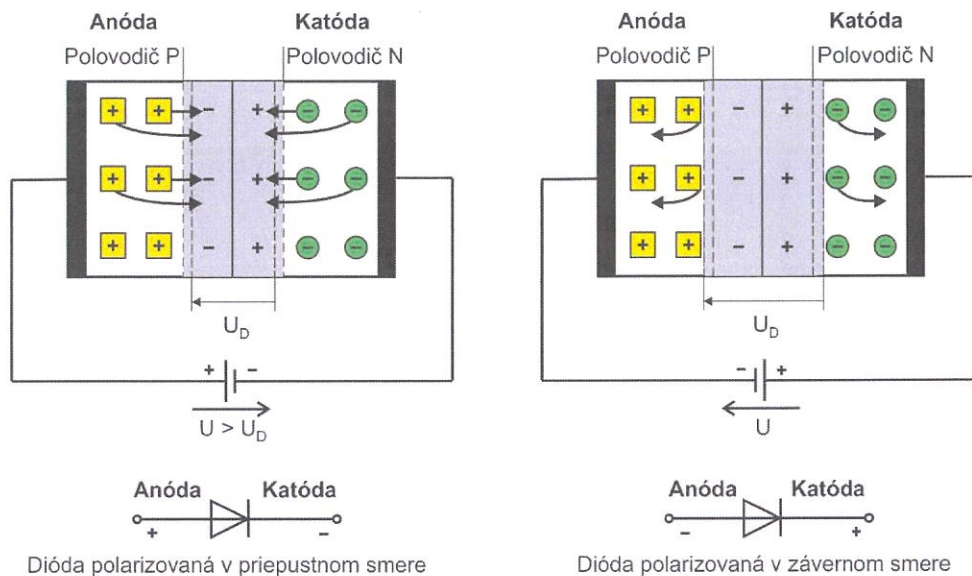


Obr. 5.10 Niektoré typy diód (vpravo hore so štyrmi vývodmi je usmerňovací mostík)[28]

5.2.1 Usmerňovacie a spínacie diódy

Usmerňovacie a spínacie diódy predstavujú zrejme najjednoduchšie využitie fyzikálnych vlastností PN priechodu. Ako bolo uvedené vyššie diódy ako elektronické súčiastky majú dve elektródy pričom *kladná elektróda – anóda* – je pripojená k polovodiču typu P a *záporná*

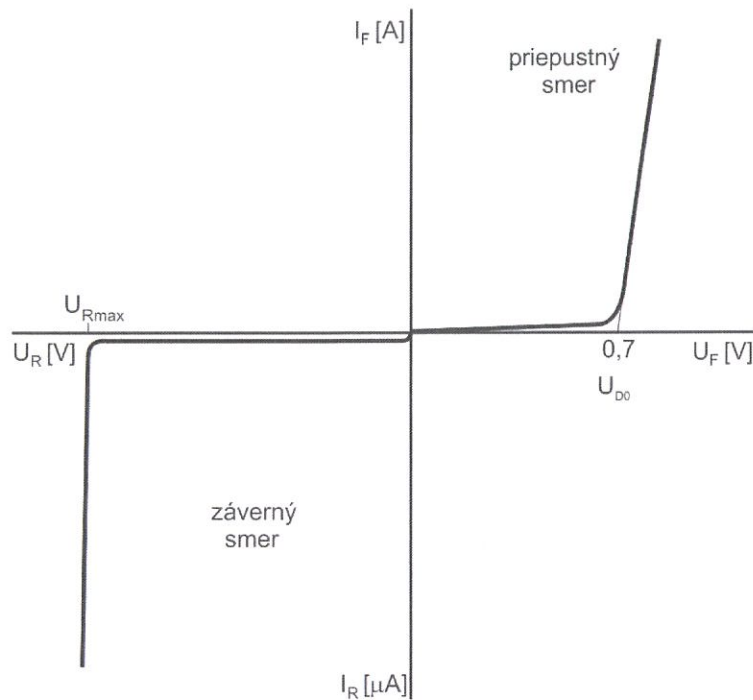
elektroda – katóda – je pripojená k polovodiču typu N (Obr. 5.11). Ak pripojíme kladnú svorku zdroja napätia k anóde a zápornú svorku ku katóde (Obr. 5.11 vľavo), hovoríme, že dióda je **polarizovaná v priepustnom smere** a potečie ňou prúd (pre vysvetlenie pozri kapitolu 5.1.4). Ak pripojíme k anóde zápornú svorku zdroja a ku katóde kladnú svorku (Obr. 5.11 vpravo), hovoríme, že dióda je **polarizovaná v závernom smere**, diódou nebude tiecť prúd. Všimnime si, že pozícia príslušnej elektródy je na schematickej značke jednoznačná – šípka tvoriaca značku diódy je pre priepustný smer orientovaná rovnako ako smer dohodnutého kladného prúdu (od kladnej svorky k zápornej). Rovnako zvislá čiara na konci šípky spolu so stranami trojuholníka tvoria akoby obrátené písmeno K, čo môžeme stotožniť s pozíciou katódy (zápornej elektródy).



Obr. 5.11 Polarizácia diódy v priepustnom (vľavo) a závernom smere (vpravo)

Chovanie diódy pri rôznych hodnotách napätia a jeho polarite je možné sledovať z jej voltampérovej charakteristiky. Typická voltampérová charakteristika kremíkovej diódy je uvedená na Obr. 5.12 (charakteristiky germániových diód sa od kremíkových výrazne líšia). Napätie a prúd pre priepustný smer sú označené pomocou indexu F (z anglického slova pre polarizáciu v priepustnom smere – „Forward bias“) – U_F a I_F . Napätie a prúd v závernom smere sú označené pomocou indexu R (z anglického slova pre polarizáciu v závernom smere – „Reverse bias“). Vidíme, že prúd v priepustnom smere začína pretekať až od prekročenia *prahového napätia* označeného U_{D0} – vieme, že diódou potečie prúd vtedy keď hodnota vonkajšieho napätia prekoná hodnotu difúzneho napätia, čo je v tomto prípade 0,7 V. Pri polarizovaní kremíkovej diódy v závernom smere je po prekročení hodnoty napätia U_{Rmax} (maximálna hodnota záverného napätia – nazývané tiež *prierazné napätie*) viditeľný prudký nárast prúdu v závernom smere. Hodnoty U_{Rmax} sa u kremíkových a germániových diód líšia:

$$\begin{aligned} \text{germánium: } U_{Rmax} &= 40 \text{ až } 100 \text{ V} \\ \text{kremík: } U_{Rmax} &= 80 \text{ až } 1500 \text{ V} \end{aligned}$$



Obr. 5.12 Voltampérová charakteristika kremíkovej diódy

5.2.2 Charakteristické hodnoty diód

Voltampérová charakteristika diód je len jedna z foriem vyjadrenia ich vlastností. V katalógových listoch výrobcovia udávajú charakteristické hodnoty diód, ktoré sa delia na: **medzné hodnoty a charakteristické parametre.**

Medzné hodnoty sú hraničné hodnoty súčiastok, ktoré s ohľadom na ich funkčnosť nesmú byť prekročené. Pri činnosti diódy (ale aj iných elektronických súčiastok) sa musí zamedziť prekročeniu medznej hodnoty ktoréhokolvek parametra, aj keby ostatné medzné hodnoty prekročené neboli.

Charakteristické parametre určujú chovanie v určitom pracovnom bode. Tieto parametre sa delia na *statické* a *dynamické*, pričom statické charakterizujú pomery pri prietoku jednosmerného prúdu a dynamické pri prietoku striedavého prúdu alebo v impulznom režime.

Medzné hodnoty U_R a I_F

V katalógových listoch nájdeme najčastejšie nasledujúce medzné hodnoty diód:

- U_R – maximálne napätie v závernom smere
- U_{RM} – maximálne prípustné vrcholové napätie v závernom smere; ide o vrcholovú hodnotu striedavého napätia v závernom smere pri pracovnej frekvencii vyššej ako 20 Hz
- I_F – maximálna prípustná hodnota prúdu v priepustnom smere (buď hodnota jednosmerného prúdu alebo efektívna hodnota striedavého prúdu)
- I_0 – maximálna stredná hodnota striedavého prúdu (stredná hodnota usmerneného prúdu)
- I_{FM} – najvyšší prípustný opakujúci sa špičkový prúd v priepustnom smere; ide o vrcholovú hodnotu striedavého prúdu v priepustnom smere pri pracovnej frekvencii vyššej ako 20 Hz
- I_{FS} – najvyšší prúd, ktorý môže diódou tiecť po dobu nanajviš 1 sekundy; pokiaľ by sa hodnota opakovala, dôjde k poškodeniu diódy

Medzná hodnota celkového stratového výkonu P_{tot}

Pri činnosti diódy v priepustnom smere ňou preteká prúd I_F a je na nej napätie U_F . Súčinom týchto dvoch hodnôt dostávame *stratový výkon diódy* P_D . Pre stratový výkon diódy sa udáva medzná hodnota nazývaná *celkový dovolený stratový výkon* P_{tot} , ktorá sa udáva pri určitej teplote. Stratový výkon diódy spôsobuje zohriatie kryštálu polovodiča a nesmie byť prekročený, preto platí:

$$P_D \leq P_{tot}$$

Stratový výkon samozrejme platí aj pre záverný smer avšak pri veľmi malých hodnotách saturačného prúdu sú aj hodnoty stratového výkonu zanedbateľne malé.

Medzná teplota hradlovej vrstvy T_{jmax}

Ako bolo uvedené vyššie stratový výkon spôsobuje zohriatie kryštálu, ktorý sa prejavuje tiež zvýšením teploty hradlovej vrstvy pričom jej hodnota nesmie prekročiť medznú teplotu označovanú T_{jmax} . Medzná teplota má pre najpoužívanejšie polovodičové materiály nasledujúce hodnoty:

$$\begin{aligned} \text{germánium: } T_{jmax} &= 70 \text{ až } 90 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{kremík: } T_{jmax} &= 150 \text{ až } 200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Niekedy sa namiesto medznej teploty hradlovej vrstvy udáva medzná teplota okolia ϑ_{amax} , ktorej hodnota je potom nižšia ako medzná teplota hradlovej vrstvy.

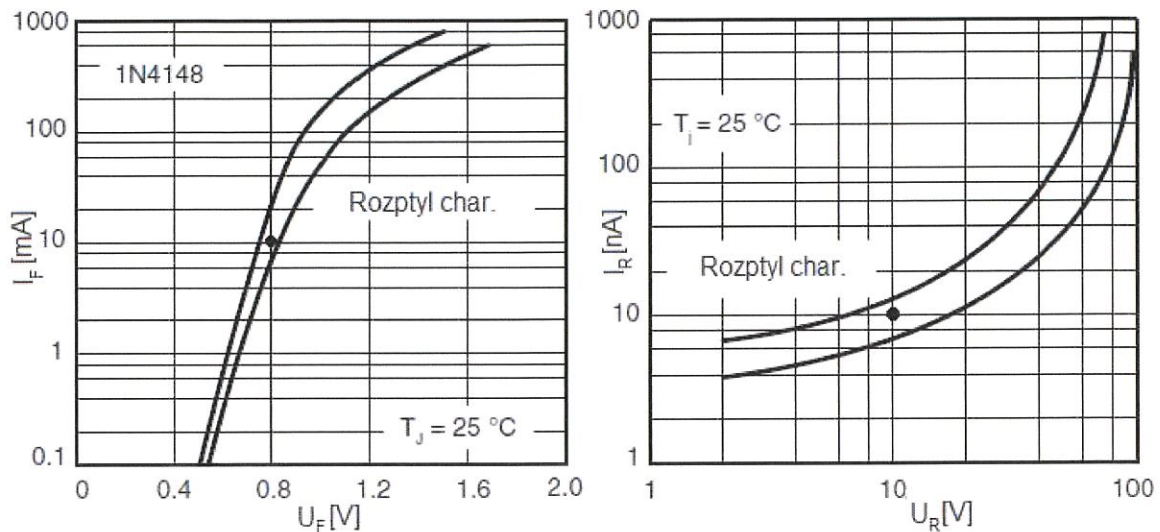
Statický odpor v priepustnom smere R_F a závernom smere R_R

Na Obr. 5.13 vľavo je uvedená charakteristika rýchlej spínacej diódy 1N4148 v priepustnom smere z jej katalógového listu. Tvar charakteristiky sa líši od typickej charakteristiky na Obr. 5.12 z dôvodu použitia logaritmickkej mierky pre hodnoty prúdu na osi y (napätie ostáva v lineárnej mierke). Charakteristika je udaná pre teplotu hradlovej vrstvy $T_j = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Obe charakteristiky na obrázku tvoria ohraničenie súvážením možného rozptylu hodnôt skutočných diód. Statický odpor v priepustnom smere R_F je definovaný ako podiel napätia v priepustnom smere a prúdu v priepustnom smere v niektorom pracovnom bode. Na Obr. 5.13 je vyznačený bod nachádzajúci sa medzi hraničnými charakteristikami. Pre R_F dostávame:

$$R_F = \frac{U_F}{I_F} = \frac{0,8V}{0,01A} = 80\Omega$$

Charakteristika je evidentne nelineárna, a preto by sme v inom pracovnom bode dostali inú hodnotu R_F .

Na Obr. 5.13 vpravo je uvedená charakteristika tej istej diódy v závernom smere. V tomto prípade sú na oboch osiach použité logaritmické mierky. Statický odpor v závernom smere definujeme ako podiel napätia v závernom smere a prúdu v závernom smere v niektorom pracovnom bode. Na obrázku je vyznačený bod v ktorom pre R_R platí:



Obr. 5.13 Charakteristika rýchlej spínacej diódy 1N4148 v priepustnom (vľavo) a závernom smere (vpravo)

$$R_F = \frac{U_R}{I_R} = \frac{10V}{10 \cdot 10^{-9} A} = 1G\Omega$$

Dynamický odpor v priepustnom smere r_F

Dynamický odpor sa definuje ako pomer zmien napätia v priepustnom smere v určitom rozsahu k zmenám prúdu v priepustnom smere v určitom rozsahu. Ak uvažujeme podľa Obr. 5.13 vpravo $\Delta U_F = 0,8 V - 0,65 V = 0,15 V$ a $\Delta I_F = 10 \text{ mA} - 1 \text{ mA} = 9 \text{ mA}$, dostávame pre r_F :

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,15V}{9 \cdot 10^{-3} A} = 16,67 \Omega$$

Interpretáciu dynamického odporu si môžeme predstaviť tak, že v určitom pracovnom bode (napr. $U_F = 0,8 V$ a $I_F = 10 \text{ mA}$) dochádza vplyvom zmien napätia U_F v určitom rozsahu k zmenám prúdu I_F v určitom rozsahu určenom práve r_F .

Doba zotavenia t_{rr}

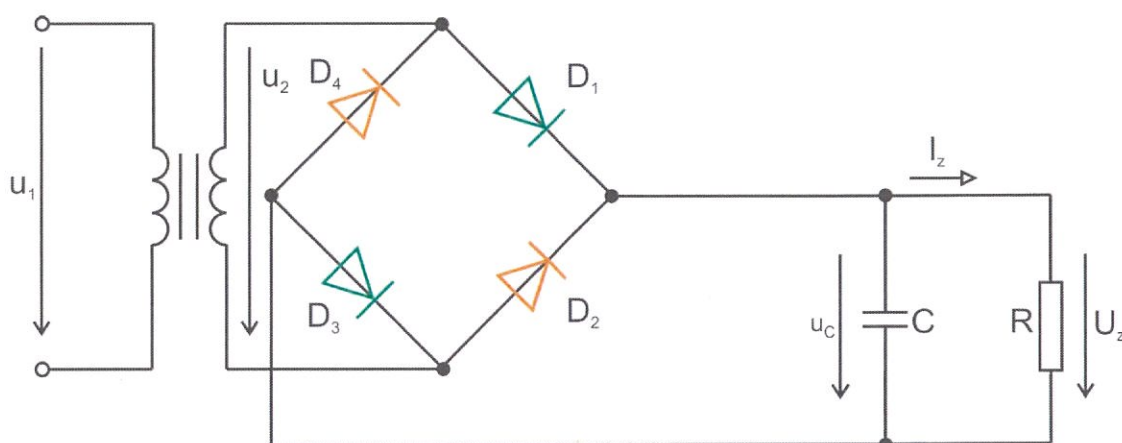
Ak je dióda polarizovaná v priepustnom smere šírka hradlovej vrstvy je minimálna a PN prieschod obsahuje veľké množstvo voľných nosičov náboja. Ak rýchlo zmeníme polaritu na dióde (prejdeme z priepustného do záverného smeru), bude trvať určitý čas kým budú z PN prieschodu odstránené voľné nosiče náboja a dióda prestane viesť elektrický prúd. Tento čas sa nazýva *doba zotavenia* t_{rr} a v katalógových listoch sa udáva za určitých podmienok. Hodnoty sú v rozsahu rádovo mikrosekúnd pre štandardné diódy používané pri sieťových frekvenciách až po desatiny nanosekúnd pre rýchle spínacie diódy.

5.2.3 Mostíkový usmerňovač

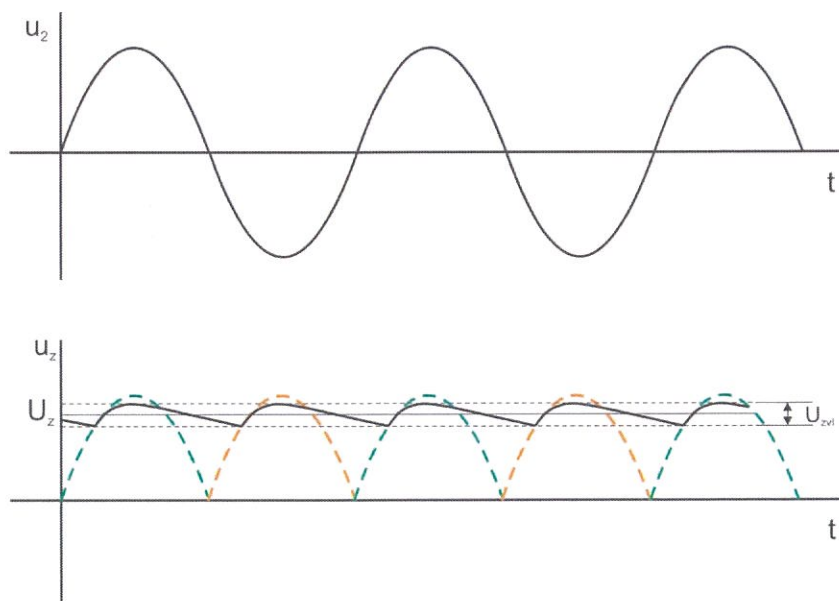
Veľká väčšina elektronických zariadení potrebuje pre svoju činnosť napájanie z jednosmerného zdroja. Keďže z hľadiska hospodárnosti je najefektívnejšie využitie elektrickej siete, je potrebné zabezpečiť transformáciu striedavého napätia v sieti smerom

nadol a tiež jeho usmernenie (zo striedavého napätia získať jednosmerné). Usmernenie striedavého napätia sa realizuje pomocou **usmerňovačov**, v ktorých sa s výhodou využívajú polovodičové diódy pretože majú malý odpor v priepustnom smere a ponúkajú vysokú výkonovú zaťažiteľnosť.

Základom usmernenia je využitie priepustnosti diód iba v jednom smere vďaka čomu je možné zo striedavého napätia získať *pulzujúce*, ktoré obsahuje len kladné (alebo záporné – podľa zapojenia diódy) polvlny. Keďže takýto pulzujúci priebeh napätia je z praktického hľadiska nevýhodný, umiestňuje sa paralelne k záťaži kondenzátor, ktorý sa počas doby priepustnej polarizácie diódy nabíja a počas doby závernej polarizácie vybíja čím vyhladzuje priebeh pulzujúceho napätia. Usmerňovače môžeme podľa toho či vedú pri jednej alebo oboch polvlnách rozdeliť na **jednocestné** a **dvojcestné**. Kvôli lepším parametrom sa najčastejšie využívajú *dvojcestné usmerňovače v mostíkovom zapojení*.



Obr. 5.14 Mostíkový usmerňovač s vyhladzovacím kondenzátorom



Obr. 5.15 Priebeh napätia na záťaži pri použití mostíkového usmerňovača


Na Obr. 5.14 je uvedený mostíkový usmerňovač s vyhladzovacím kondenzátorom. Striedavé napätie u_1 je transformátorom transformované smerom nadol na napätie u_2 . Priebeh tohto napätia je vyznačený na Obr. 5.15 hore. Napätie u_2 je privedené k diódovému usmerňovaču,

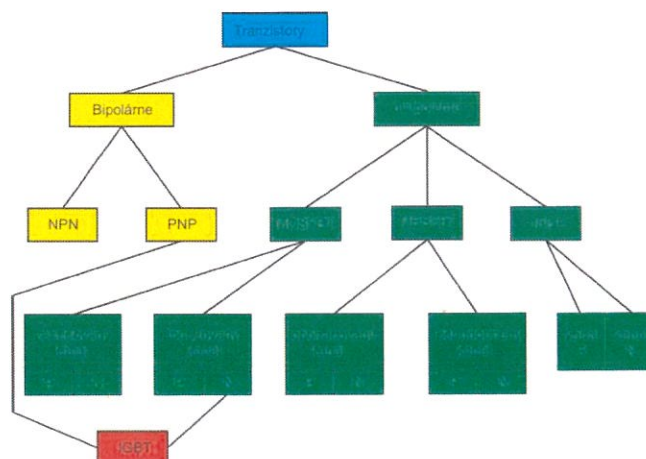
v ktorom sú pri kladnej polovlne diódy D_1 a D_3 (zelená farba) polarizované priepustne a diódy D_2 a D_4 (oranžová farba) polarizované záverne. V zápornej polovlne napätia je situácia opačná a vedú diódy D_2 a D_4 pričom diódy D_1 a D_3 sú zatvorené. Pokiaľ by v obvode nebol vyhladzovací kondenzátor, napätie by na záťaži u_2 by malo priebeh vyznačený čiarkovane na Obr. 5.15 dole. Ak je však pripojený kondenzátor s dostatočne veľkou kapacitou vzhľadom na veľkosť odobieraného prúdu, budú diódy viesť len vtedy keď bude napätie na anóde o približne 0,7 V (otváracie napätie diódy) kladnejšie ako na katóde (teda kondenzátore). Od uzavretia diód sa začína kondenzátor vybíjať do záťaže až do momentu kedy sa v časti kladnej (alebo zápornej) polvlny opäť diódy otvoria. Priebeh napätia na záťaži je na Obr. 5.15 vyznačený hrubou čiernou čiarou, pričom jeho stredná hodnota (jednosmerné napätie) je označená U_{Σ} . Vidíme, že výstupné napätie v skutočnosti obsahuje určité zvlnenie, ktorého rozsah je označený U_{zvl} .

5.3 Tranzistory

Tranzistory sú elektronické súčiastky obvykle s troma elektródami umožňujúce zosilňovanie napätia alebo prúdu alebo oboch súčasne (teda výkonu). Používajú sa tiež v úlohe spínačov vo výkonových alebo logických aplikáciách.

V súčasnosti je dispozícii niekoľko principiálne odlišných typov tranzistorov, ktoré je možné zhruba rozdeliť podľa princípu činnosti na *bipolárne*, *unipolárne* a *kombinované*. Bipolárne tranzistory využívajú pri svojej činnosti oba typy voľných nosičov náboja (elektróny aj diery), zatiaľ čo v unipolárnych sa využíva len jeden typ – elektróny (typ N) alebo diery (typ P). Základná klasifikácia tranzistorov je uvedená na Obr. 5.16.

 Tranzistor objavili John Bardeen, Walter Brattain a William Shockley v laboratóriách A. G. Bella (Bell Labs) firmy AT&T v r. 1947. Objav uskutočnili pri pozorovaní kryštálu germánia ku ktorému pripojili dve zlaté elektródy a zistili, že výkon signálu na výstupe je väčší ako výkon signálu na vstupe. Samotný názov „tranzistor“ zaviedol John R. Price ako skratku slova „transresistance“. Bardeenovi, Brattainovi a Shockleymu bola v r. 1956 udelená Nobelova cena za fyziku „za ich výskum v oblasti polovodičov a ich objav tranzistorového javu“.

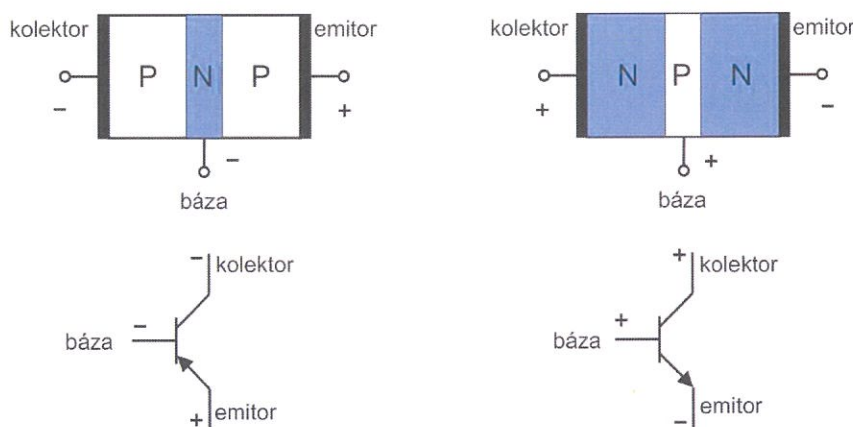


Obr. 5.16 Rozdelenie tranzistorov

5.3.1 Bipolárne tranzistory

Bipolárne tranzistory sú elektronické súčiastky tvorené troma vrstvami s rôznou úrovňou dotovania. Svojím prepojením tvoria dva PN priechody (Obr. 5.17). Každá z týchto vrstiev má vyvedený vývod, ktoré nazývame: **kolektor**, **báza** a **emitor**. V normálnom režime musí byť PN priechod tvorený *bázou a emitorom* polarizovaný priepustne a PN priechod tvorený *bázou a kolektorom* polarizovaný záverne. Úlohou emitora je potom „emitovať“ (teda vysielat') elektróny, ktoré sú „zachytávané“ kolektorom. To, aké množstvo ich ku kolektoru prejde (predstavované *kolektorovým prúdom*, ktorý je hlavným prúdom) je potom riadené *bázovým prúdom* (má malú hodnotu a predstavuje riadiaci prúd). Pomer zmeny kolektorového prúdu ΔI_C k zmene bázového prúdu ΔI_B pri zapojení kolektora nakrátko sa nazýva **prúdový zosilňovací činiteľ** β :

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (\text{pri } \Delta U_{CE} = 0) \quad (5.1)$$



Obr. 5.17 Znáozornenie bipolárneho tranzistora pomocou vrstiev tvoriacich dva PN priechody (hore) a značky PNP a NPN tranzistora (dole)

Z hľadiska konštrukcie môžeme tranzistory rozdeliť na *tranzistory nízkeho výkonu* a *výkonové tranzistory*. Prvé z nich sa obvykle používajú pre zosilňovanie malých striedavých signálov pri ktorom pracujú v pracovnom rozsahu (bez saturácie) charakteristík podľa nastaveného pokojového pracovného bodu. Ak sa tranzistory používajú ako spínače, musia mať čo najväčší odpor v uzavretom stave a čo najmenší odpor v otvorenom stave a využíva sa celý rozsah charakteristík. Výkonové tranzistory sú konštruované na veľké hodnoty napätí a prúdov, ktoré sa využívajú ako vo funkcii zosilňovačov tak aj vo funkcii spínačov.

PN priechod bipolárneho tranzistora je možné polarizovať štyrmi rôznymi spôsobmi, podľa ktorých je možné rozlíšiť štyri režimy činnosti: **nevodivý režim**, **normálny aktívny režim**, **inverzný aktívny režim** a **režim nasýtenia** (saturácie).

Tab. 5.1 Štyri režimy činnosti tranzistora podľa polarizácie prechodov BE a BC (U_D je prahové napätie príslušného prechodu)

Polarizácia prechodu BE	Polarizácia prechodu BC	Režim
$U_{BE} < U_D$	$U_{BC} \leq 0$	Nevodivý
$U_{BE} \geq U_D$	$U_{BC} < 0$	Normálny aktívny

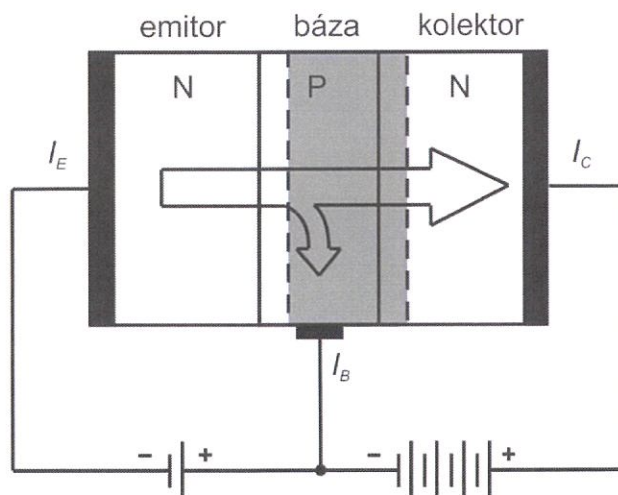
$U_{BE} < 0$	$U_{BC} \geq U_D$	Inverzný aktívny
$U_{BE} > 0$	$U_{BC} > 0$	Režim nasýtenia

Nevodivý režim – v nevodivom režime sú oba PN priechody tranzistora polarizované záverne, čo znamená, že tranzistorom nepreteká prakticky žiaden prúd. Ak používame tranzistor ako spínač, tento režim odpovedá rozpojenému stavu.

Normálny aktívny režim – v normálnom aktívnom režime je PN priechod báza-emitor polarizovaný priepustne a PN priechod báza-kolektor záverne. V tomto režime je medzi kolektorovým a bázovým prúdom približne lineárny vzťah, pričom koeficient (prúdový zosilňovací činiteľ) má hodnoty rádovo niekoľko desiatok resp. stoviek.

Inverzný aktívny režim – v inverznom aktívnom režime je priechod báza-emitor polarizovaný záverne a priechod báza-kolektor priepustne, čo znamená, že emitor a kolektor majú vymenené úlohy, pričom je potrebné vziať do úvahy, že tranzistor je technologicky asymetrická súčiastka (dotácia emitora je podstatne vyššia ako kolektora), a preto je hodnota prúdového zosilňovacieho činiteľa v tomto režime omnoho menšia ako v normálnom aktívnom režime.

Režim nasýtenia (saturácie) – v režime saturácie sú oba PN priechody polarizované priepustne a tranzistorom preteká veľký prúd. Ak používame tranzistor ako spínač, tento režim odpovedá zopnutému stavu spínača.

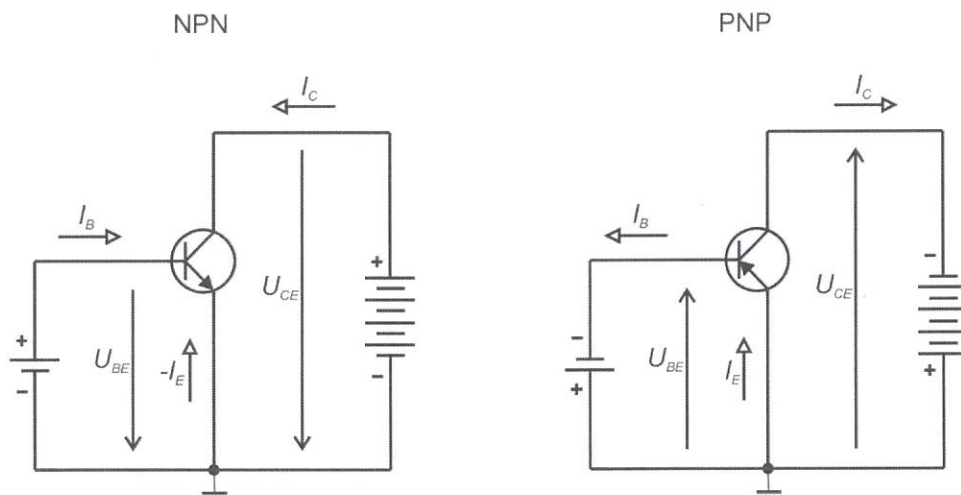


Obr. 5.18 Znáozornenie funkcie tranzistora NPN v normálnom aktívnom režime

Činnosť NPN tranzistora v aktívnom režime si môžeme vysvetliť pomocou Obr. 5.18. V normálnom aktívnom režime musí byť priechod emitor-báza polarizovaný priepustne, čo je dosiahnuté pripojením zdroja napätia zápornou svorkou k emitoru a kladnou svorkou k báze. Priechod báza-kolektor je polarizovaný záverne, čo znamená, že záporná svorka batérie je pripojená k báze a kladná svorka ku kolektoru. V strednej a pravej časti sa vytvorí záverná vrstva (vyznačená sivou farbou), ktorej šírka je veľmi tenká. Keďže priechod báza-emitor je polarizovaný priepustne, preteká do báze z emitora prúd čím sa záverná oblasť znižuje a jej odpor klesá. Takto sa môžu dostať nosiče náboja do kolektora, kde sú unášané vytvoreným elektrickým poľom smerom ku kladnej svorke pripojenej batérie. Pokiaľ je šírka báze dostatočne tenká, zrekombinuje v nej iba malá časť nosičov náboja (majoritné nosiče –

elektróny v tomto prípade - z emitora rekombinujú s majoritnými nosičmi náboja v báze - dierami). Môžeme teda vidieť, že kolektorový prúd I_C je zmenšený voči emitorovému prúdu I_E o hodnotu bázového prúdu I_B , ktorý má veľmi malú hodnotu. Napríklad pri napätí $U_{BE} = 0,7V$ môže mať bázový prúd hodnotu $I_B = 1 \text{ mA}$ a kolektorový prúd $I_C \approx 100 \text{ mA}$. Ak o niečo zvýšime napätie U_{BE} pričom hodnota bázového prúdu narastie na $I_B = 2 \text{ mA}$, bude mať kolektorový prúd hodnotu približne $I_C \approx 200 \text{ mA}$. Ak naopak napätie medzi bázou a emitorom zmenšíme, klesne bázový prúd a aj kolektorový prúd. V pomerne širokom rozsahu hodnôt sa teda I_B aj I_C menia proporcionálne. Môžeme teda pomocou malého vstupného prúdu (I_B) riadiť podstatne väčší výstupný prúd (I_C).

Tranzistory NPN a PNP sa od seba odlišujú poradím jednotlivých vrstiev, a z toho dôvodu aj polaritou napätí báza-emitor a báza-kolektor. Pri dohodnutom kladnom smere prúdu (od kladnej svorky zdroja k zápornej) je možné vyznačiť orientáciu jednotlivých veličín tak ako na Obr. 5.19.



Obr. 5.19 Orientácia veličín pre NPN a PNP tranzistor

5.3.2 Charakteristiky bipolárnych tranzistorov

Vzhľadom k tomu, že tranzistor môžeme z obvodového hľadiska popisovať ako dvojbránu (štvorpól – jedna svorka je spoločná vstupu aj výstupu), je pre charakterizovanie jeho vlastností potrebných viacero charakteristík ako v prípade diódy. Aby sme mohli úplne popísať činnosť tranzistora musíme vedieť vzťahy medzi týmito veličinami: U_{BE} (napätie báza-emitor), U_{CE} (napätie kolektor-emitor), I_B (bázový prúd) a I_C (kolektorový prúd).

Vstupná charakteristika – táto charakteristika vyjadruje závislosť bázového prúdu na napätí báza-emitor ($I_B = f(U_{BE})$) – Obr. 5.20 vľavo. Môžeme si všimnúť, že odpovedá charakteristike diódy uvedenej na Obr. 5.12. Z charakteristiky je možné určiť vstupný odpor tranzistora r_{BE} (v katalógoch sa označuje aj h_{11e}):

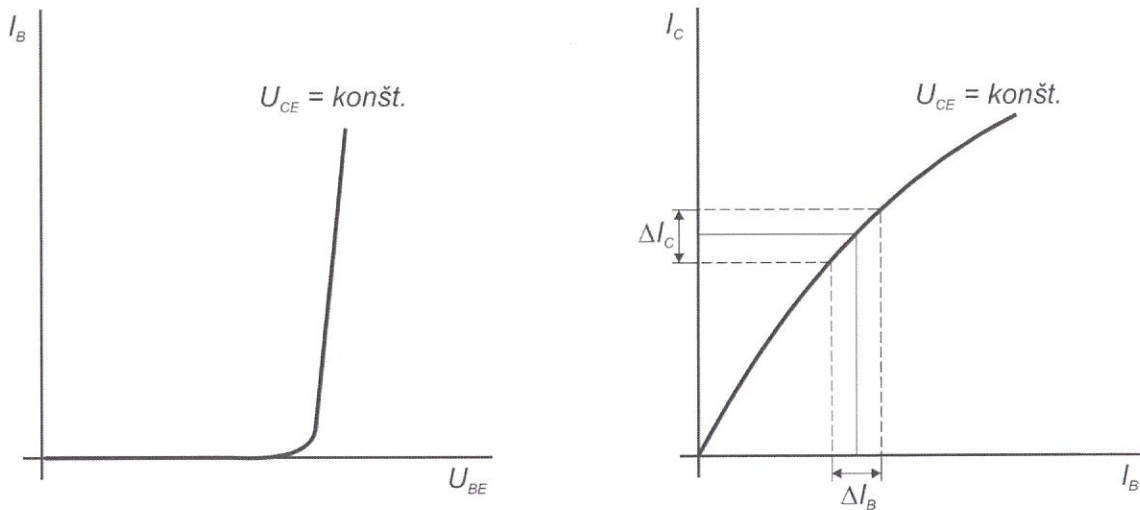
$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}, \quad U_{CE} = \text{konšt.} \quad (5.2)$$

Prúdová prevodová charakteristika – táto charakteristika (nazývaná tiež charakteristika prúdového zosilnenia) vyjadruje závislosť kolektorového prúdu na bázovom prúde ($I_C = f(I_B)$)

– Obr. 5.20 vpravo. Z tejto charakteristiky je možné odčítať prúdové zosilnenie tranzistora (jednosmerné β_{js} resp. striedavé β_{st}):

$$\beta_{js} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta_{st} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}, \text{ pri } U_{CE} = \text{konšt.} \quad (5.3)$$

Z charakteristiky je tiež zrejmé, že závislosť nie je lineárna, čo znamená, že hodnota β_{js} sa mení – závisí od veľkosti kolektorového prúdu, pričom pri vyšších hodnotách I_C hodnota β_{js} klesá.



Obr. 5.20 Vstupná charakteristika (vľavo) a prúdová prevodová charakteristika (vpravo) bipolárneho tranzistora

Prevodová charakteristika – je vyjadrením závislosti kolektorového prúdu na napätí báza-emitor ($I_C = f(U_{BE})$) – Obr. 5.21 vľavo. Prevodová charakteristika sa používa pri určovaní polohy pracovného bodu a môžeme z nej určiť strmosť tranzistora y_{21}

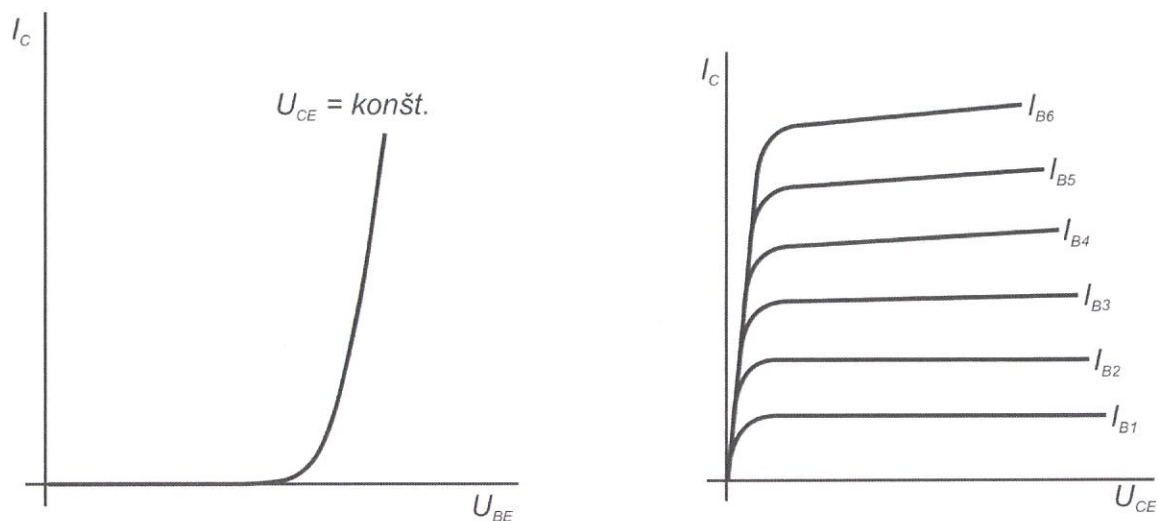
$$y_{21} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}}, \text{ pri } U_{CE} = \text{konšt.} \quad (5.4)$$

Výstupné charakteristiky – vyjadrujú závislosť kolektorového prúdu na napätí kolektor-emitor pri určitej hodnote bázevého prúdu ($I_C = f(U_{CE})$) – Obr.5.21 vpravo. Keďže kolektorový prúd bude pretekať len pri nenulovom bázevom prúde a jeho veľkosť závisí od veľkosti bázevého prúdu, udáva sa viacero charakteristík pre rôzne konštantné hodnoty bázevého prúdu. Z výstupných charakteristík môžeme určiť výstupný odpor tranzistora r_{CE}

$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C}, \text{ pri } I_B = \text{konšt.} \quad (5.5)$$

Niekedy sa v katalógoch uvádza aj parameter výstupnej vodivosti tranzistora označovaný h_{22e}

$$h_{22e} = \frac{1}{r_{CE}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}}, \text{ pri } I_B = \text{konšt.} \quad (5.6)$$



Obr. 5.21 Prevodová charakteristika (vľavo) a výstupné charakteristiky (vpravo) bipolárneho tranzistora

5.3.3 Charakteristické hodnoty bipolárnych tranzistorov

Charakteristické hodnoty bipolárnych tranzistorov sa delia na *menovité* a *medzné* (podobne ako u iných súčiastok). Nedodržanie menovitých hodnôt obvykle vedie k nesprávnej funkcii tranzistora ale prekročenie medzných hodnôt môže viesť k jeho zničeniu. Dôležitou skutočnosťou je, že charakteristiky uvedené v predošlej kapitole majú význam v celom svojom rozsahu len pri zosilňovaní veľkých signálov, kedy dochádza k budeniu vo veľkom rozsahu. Ak je tranzistor použitý vo funkcii zosilňovača malých signálov, kedy sú amplitúdy vstupných elektrických veličín podstatne nižšie ako hodnoty jednosmerných veličín v kľudovom pracovnom bode tranzistora, má dostatočný význam znalosť len charakteristických hodnôt.

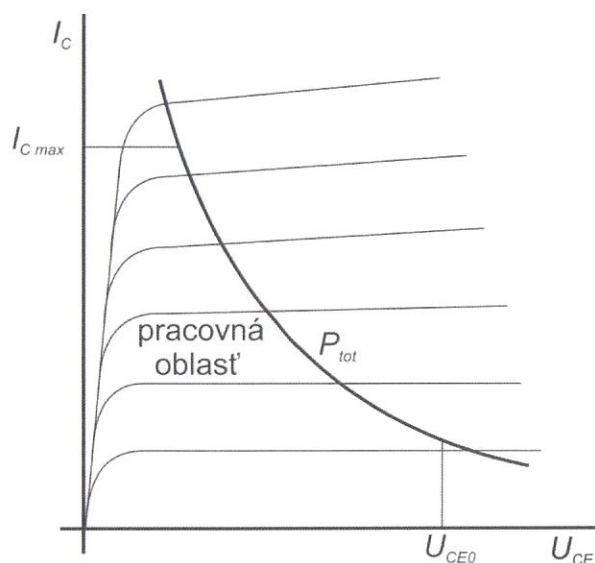
K medzným hodnotám bipolárnych tranzistorov patria:

- maximálne napätie kolektor-emitor, $U_{CE\ max}$
- maximálny kolektorový prúd, $I_{C\ max}$
- maximálne napätie báza-emitor, $U_{BE\ max}$
- maximálny bázový prúd, $I_{B\ max}$
- maximálny stratový výkon, P_{tot}
- maximálna teplota okolia, $T_o\ max$

K statickým parametrom patria:

- jednosmerné prúdové zosilnenie
- saturačné napätie
- zvyškové prúdy

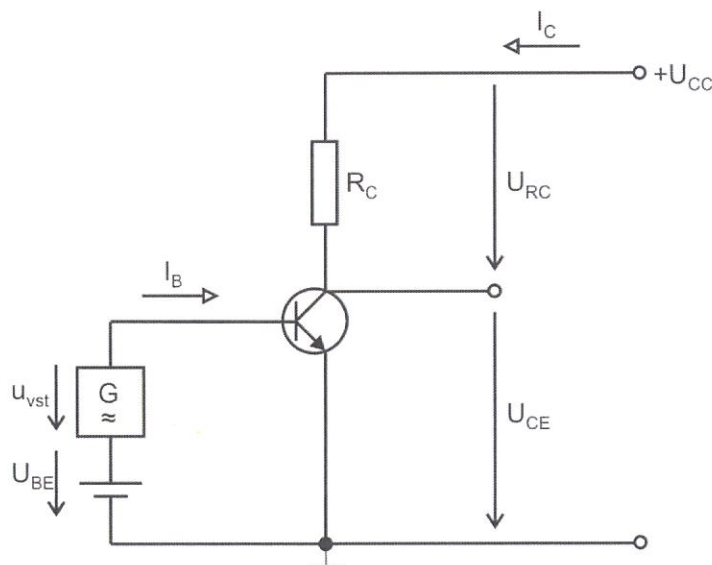
Na Obr. 5.22 je uvedená pracovná oblasť tranzistora, ktorú vymedzujú hodnoty U_{CE0} , $I_{C\ max}$ a P_{tot} , ktoré predstavujú medzné napätie kolektor-emitor, medznú hodnotu kolektorového prúdu a stratový výkon. Stratový výkon má vo výstupných charakteristikách formu hyperboly a definuje hranicu pracovnej oblasti mimo medzných hodnôt napätia a prúdu, pričom pracovný bod sa musí zvoliť tak, aby ležal v ohraničenej oblasti.



Obr. 5.22 Pracovná oblasť tranzistora

5.3.4 Nastavenie kludového pracovného bodu tranzistora a získavanie napätia na báze

Aby mohol tranzistor pracovať ako zosilňovač, je potrebné nastaviť jeho kludový pracovný bod pomocou odporu v kolektore. Najčastejším typom zapojenia v zosilňovačoch je zapojenie so spoločným emitorom (emitor je elektróda spoločná vstupu aj výstupu) – Obr. 5.23. Kolektorový odpor R_C má dve hlavné funkcie: *obmedzuje hodnotu kolektorového prúdu a premeňa prúdové zosilnenie na napätové.*

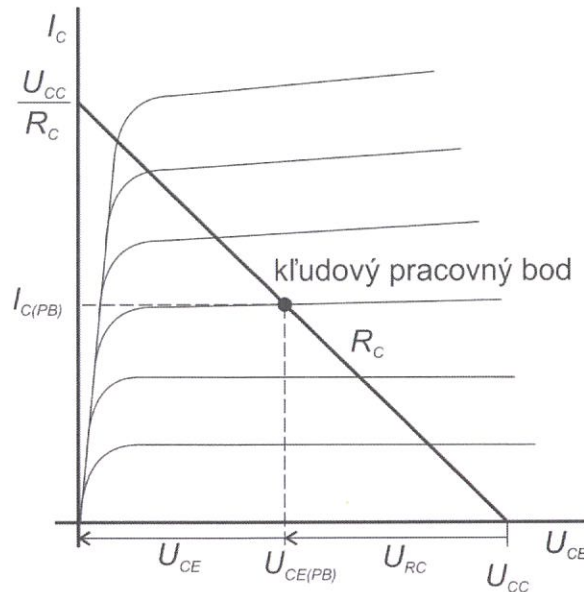


Obr. 5.23 Zosilňovací stupeň v zapojení so spoločným emitorom

Na Obr. 5.24 môžeme vidieť nastavenie kludového pracovného bodu pomocou kolektorového odporu R_C , ktorý je charakterizovaný odporovou priamkou vo výstupných charakteristikách (sklon charakteristiky je určený hodnotou R_C). Je vidieť, že priamka prechádza bodmi U_{CC}

a $I_{C\ max} = U_{CC}/R_C$. Veľkosť odporu R_C je možné pri znalosti napájacieho napätia U_{CC} určiť zo vzťahu:

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE(PB)}}{I_{C(PB)}} \quad (5.7)$$



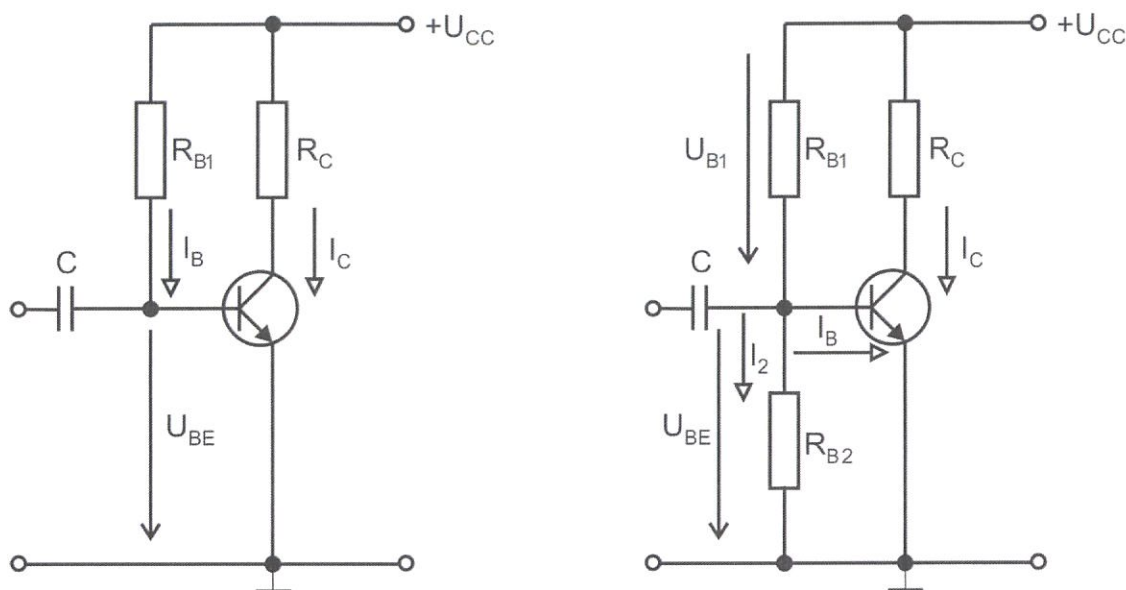
Obr. 5.24 Nastavenie kľudového pracovného bodu pomocou kolektorového odporu R_C

Kľudový pracovný bod sa obvykle volí tak, aby ležal približne v strede rozsahu určenom odporovou priamkou R_C (teda hodnota kľudového napätie kolektor emitor by mala byť rovná polovici napájacieho napätia). Takouto voľbou zamedzíme skresleniu signálu vplyvom zakrivenia charakteristík na jednej alebo druhej strane (t.j. na strane malých napätí kolektor-emitor resp. na strane malých kolektorových prúdov).

Pre správnu funkciu tranzistora pri zosilňovaní je potrebné polarizovať PN priedoch báza-emitor priepustne, čo znamená, že musí na ňom byť napätie väčšie ako prahové napätie diódy báza-emitor, ktoré sa líši podľa materiálu (kremík okolo 0,6-0,7V). Najjednoduchší spôsob polarizácie je pomocou rezistora. Na Obr.5.25 vľavo označený R_{B1} a pri pretekaní prúdu sa na ňom vytvorí úbytok napätia U_{B1} ($U_{B1} = R_{B1}.I_B$). Pre veľkosť rezistora R_{B1} potom platí:

$$R_{B1} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_B} \quad (5.8)$$

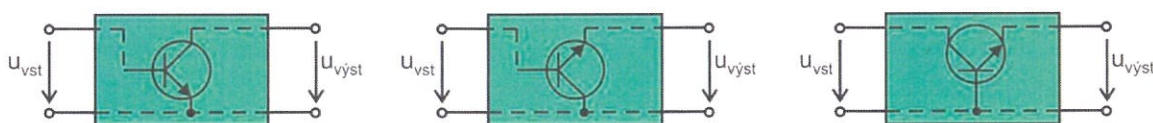
Keďže hodnoty bázoového prúdu sú štandardne veľmi malé, je hodnota odporu R_{B1} relatívne veľká čo je výhodné z hľadiska minimalizácie zaťažovania zdroja a zlepšenia stability napätia báza-emitor. Na druhú stranu je potrebné pri inom tranzistore (vplyvom rozptylu parametrov) potrebné znovu nastavovať bázoový prúd. Odstránenie tohto nedostatku je možné dosiahnuť zapojením na Obr. 5.25 vpravo pomocou odporového deliča s odporami R_{B1} a R_{B2} . Prúd pretekajúci rezistorom R_{B2} by kvôli správnej funkcii zapojenia mal byť 2-10 krát väčší ako bázoový prúd I_B . Napätie do bázy je potom určené iba hodnotami R_{B1} a R_{B2} a nie je potrebné znovu nastavovať I_B ak sa zmení napájacie napätie alebo tranzistor.



Obr. 5.25 Nastavenie bázového napätia pomocou rezistora R_{B1} (vľavo) a pomocou napätového deliča (vpravo)

5.3.5 Základné zapojenia tranzistorov

Vzhľadom k tomu, že tranzistor má len tri svorky a používa sa ako dvojbrána, ktorá má štyri svorky, musí byť vždy jedna svorka tranzistora spoločná aj pre vstup aj pre výstup. Z tohto dôvodu dostávame tri základné zapojenia, podľa toho, ktorá svorka je spoločná pre vstup aj pre výstup (Obr. 5.26). Každé z týchto zapojení má svoje špecifické vlastnosti vyplývajúce z podstaty funkcie tranzistora, pričom klasickým zapojením pre väčšinu zosilňovačov je zapojenie SE (so spoločným emitorom).



Obr. 5.26 Základné zapojenia tranzistorov – so spoločným emitorom (SE – vľavo), so spoločným kolektorom (SC – v strede), so spoločnou bázou (SB – vpravo)

Pri charakterizovaní vlastností jednotlivých zapojení sa používajú nasledujúce charakteristické parametre:

- vstupný odpor pre striedavý signál, r_{vst}
- výstupný odpor pre striedavý signál, r_{vyst}
- napätové zosilnenie, A_u
- prúdové zosilnenie, A_i
- výkonové zosilnenie, A_p
- fázový posun medzi vstupným a výstupným signálom, φ
- medzné frekvencie zapojenia, f_D a f_H

Zapojenie so spoločným emitorom – zapojenie SE má veľké napätové (rádovo $A_u = 100 \dots 1000$) a veľké prúdové (rádovo $A_i = 20 \dots 500$) zosilnenie, čomu zodpovedá aj veľké

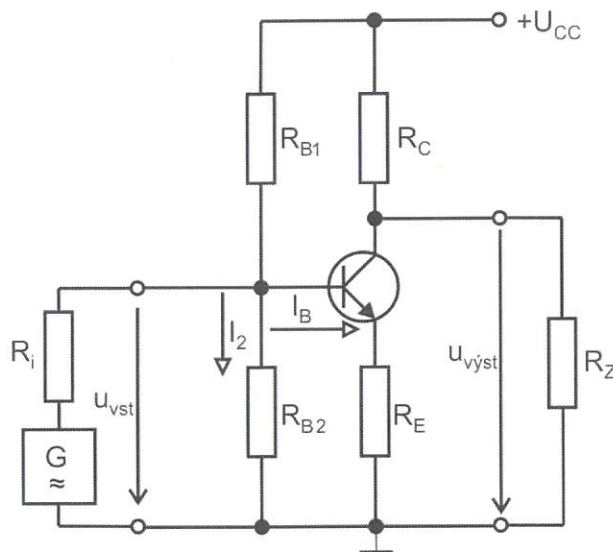
výkonové zosilnenie, ktoré je v rozsahu $A_p = 2000...50000$. Z tohto dôvodu sa zapojenie SE používa ako štandardné zapojenie v nízko- a vysokofrekvenčných zosilňovačoch. Pri zapojení SE dochádza tiež k posunutiu fáze výstupného signálu voči vstupnému o 180° . Vstupný odpor zapojenia je rádovo $r_{vst} = 0,4...5 \text{ k}\Omega$ a výstupný odpor je rádovo $r_{výst} = 1...100 \text{ k}\Omega$.

Zapojenie so spoločným kolektorom – zapojenie SC má veľký vstupný a malý výstupný odpor, čo znamená, že je vhodné ako prvý stupeň viacstupňových zosilňovačov pretože minimálne zaťažuje zdroj. Používa sa tiež často pre impedančné prispôbenie v nízkofrekvenčných zosilňovačoch. Zapojenie SC nespôsobuje fázový posun, preto platí $\varphi = 0^\circ$. Napät'ové zosilnenie je rovné resp. menšie ako jedna a prúdové zosilnenie je rádovo $A_i = 20...500$, čomu zodpovedá výkonové zosilnenie v rozsahu $A_p = 20...500$. Vstupný odpor zapojenia je rádovo $r_{vst} = 200...500 \text{ k}\Omega$ a výstupný odpor je rádovo $r_{výst} = 100...500 \text{ k}\Omega$.

Zapojenie so spoločnou bázou – zapojenie SB sa používa takmer výhradne vo vysokofrekvenčnej technike vzhľadom k vysokej hornej medznej frekvencii (nad 100 MHz). Napät'ové zosilnenie je v rozsahu $A_u = 100...1000$ a prúdové zosilnenie je rovné resp. menšie ako jedna, čomu zodpovedá výkonové zosilnenie rádovo $A_p = 100...1000$. Vstupný a výstupný signál sú vo fáze, teda $\varphi = 0^\circ$. Vstupný aj výstupný odpor sú v rozsahu rádovo $r = 50...200 \text{ k}\Omega$.

5.3.6 Zosilňovače

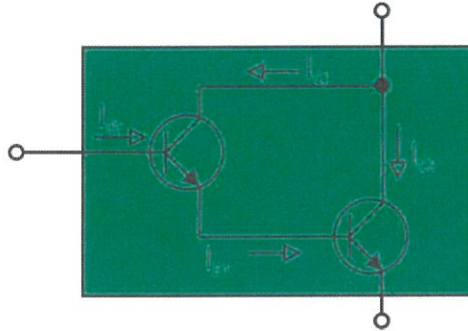
Na Obr. 5.27 je znázornené zapojenie jednosmerného zosilňovača. Aby bolo možné prenášať aj pomalé zmeny jednosmerného napätia, nie sú v schéme žiadne frekvenčné závislé prvky (napr. kondenzátory). V súlade s vyššie uvedeným spôsobom získavania napätia na báze, je v schéme prítomný odporový delič $R_{B1} - R_{B2}$. Úlohou rezistora v emitore je teplotná stabilizácia zosilňovača.



Obr. 5.27 Zapojenie jednosmerného zosilňovača

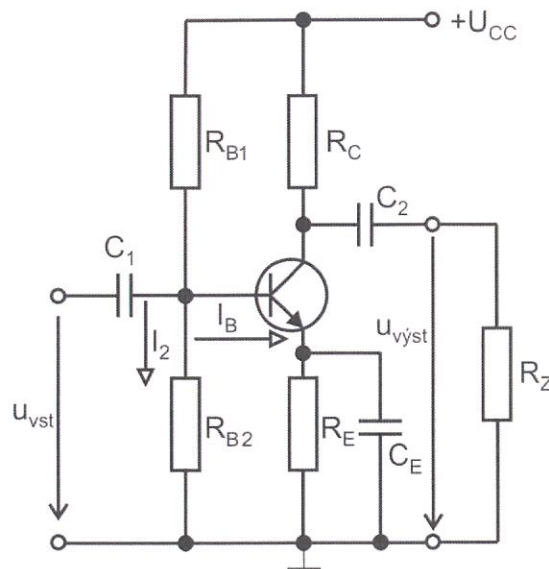
Jednosmerné zosilňovače majú nižšie napät'ové zosilnenie ako striedavé zosilňovače toho istého zapojenia. Pre zlepšenie vlastností jednosmerných zosilňovačov sa používa tzv. Darlingtonove zapojenie tranzistorov (Obr. 5.28). V tomto zapojení sú spojené dva alebo viac tranzistorov tak, že ich kolektory sú spoločné, zatiaľ čo emitor predchádzajúceho tranzistora je pripojený k báze nasledujúceho tranzistora. Výsledné zapojenie má opäť trojicu svoriek,

podobne ako jeden tranzistor. Hlavnou výhodou zapojenia je veľké prúdové zosilnenie dané súčynom zosilnení jednotlivých tranzistorov. Z tohto dôvodu sa využívajú predovšetkým vo výkonových zosilňovačoch a zosilňovačoch malých signálov.



Obr. 5.28 Darlingtonove zapojenie tranzistorov

Zosilňovače striedavého signálu je možné rozdeliť na širokopásmové a selektívne. Širokopásmové zosilňovače majú veľkú šírku pásma čo znamená, že prenášajú signál v širokom rozsahu frekvencií. Nízkofrekvenčné zosilňovače sú určené pre zosilňovanie signálov v rozsahu 20 Hz až 20 kHz. Zapojenie takéhoto zosilňovača je uvedené na Obr. 5.29. Uvedený zosilňovač je v zapojení so spoločným emitorom, pričom jeho pracovný bod je nastavený pomocou príslušných rezistorov. Väzbový kondenzátor C_1 slúži k jednosmernému oddeleniu napätia báze od generátora, pričom kondenzátor C_2 zabráňuje prístupu jednosmerného kolektorového napätia k zaťažovaciemu odporu R_Z .



Obr. 5.29 Širokopásmový nízkofrekvenčný zosilňovač

Vstupný obvod predstavuje pre signál hornofrekvenčný priepust, pričom dolnú medznú frekvenciu hornofrekvenčného priepustu môžeme všeobecne vypočítať podľa vzťahu:

$$f_D = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.9)$$

Keďže vstupný odpor zosilňovača predstavuje paralelné zapojenie rezistorov R_{B1} , R_{B2} a r_{BE} , môžeme f_D vypočítať nasledujúcim spôsobom:

$$f_D = \frac{1}{2\pi r_{vst} C}$$

kde $r_{vst} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{BE}$.

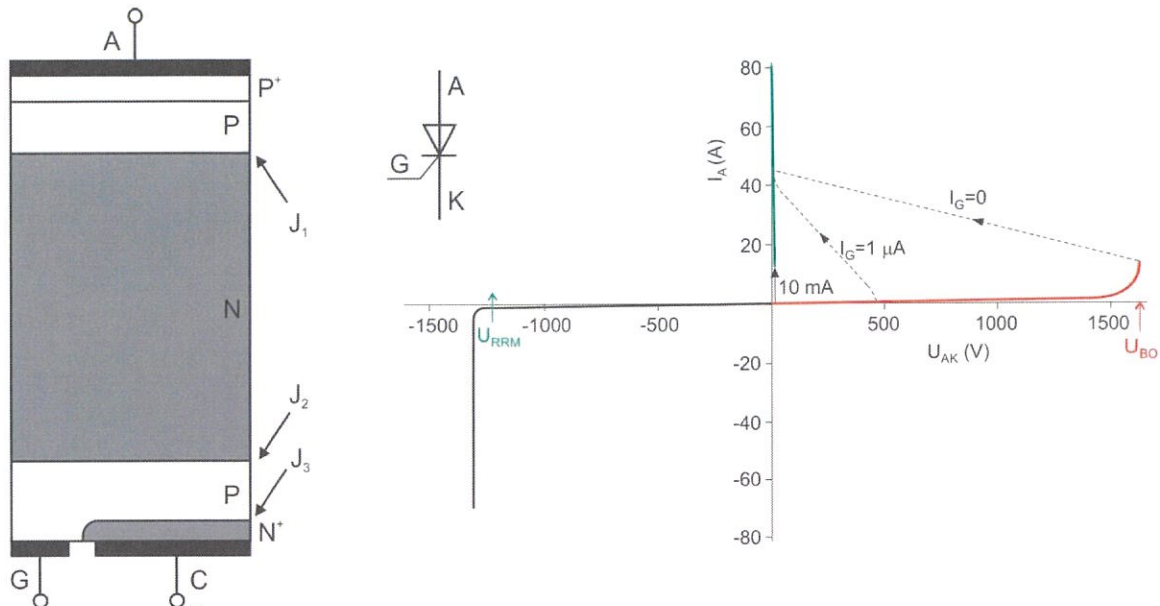
5.4 Tyristory

Tyristor sú polovodičové spínacie súčiastky, ktoré je možné spínať a vypínať pomocou prúdového impulzu privedeného do riadiacej elektródy, pričom po odznení tohto impulzu ostáva tyristor v danom spínacom stave (vypnutý alebo zopnutý). Z hľadiska jeho princípu činnosti je možné označiť tyristor za súčiastku s *bistabilnými regeneratívnymi spínacími charakteristikami*. Funkcia bipolárnych tranzistorov sa od tyristorov líši v tom, že pre ich udržanie zopnutého stavu je nutný trvalý prúd privádzaný do báze tranzistora. Preto je možné pomocou tyristorov spínať veľké výkony pri jednoduchom riadiacom obvode s malým príkonom.

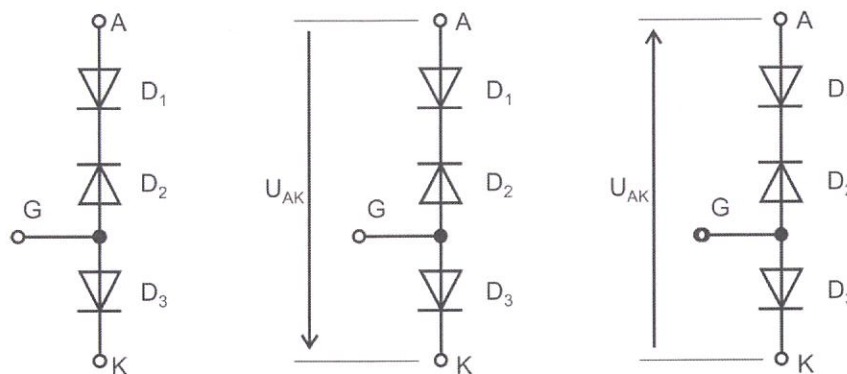
Na Obr. 5.30 vľavo je znázornená štruktúra tyristoru spolu s jeho schematickou značkou. Z obrázka je možné vidieť, že tyristor je súčiastka so štyrmi vrstvami vytvárajúcimi tri PN priedehy označené J_1 , J_2 a J_3 . Vývody tyristora sa nazývajú **katóda (K)**, **anóda (A)** a **hradlo (G)**. Uvedené priedehy môžeme reprezentovať v náhradnej schéme aj pomocou diód označených D_1 , D_2 a D_3 (Obr. 5.31).

Z Obr. 5.31 si môžeme všimnúť, že riadiaca elektróda (hradlo) je pripojená na anódy proti sebe pripojených diód D_2 a D_3 . Ak privedieme na tyristor napätie U_{AK} s polarizáciou vyznačenou na Obr. 5.31 v strede (napätie na anóde je kladné voči katóde), budú diódy D_1 a D_3 polarizované v priepustnom smere a dióda D_2 bude polarizovaná v závernom smere. Pokiaľ bude mať napätie U_{AK} opačnú polaritu (Obr. 5.31 vpravo), budú diódy D_1 a D_3 polarizované záverne a dióda D_2 priepustne.

Za predpokladu, že riadiaca elektróda nie je pripojená ($I_G = 0$), je pri ľubovoľnej polarite napätia U_{AK} vždy aspoň jedna dióda polarizovaná záverne a tyristorom nepreteká prakticky žiaden prúd. Túto skutočnosť si môžeme všimnúť na V-A charakteristike tyristora na Obr. 5.30 vpravo. V oboch smeroch osi x máme do určitých hodnôt napätí závernú oblasť kedy je $I_A \approx 0$. Ak budeme zvyšovať napätie v priamom smere (polarita U_{AK} ako na Obr. 5.31 v strede), dôjde pri určitej hodnote napätia (napätie U_{BO} vyznačené červenou šípkou) k prerazu diódy D_2 a k pretekaniu prúdu tyristorom. Aby nedošlo k zničeniu tyristora, je potrebné zabezpečiť obmedzenie veľkosti tohto prúdu.



Obr. 5.30 Štruktúra tyristora a jeho schematická značka (vľavo) a V-A charakteristika (vpravo)



Obr. 5.31 Náhradná schéma tyristora pomocou troch diód (vľavo) a jeho polarizácia v priamom smere (v strede) a spätnom smere (vpravo)

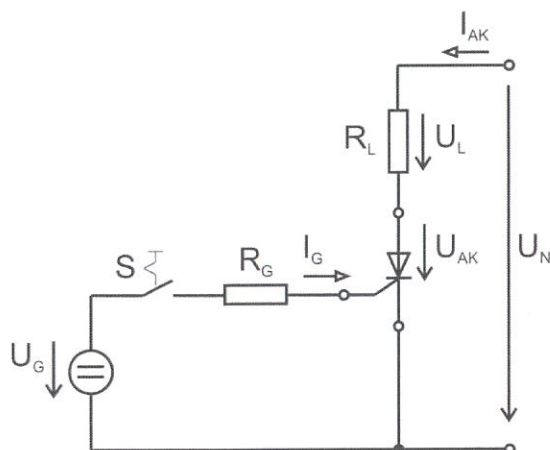
V závernom smere je správanie tyristora podobné ako diódy. Pri závernom napätí menšom ako U_{RRM} (vyznačené zelenou šípkou na V-A charakteristike) preteká tyristorom veľmi malý prúd.

Chovanie tyristora pri spínaní prekročením hodnoty napätia U_{BO} závisí na mnohých, ťažko ovplyvniteľných faktoroch. Keďže chceme tyristor v praktických aplikáciách riadiť presne a jednoznačne, tento spôsob sa pre spínanie prakticky nepoužíva. Keď je tyristor zopnutý, má úbytok napätia približne 1,5-2 V. Aby bola zabezpečený dostatočný odstup od medznej hodnoty U_{BO} , stanovuje sa pre napätie medzi anódou a katódou tyristora maximum v podobe dvoch tretín z napätia U_{BO} ($U_{AKmax} = 0,66U_{BO}$).

Spínanie tyristora

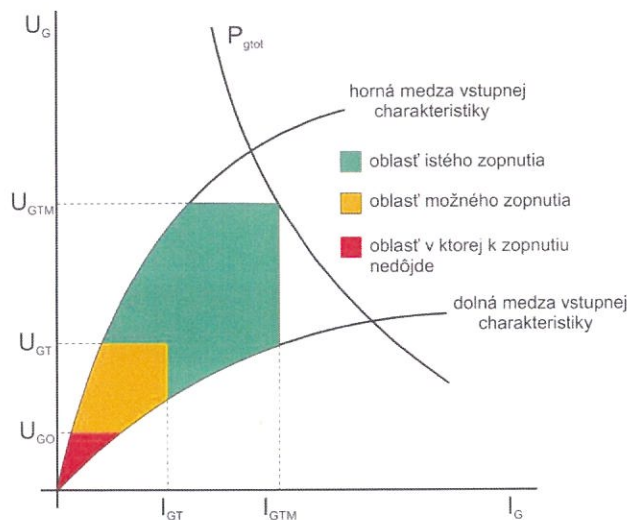
Tyristory sa spínajú privedením prúdu I_G do riadiacej elektródy. Ak je riadiaca elektróda vyvedená v oblasti katódy musí na nej byť pri spínaní kladné napätie. Ak podľa Obr. 5.32 nebude spínač zopnutý, bude tyristor v nevodivom stave. Zopnutím spínača začne do riadiacej elektródy tiecť prúd vplyvom čoho dôjde k presunu nosičov náboja do oblasti P (Obr. 5.30

vľavo). Vplyvom toho dôjde k zníženiu prirazného napätia priechodu J_2 (blokované napätie U_{BO}) pričom veľkosť tohto zníženia je závislá na veľkosti prúdu I_G . Po znížení veľkosti prirazného napätia priechodu J_2 dôjde k riadenému prirazu a tyristor začne viesť.



Obr. 5.32 Principiálna schéma obvodu pre riadenie tyristora

Na Obr. 5.33 sú uvedené spínacie charakteristiky tyristora. Charakteristiky sú zakreslené len v prvom kvadrante z toho dôvodu, že pre zopnutie musí byť tyristor polarizovaný v priamom smere. Ak má napätie na riadiacej elektróde U_G hodnotu nižšiu ako je hodnota U_{GO} , ostáva tyristor zatvorený pretože pre jeho zopnutie neprešiel do oblasti P dostatočný počet nosičov náboja. Táto oblasť je na Obr. 5.33 vyznačená červenou farbou. Ďalšou oblasť je oblasť možného zopnutia naznačená žltou farbou. V tejto oblasti sa nachádzame pokiaľ má napätie na riadiacej elektróde hodnotu menšiu ako je U_{GT} – prechod do vodivého stavu v tejto oblasti je možné ale nie isté a závisí na parametroch jednotlivých vyrobených exemplároch resp. veľkosti napätia U_{AK} a teploty priechodu J_2 . Zelenou farbou je vyznačená oblasť, ktorú môžeme považovať za oblasť bezpečného zopnutia. Elektrické veličiny sú v tomto prípade obmedzené hodnotami U_{GTM} a I_{GTM} ako aj maximálnym prípustným stratovým výkonom riadiacej elektródy P_{gtot} . Horná a dolná medza vstupnej charakteristiky vyznačujú možných rozptyl parametrov vyrobených tyristorov jedného radu. Veľkosť napätia a prúdu potrebných pre zopnutie tyristora závisí aj od teploty priechodu J_2 a to nepriamo úmerne – t.j. čím vyššia teplota tým nižšie hodnoty napätia a prúdu.



Obr. 5.33 Spínacie charakteristiky tyristora

Vypínanie tyristora

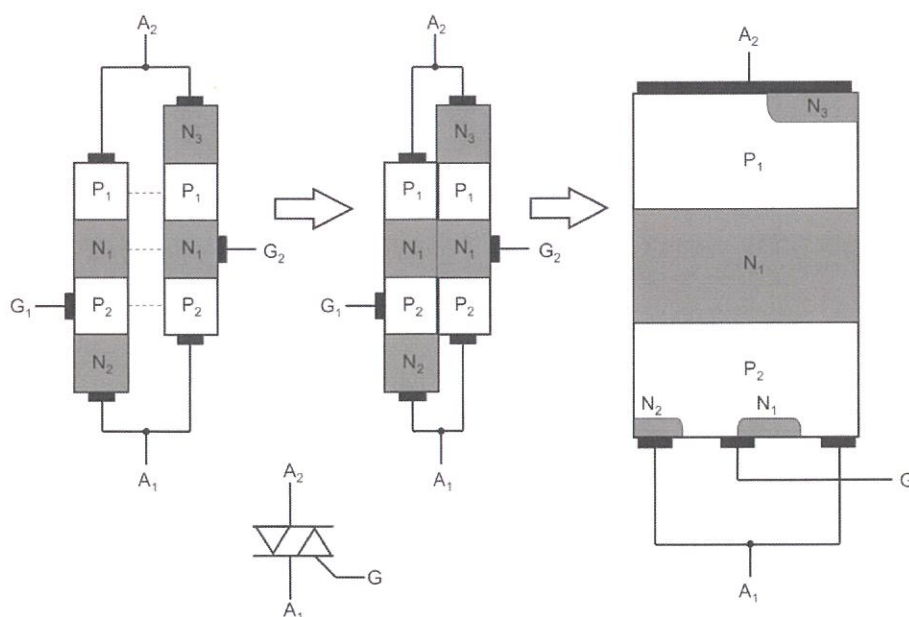
Po privedení tyristora do vodivého stavu ním prechádza medzi anódou a katódou veľké množstvo nosičov náboja čo znamená veľkú hodnotu prúdu I_A , ktorý sa trvale udržuje. V tomto stave už nie je možné tyristor vypnúť prostredníctvom riadiacej elektródy. Aby sme tyristor vypli, musíme znížiť hodnotu prúdu I_A pod tzv. *pridržnú hodnotu prúdu* I_H . Hodnota I_H sa pohybuje v rozsahu od jednotiek do asi 100 mA.

Ak sa tyristor používa v striedavých obvodoch ako riadený usmerňovač, dochádza k jeho vypínaniu periodicky pretože pri prechode nulou klesá prúd I_A pod hodnotu I_H . Ak je však tyristor použitý v jednosmernom obvode je nutné zabezpečiť jeho vypnutie iným spôsobom. Môžeme to doceliť odpojením tyristora od napätia alebo paralelným skratovacím spínačom. K najčastejším spôsobom patrí privedenie prúdového impulzu na anódu čím tyristor dostaneme na chvíľu do spätného smeru a zabezpečíme jeho vypnutie.

Pre zabezpečenie jednoduchého vypínania tyristorov bol vyvinutý typ označovaný ako *GTO* (gate turn-off). Fungujú v podstate ako klasické tyristory s tým rozdielom, že je možné ich vypnúť privedením opačného prúdu do riadiacej elektródy. Tieto tyristory sa od klasických potom líšia predovšetkým v hodnotách medzných a prevádzkových parametrov vyplývajúcich z rozdielov v konštrukcii a zabezpečení vypínania.

5.5 Triaky

Triak je elektronická súčiastka, ktorú môžeme považovať za antiparalelné zapojenie dvoch tyristorov. Ich názov je odvodený z anglického termínu „*triode alternating current switch*“. Na Obr. 5.34 je uvedená vývoj štruktúry triaku ako dvoch oddelených tyristorov a neskôr súčiastku realizovanú na jednom kryštáli polovodiča a jeho schematická značka.



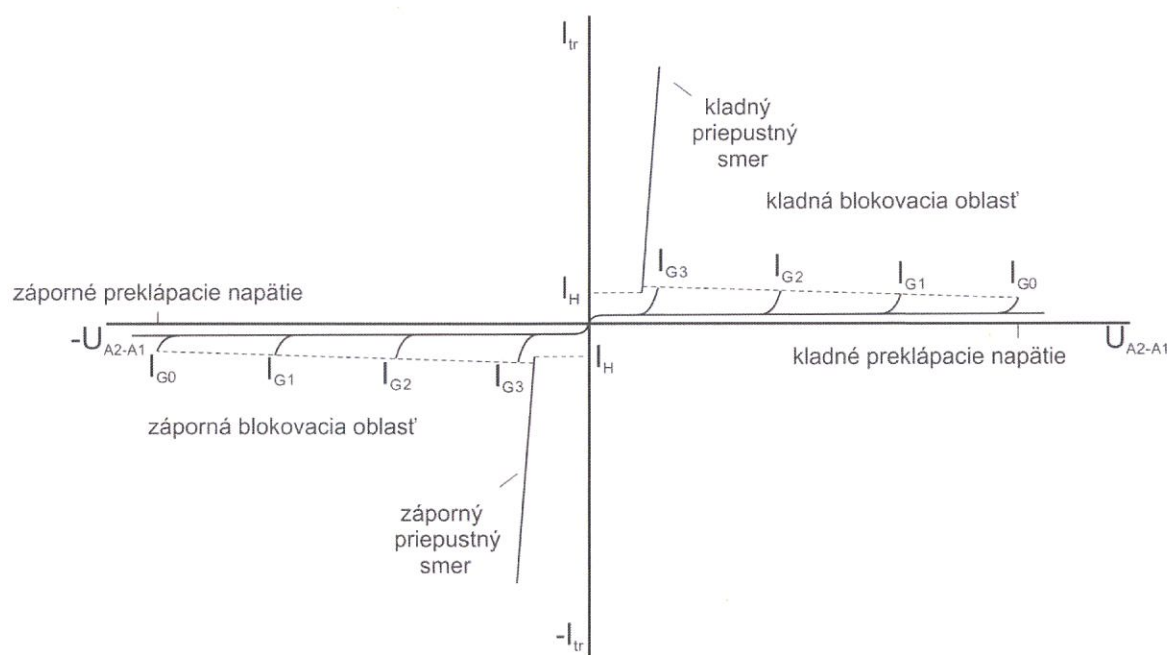
Obr. 5.34 Vývoj triaku ako antiparalelného zapojenia dvoch tyristorov (hore vľavo, v strede a vpravo) a jeho schematická značka (dole)

Ak uvažujeme zapojenie podľa Obr. 5.34 V strede bude pri zopnutom triaku (cez riadiacu elektródu G_1) a kladnom napätí anódy A_2 voči anóde A_1 pretekať prúd cez oblasti $P_1 - N_1 - P_2 - N_2$ z A_2 do A_1 . Ak bude naopak napätie na A_1 kladné voči napätiu na A_2 a triak bude zopnutý

(cez riadiacu elektródu G_2), bude prúd pretekať cez oblasti $P_2 - N_1 - P_1 - N_3$ z A_1 do A_2 . Ako si môžeme všimnúť na schematickej značke na Obr. 5.34, triak má iba jednu riadiacu elektródu – tá musí byť teda spoločná pre oblasť P_2 aj N_1 .

Na Obr. 5.35 Je uvedená voltampérová charakteristika triaku. Ako je možné vidieť, triak má symetrickú V-A charakteristiku, ktorá sa nachádza v I. a III. kvadrante čo súvisí s usporiadaním jednotlivých vrstiev. Z V-A charakteristiky triaku tiež vyplýva, že môžeme rozlíšiť *kladnú* a *zápornú blokovaciu oblasť* a *kladný* a *záporný priepustný smer* (v ktorom je triak zopnutý a vedie elektrický prúd).

Spínať triak je možné *štyrmi* spôsobmi, ktoré sa rozdeľujú podľa kvadrantov súradnicového systému s osami na ktorej je prúd riadiacej elektródy I_G a napätie na anódach A_2 a A_1 . V prvom kvadrante je napätie na anóde A_2 kladnejšie ako na A_1 . Triak môžeme uviesť do vodivého stavu privedením kladného napätia na riadiacu elektródu $+U_{GA1}$. Do riadiacej elektródy potom bude tiecť kladný prúd $+I_G$. V II. kvadrante je napätie na A_2 záporné voči A_1 a triak je možné zopnúť kladným napätím privedeným na riadiacu elektródu $+U_{GA1}$. Prúd I_G bude mať potom kladné znamienko. V III. kvadrante je opäť napätie na anóde A_2 záporné voči A_1 a triak je možné zopnúť privedením záporného napätia na riadiacu elektródu ($-U_{GA1}$). Z riadiacej elektródy potom bude vytekať prúd $-I_G$. V IV. kvadrante je napätie na anóde A_2 kladnejšie ako na A_1 a triak je možné zopnúť záporným napätím na riadiacej elektróde $-U_{GA1}$. Znamienko prúdu I_G potom bude záporné.



Obr. 5.35 Voltampérová charakteristika triaku

V Tab. 5.2 Sú prehľadne uvedené vyššie popísané spôsoby riadenia triaku pričom vzťahnou elektródou je A_1 .

Tab.5.2 Spôsoby riadenia triaku

Kvadrant	Anóda A_2	Riadiaca elektróda	Spôsob riadenia
I.	+	+	I^+
II.	-	+	III^+
III.	-	-	III^-
IV.	+	-	I^-

5.5.1 Charakteristické parametre tyristorov a triakov

Vzhľadom k tomu, že triaky sú vlastne špeciálnym zapojením tyristorov, sú ich charakteristické hodnoty prakticky rovnaké. Medzi *charakteristické hodnoty* tyristorov a triakov patria:

Prídržný prúd I_H – najmenšia hodnota prúdu v priepustnom smere. Ak hodnota prúdu v priepustnom smere klesne pod túto hodnotu, tyristor (triak) prejde do uzavretého stavu.

Zapaľovací (spúšťací) prúd I_{GT} – predstavuje hodnotu prúdu riadiacej elektródy, ktorá je potrebná pre jeho uvedenie do vodivého stavu.

Prúdy v zatvorenom stave I_{AK} a I_R – ide o kladný prúd v oblasti zablokovania v priamom smere a záporný prúd v oblasti spätného smeru, s tým že ich veľkosti sú porovnateľné.

Napätie v priepustnom smere U_{AK} – úbytok napätia medzi svorkami A a K pri prechode prúdu v zopnutom stave.

Zapaľovacie (spínacie) napätie U_{GT} – napätie medzi riadiacou elektródou a katódou ak do riadiacej elektródy priteká spúšťací prúd I_{GT}

Medzi *medzné hodnoty* tyristorov a triakov patria:

Periodické vrcholové napätie v závernom smere U_{DRM} a U_{RRM} – ide o najvyššie prípustné hodnoty periodického napätia v závernom smere s kladným znamienkom U_{DRM} a záporným znamienkom U_{RRM} .

Najvyššie prípustné nárazové vrcholové napätie U_{RSM} a U_{DSM} – najvyššia prípustná okamžitá hodnota neperiodického napätia v závernom smere s kladným znamienkom U_{DSM} a záporným znamienkom U_{RSM} .

Trvalý medzný prúd I_{TAV} – aritmetická stredná hodnota najvyššie trvale prípustného prúdu v priepustnom smere pri uhle otvorenia $\Theta = 180^\circ$.

Najvyšší periodický vrcholový prúd I_{TRM} – najvyššia prípustná hodnota prúdu v priepustnom smere s uvažovaním krátkodobých prúdových špičiek pripočítaných k menovitej hodnote pracovného prúdu.

Najvyšší prípustný prúd v priepustnom smere I_{TRMS} – najvyššia prípustná efektívna hodnota prúdu v priepustnom smere behom jednej celej periódy.



Zhrnutie

1. Základom elektronických súčiastok sú polovodičové materiály, ktorých vodivosť sa nachádza medzi vodivosťou izolantov a vodičov. Najbežnejším typom polovodičovového materiálu je kremík, ktorý má vo valenčnej vrstve 4 elektróny. V čistom kremíku sú atómy viazané kovalentnými väzbami, a preto má veľmi nízku vodivosť. Pri dodaní tepelnej energie sa môže elektrón z takej väzby uvoľniť a stáva sa voľným. Po ňom ostáva prázdne miesto, diera, ktoré môže zaujať iný elektrón – proces

sa nazýva generácia páru elektrón-diera. Po strete elektrónu a diery dochádza k zániku tohto páru čo nazývame rekombinácia.

2. Významná je nevlastná vodivosť polovodičov vytváraná prímiesami iných materiálov. Použitím materiálov z piatej (tretej) skupiny prvkov periodickej tabuľky môžeme vytvárať polovodiče typu P (typu N) s nadbytkom voľných elektrónov (dier). Väčšinové nosiče náboja sa nazývajú majoritné, menšinové minoritné.
3. Na spojení dvoch polovodičov rôznej vodivosti dochádza k vytvoreniu PN priechodu, pričom tento priechod musí byť plynulý čo si vyžaduje špeciálne výrobné postupy. Na rozhraní tohto spojenia dochádza k samovoľnému prieniku majoritných nosičov náboja do oblasti, kde sú minoritnými (elektrónov do N a diery do P). Nazývame to difúzia. Po rekombinácii v týchto oblastiach sa vytvorí vrstva s malým množstvom nosičov náboja, nazývaná hradlová vrstva a dôjde k vytvoreniu rovnováhy.
4. Pripojením PN priechodu k zdroju napätia môžeme dosiahnuť ventilový účinok, čo znamená, že pri jednej polarite bude PN priechodom pretekať prúd, pri opačnej nie. Tieto smery nazývame priepustný a záverný a táto funkcia sa využíva v súčiastke nazývanej dióda. Hodnota difúzneho napätia, ktoré musíme prekročiť aby diódou tiekol prúd je okolo 0,7V pre kremíkovú diódu.
5. Tranzistory sú elektronické súčiastky, ktoré umožňujú zosilňovanie prúdu resp. napätia (výkonu) a môžu fungovať aj ako spínače. Delia sa na bipolárne, unipolárne a kombinované, pričom bipolárne využívajú pre svoju funkciu oba typy voľných nosičov náboja. Pozostávajú z troch vrstiev (NPN alebo PNP), pričom elektródy z nich vyvedené nazývame emitor, báza a kolektor. Pracujú v 4 režimoch (nevodivom, vodivom normálnom, vodivom inverznom a nasýtenom) a umožňujú riadiť pomocou malého vstupného (bázového) prúdu riadiť veľký výstupný (kolektorový).
6. Tyristory sú spínacie polovodičové súčiastky, ktoré umožňujú zopnutie alebo vypnutie pomocou prúdového impulzu privedeného na riadiacu elektródu. Ich výhodou (a hlavným rozdielom) voči bipolárnym tranzistorom je absencia nutnosti permanentnej prítomnosti prúdu na riadiacej elektróde, čo znamená možnosť spínania veľkých výkonov s jednoduchým riadiacim obvodom s veľmi malým príkonom. Elektródy tyristorov sa nazývajú anóda, katóda a hradlo a sú tvorené tromi PN priechodmi (môžeme vnímať ako zapojenie troch diód).
7. Triaky predstavujú antiparalelné zapojenie dvoch tyristorov a ich rozdielom voči tyristorom je možnosť riadenia prúdu v oboch smeroch (ich V-A charakteristika je symetrická v I. a III. kvadrante). Okrem toho je možné na riadiacu elektródu priviesť impulz aj kladnej aj zápornej polarite, čím získavame možnosť zopnúť triak celkovo štyroma spôsobmi. Sú preto veľmi vhodné pre rôzne druhy striedavých obvodov.

Literatúra a zdroje

- [1] Čičmanec, P.: Všeobecná fyzika 2 – Elektrina a magnetizmus. Bratislava : Alfa, 1980. 568 s. ISBN 80-05-01089-3
- [2] Frohn, M. et al.: Elektronika – Polovodičové součástky a základní zapojení. Praha : BEN – Technická literatura, 2006. 479 s. ISBN 80-730-0123-3
- [3] Gates, E. D.: Introduction to Electronics. Clifton Park : Delmar, 2007. 528 s. ISBN 978-1-4018-8900-5
- [4] Hajko, V., Daniel-Szabó, J.: Základy fyziky. Bratislava, VEDA, 1980. 565 s.
- [5] Hajko, V. et al.: Fyzika v príkladoch. Bratislava, Alfa, 1988. 592 s.
- [6] Hughes, E.: Electrical and Electronic Technology. Harlow : Pearson Education Limited, 2012. 1003 s. ISBN 978-0-273-75510-4
- [7] Kúdelčík, J., Hockicko, P.: Základy fyziky. Žilina : Žilinská univerzita, 2011. 279 s. ISBN 978-80-554-0341-0
- [8] Neveselý, M: Teoretická elektrotechnika I. Žilina : VŠDS, 1992. 147 s. ISBN 978-80-7100-080-8
- [9] Neveselý, M: Teoretická elektrotechnika II. Žilina : VŠDS, 1993. 290 s. ISBN 978-80-7100-132-4
- [10] Nilsson, J. W., Riedel, S. A.: Electric Circuits. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011. 794 s. ISBN 978-0-13-611499-4
- [11] Pierret, R. F.: Semiconductor Devices Fundamentals. Reading : Addison Wesley Publishing Company, 1996. 791 s. ISBN 0-201-54393-1
- [12] Tipler, P. A., Mosca, G.: Physics for Scientists and Engineers. New York : W. H. Freeman and Company, 2004. 1512 s. ISBN 0-7167-4389-2
- [13] Wang, M.: Understandable Electric Circuits. Londýn : The Institution of Engineering and Technology, 2010. 370 s. ISBN 978-1-84919-114-2
- [14] Záhlava, V., Vobecký, J.: Elektronika – Součástky a obvody, principy a příklady. Praha : GRADA. 220 s. ISBN 80-247-1241
- [15] <http://www.techieinfocenter.com>
- [16] <http://en.wikipedia.org>
- [17] <http://usesofmagnets.wiki.hci.edu.sg>
- [18] <http://cleantechnica.com>
- [19] <http://ecee.colorado.edu>
- [20] <http://aura-comms.com>
- [21] <http://electrical4u.com>
- [22] <http://ozank.gitbooks.io>
- [23] <http://www.coilws.com>
- [24] <http://www.diytrade.com>
- [25] <http://www.femag.it>
- [26] <http://www.kirp.chtf.stuba.sk>
- [27] <http://lightmachinery.com>
- [28] <http://mindthevolt.com>