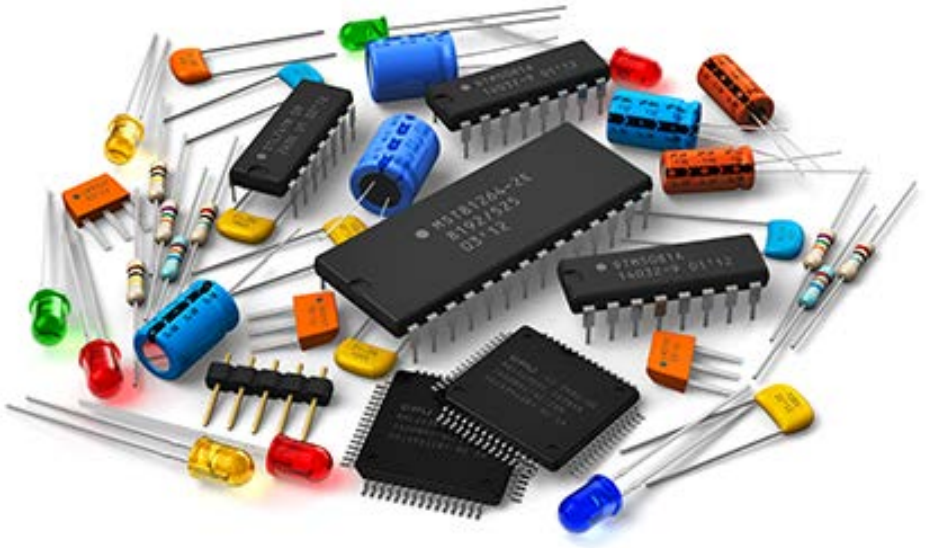
ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

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

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika
KET/FYE



Bipolární tranzistory

Přednáška 5

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

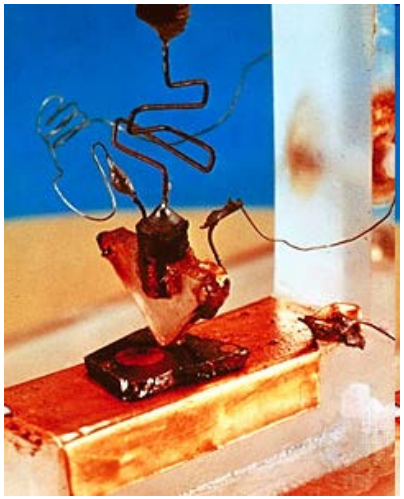
Co se v přednášce dozvíte?

- Dozvíte se, co je bipolární tranzistor a jak funguje.
- Zjistíte, jaké jsou statické vlastnosti a parametry tranzistoru.
- Dozvíte se, jaké musí být dodrženy konstrukční parametry pro správnou funkci bipolárního tranzistoru.
- Dozvíte se o Earlyho jevu u bipolárních tranzistorů.
- Zjistíte, jak se změní parametry tranzistoru s teplotou.
- Dozvíte se, co jsou H-parametry tranzistoru a jaká jsou základní zapojení bipolárních tranzistorů.
- Zjistíte, jaký je rozdíl mezi vysokofrekvenčními a výkonovými tranzistory.
- Dozvíte se, co je důležité pro tranzistorové zesilovače a spínače.

Bipolární tranzistory

- **1948 – Bellovy laboratoře** – Bardeen Barlin
- náhodný objev – hrotový tranzistor
- 1956 – Shockley – planární tranzistor, Nobelova cena
- **TRANSfer resISTOR – transformace odporu**
- **bipolární – využívá oba druhy nosiče náboje**
- základní elektronická součástka
- vytlačil elektronky (až na některé speciální aplikace)

Původní hrotový tranzistor



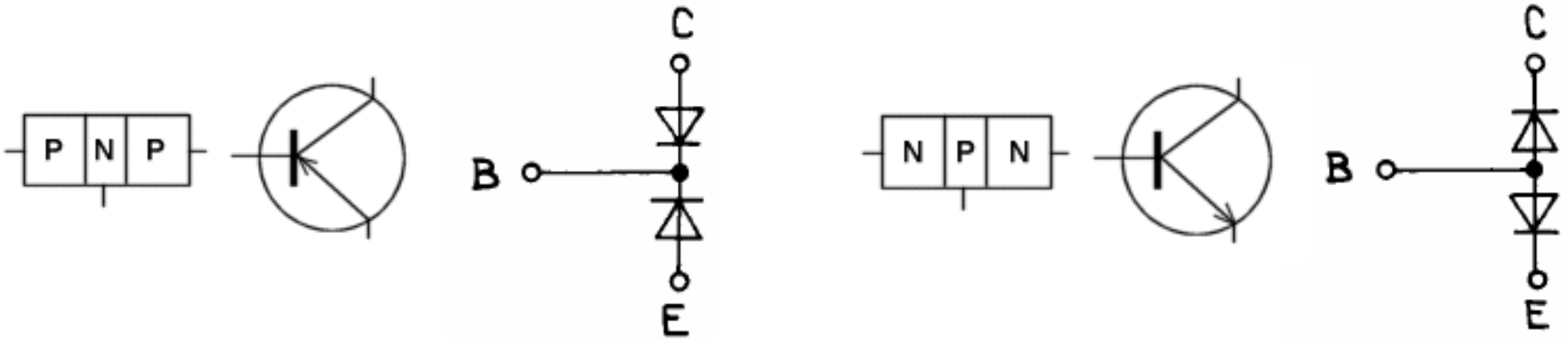


Současné provedení tranzistorů

Princip činnosti

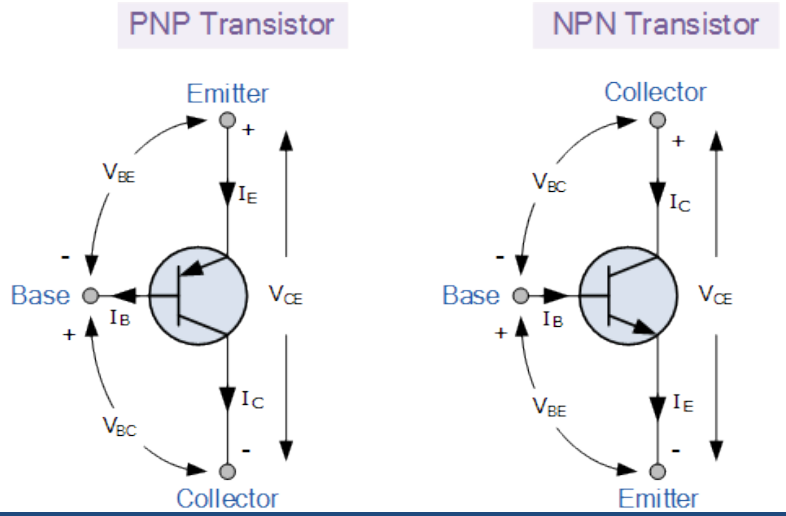
- **monokrystalická destička s vytvořenými třemi oblastmi s různým typem vodivosti**
- **verze NPN** – nositelem funkce elektrony
- **verze PNP** – nositelem funkce díry
- elektrody
  - **emitor (E)**
  - **kolektor (C)**
  - **báze (B)**

Pásový model bipolárního tranzistoru



Princip činnosti

- dva PN přechody
  - oba polarizovány závěrně – nevodivý režim
  - oba otevřeny – nasycený režim, velký proud, který nelze řídit
  - **emitor-báze otevřen, báze-kolektor uzavřen – aktivní režim**
  - emitor-báze uzavřen, báze-kolektor otevřen – inverzní režim, vede ke zničení
- **řízené vstřikování menšinových nosičů (z hlediska báze) z emitoru do báze a následná extrakce na kolektor**
- **proudový prvek** - řízen proudem do báze, výstupem je proud kolektorem

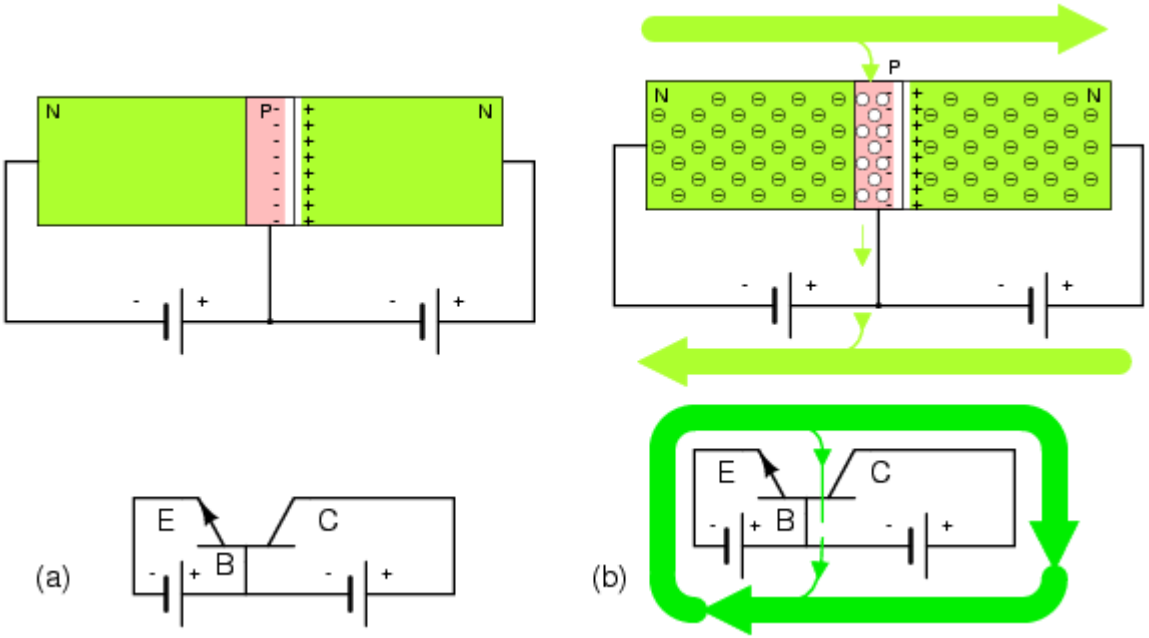


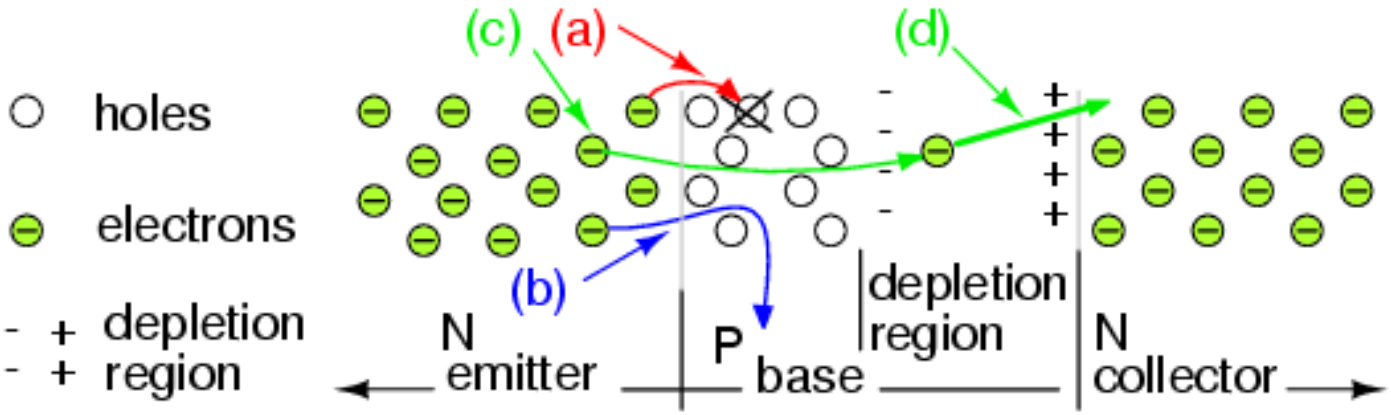
Princip činnosti - NPN

- **polarizace do aktivního režimu**
- **vstřik elektronů z emitoru do báze**
- elektrony se šíří v bázi pouze difúzí – elektrony jsou menšinové nosiče v bázi
- **rekombinace elektronů v bázi** – nežádoucí jev
- **část elektronů se dostane k přechodu báze-kolektor**
- přechod báze-kolektor uzavřen pro většinové nosiče
- **elektrony (menšinové nosiče) – přecházejí do kolektoru v podobě sytného proudu**

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=6KFFouK6-eM

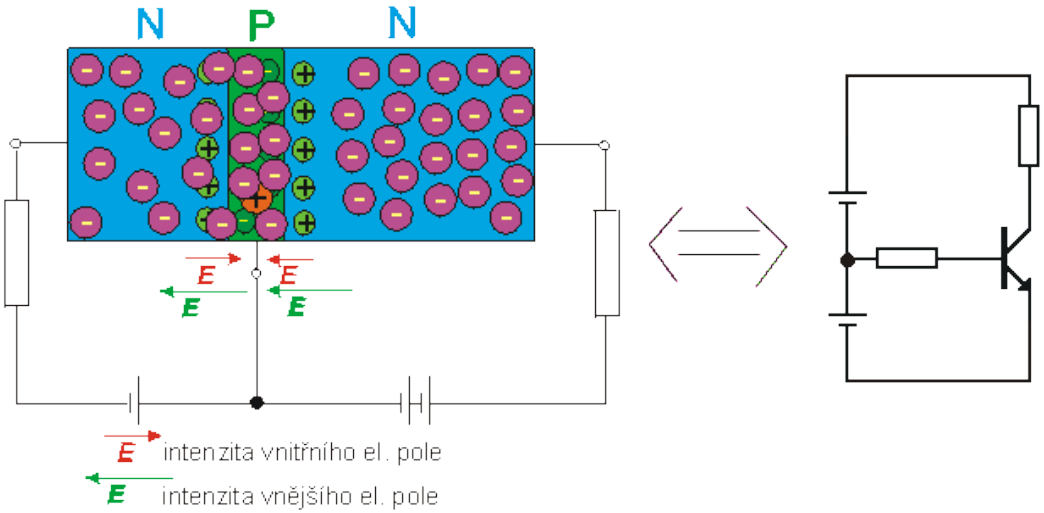
Princip činnosti - NPN

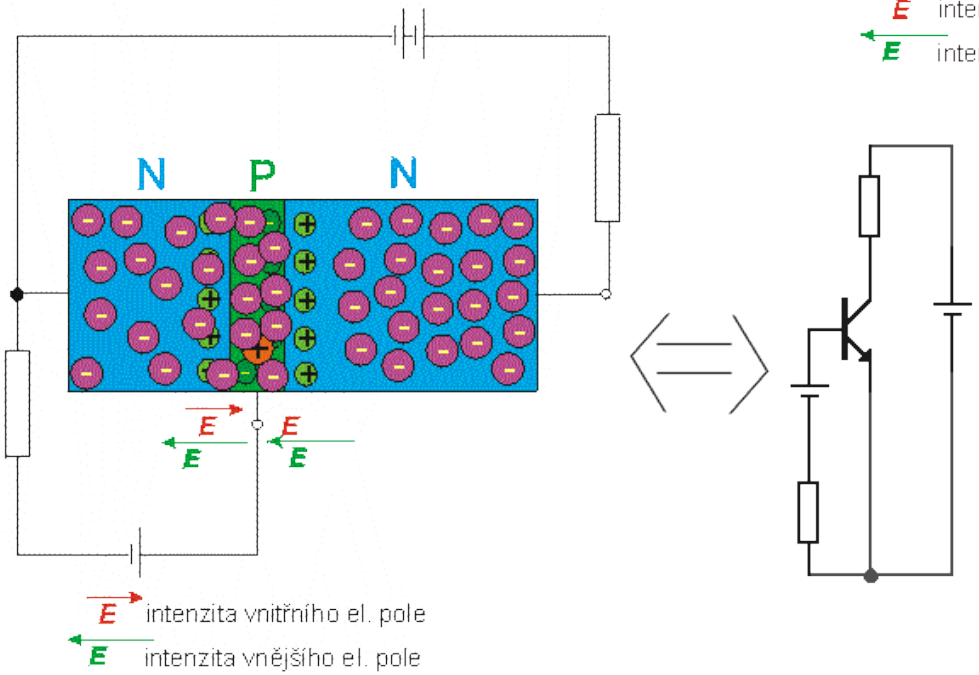




Princip činnosti - NPN

- Různé způsoby zapojení





Princip činnosti - PNP

- **polarizace do aktivního režimu**
- **vstřik děr z emitoru do báze**
- díry se šíří v bázi pouze difúzí – díry jsou menšinové nosiče v bázi
- **rekombinace děr v bázi – nežádoucí jev**
- **část děr se dostane k přechodu báze-kolektor**
- přechod báze-kolektor uzavřen pro většinové nosiče
- **díry (menšinové nosiče) – přecházejí do kolektoru v podobě sytného proudu**

Princip činnosti

- **rekombinace nosičů v bázi – silně nežádoucí jev**
- snaha o rekombinaci co nejméně nosičů – 2 podmínky
  - **tloušťka báze musí být menší než difúzní délka menšinových nosičů v bázi**
  - **nízká koncentrace nosičů v bázi**

- nesplnění podmínek – nefunkčnost tranzistoru

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{x}{L_N}} \qquad n(d_B) = n_0 e^{-\frac{d_B}{L_N}} \qquad L_N \cong \frac{1}{\sqrt{p_B}}$$

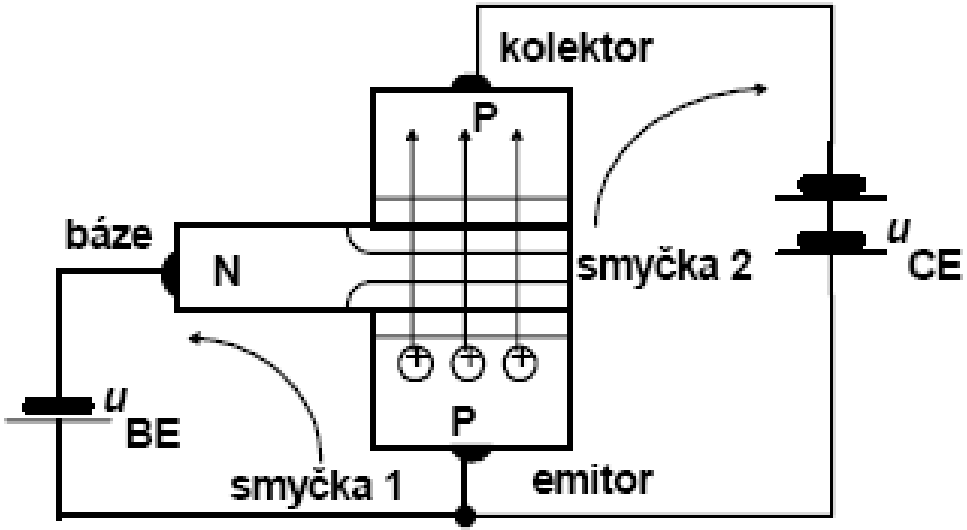
n(x) – koncentrace nosičů v bázi ve vzdálenosti x
n_0 – koncentrace nosičů na počátku
L_N – difúzní délka – „žravost“
d_B – délka báze
p_B – koncentrace nosičů v bázi

$$d_B < L_N$$

Princip činnosti

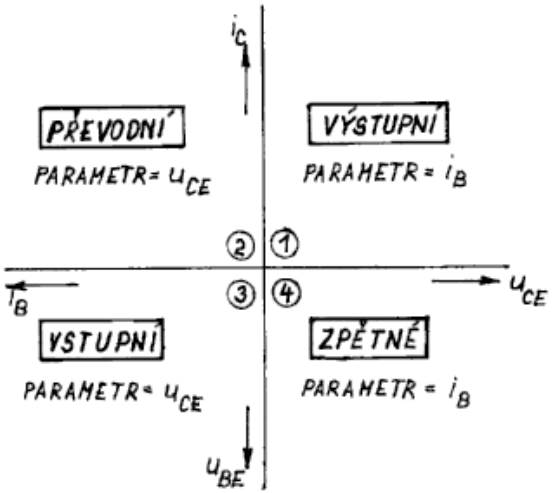
- **kontakt báze vzdálen od emitorového přechodu (několik difuzních délek)**
- **plocha kolektoru větší něž plocha emitoru – pro dobré zesílení**
- emitor-báze – odpor velmi malý
- báze-kolektor – velký odpor
- proudy přes oba přechody přibližně stejné

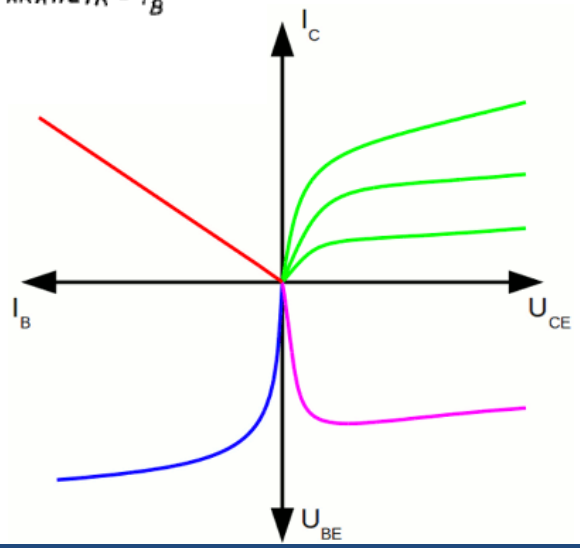
Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=7ukDKVHnac4

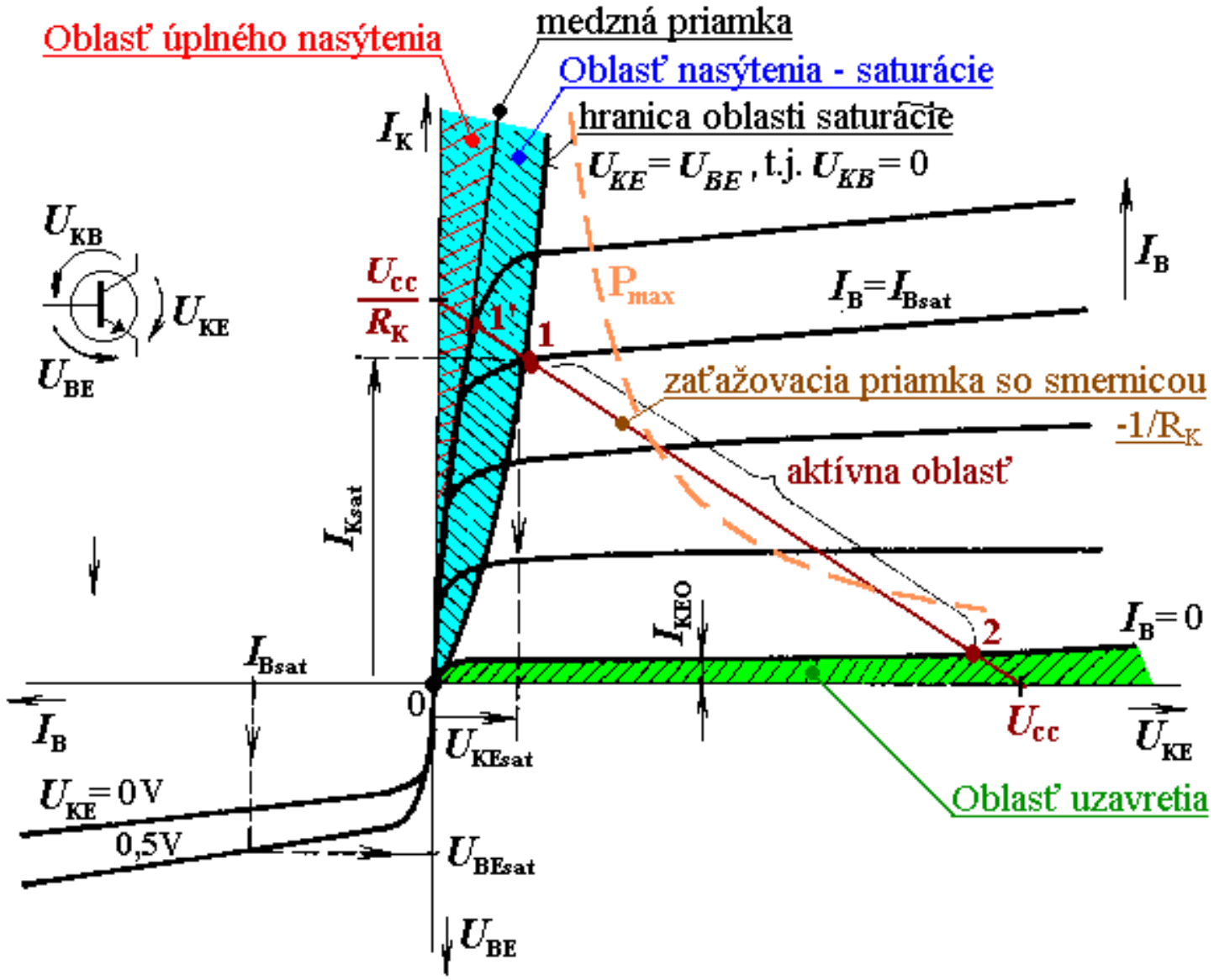


Statické vlastnosti tranzistorů

- **stejnosměrné charakteristiky** – chování bipolárního tranzistoru
- **závislost dvou veličin (proud, napětí), třetí veličina jako parametr**
- lze zjistit:
  - statické hodnoty proměnných veličin
  - stanovit velikosti parametrů
  - statické poměry signálů
  - polohu pracovního bodu
  - dynamické vlastnosti
- charakteristiky tranzistoru
  - **výstupní**
  - **převodní**
  - **vstupní**
  - **zpětné**





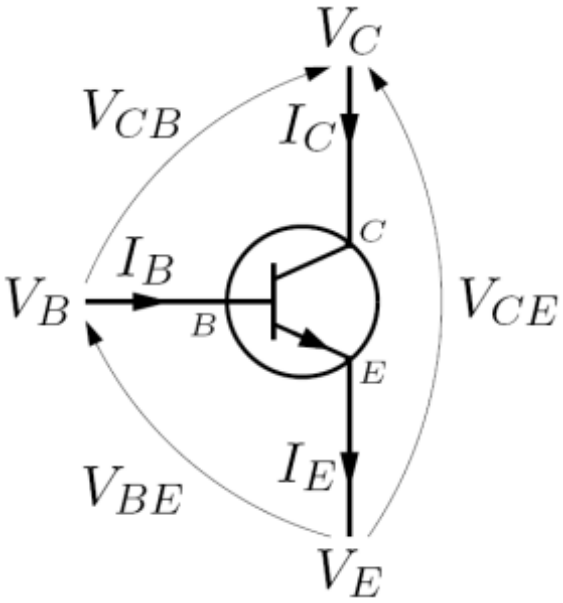

Oblasť úplného nasýtenia
medzná priamka
Oblasť nasýtenia - saturácie
hranica oblasti saturácie
$U_{KE} = U_{BE}$, t.j. $U_{KB} = 0$
I_K
U_{KB}
U_{KE}
U_{BE}
$\frac{U_{cc}}{R_K}$
P_{max}
$I_B = I_{Bsat}$
I_B
1
1'
zaťažovacia priamka so smernicou
$-1/R_K$
aktívna oblasť
I_{Ksat}
I_{KEO}
$I_B = 0$
2
I_{Bsat}
0
I_B
U_{KEsat}
U_{cc}
U_{KE}
$U_{KE} = 0V$
0,5V
U_{BEsat}
U_{BE}
Oblasť uzavretia

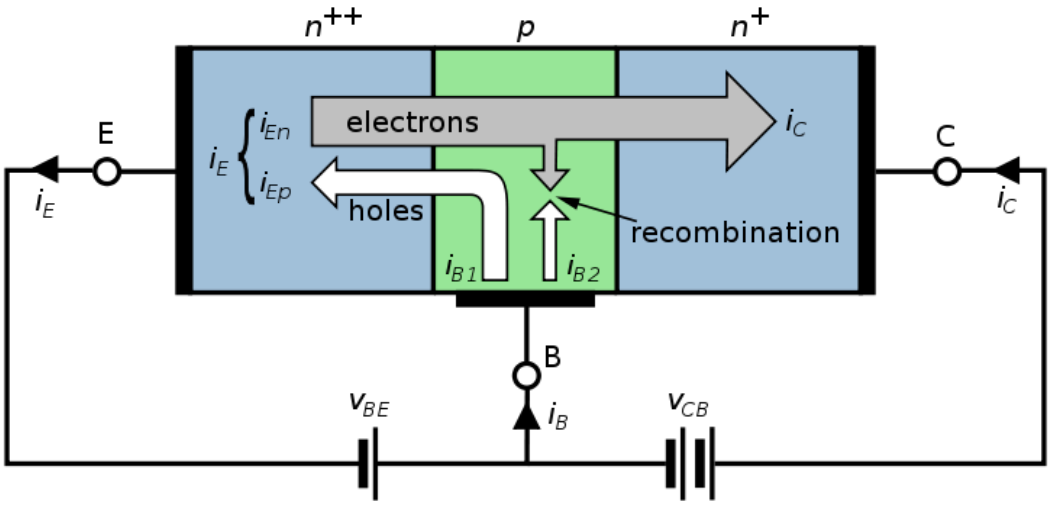
Proudy v tranzistoru

- **emitorový proud I_E** – elektronový nebo děrový proud
  - proud elektronů (děr) vstříknutých z emitoru do báze

- **kolektorový proud I_C** – elektronový nebo děrový proud
  - proud elektronů (děr) vstříknutých emitorem do báze zmenšený o rekombinaci
  - závěrný proud kolektorového PN přechodu

- **bázový proud I_B**
  - proud elektronů (děr) vstříknutých z báze do emitoru





$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_E \cong I_C$$

Proudový zesilovací činitel

- **proudový zesilovací činitel α**
  - proudový přenos tranzistoru
  - z oblasti emitoru do oblasti kolektoru

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} < 1 \Big|_{U_{CE}=konst.}$$

- **proudový zesilovací činitel β**
  - z oblasti báze do oblasti kolektoru

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE}=konst.}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\frac{I_C}{I_E}}{\frac{(I_E - I_C)}{I_E}} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

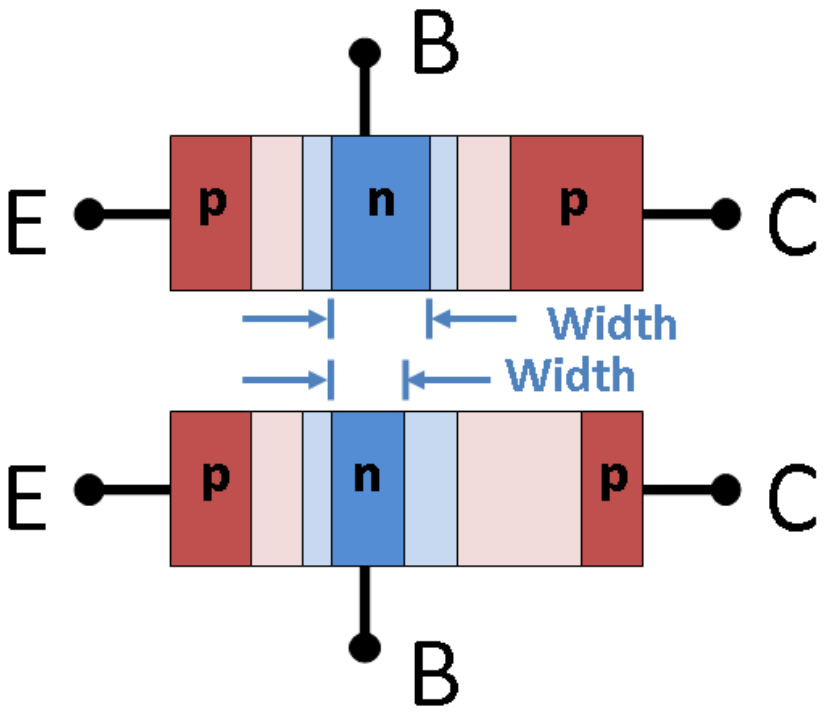
$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

α- proudový zesilovací činitel v zapojení se společnou bází (0,9 – 0,9975)

β - proudový zesilovací činitel v zapojení se společným emitorem (10 – 500)

Earlyho jev

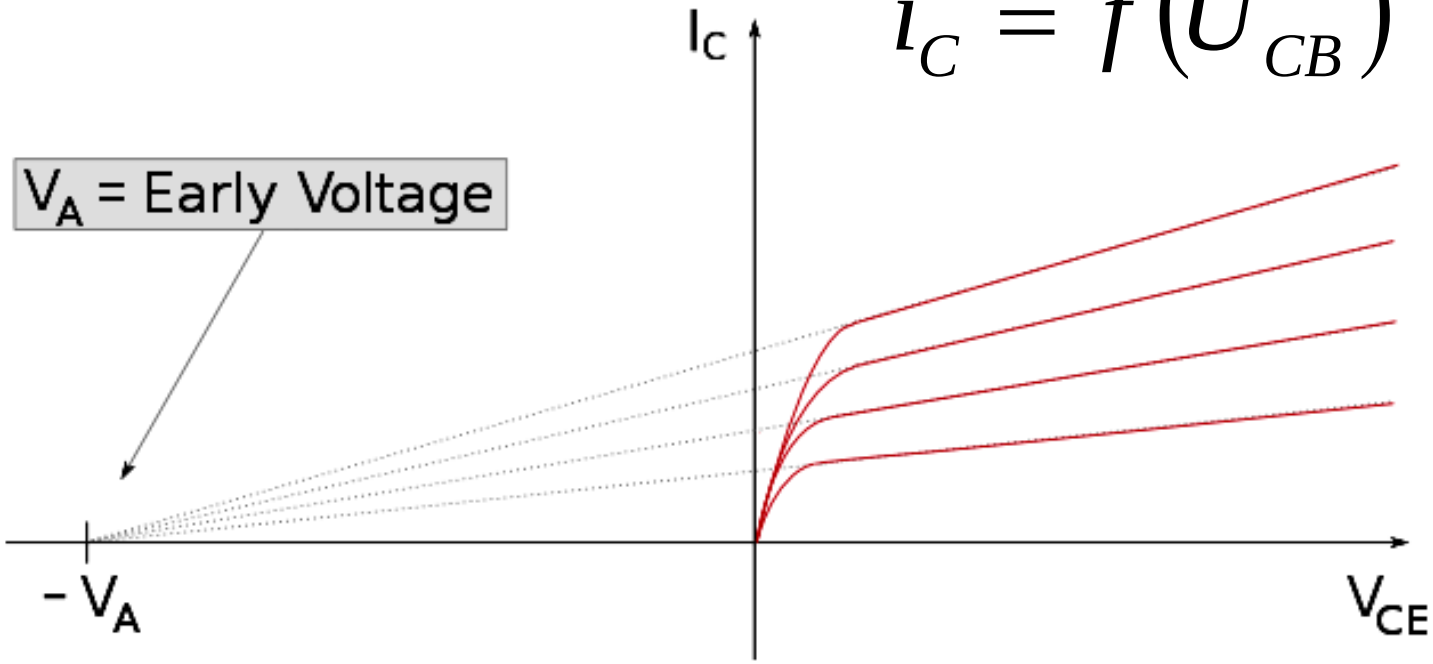
- **efektivní šířka báze závisí na velikosti napětí U_{CB}**
- rozšíření vyčerpané oblasti přechodu báze-kolektor vlivem přiloženého napětí
- **nízká koncentrace příměsí v bázi** – rozšiřování vyprázdněné oblasti do báze → **snížení šířky báze o velikost vyčerpané oblasti**
- zvýšení gradientu koncentrace minoritních nosičů v bázi
- **širší vyčerpaná oblast – kratší dráha elektronů – nárůst kolektorového proudu**



Důsledek Earlyho jevu

- **ovlivňuje tvar statických charakteristik tranzistoru**
- proud závislý na napětí – **dochází k odsycení charakteristik**
- U_A – Earlyho napětí
- **výsledkem je napěťově závislý proudový zesilovací činitel**

$$i_C = f\left(U_{CB}\right)$$



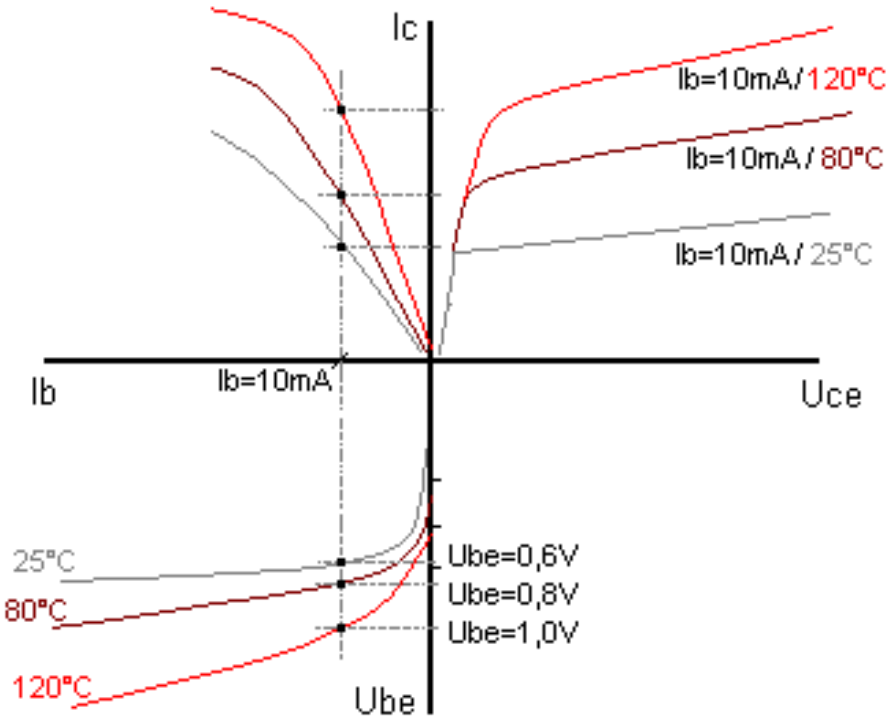
Důsledek Earlyho jevu

- ovlivňuje konstrukční vlastnosti
- **omezení tloušťky báze ze dvou stran**
- **nelze zmenšovat tloušťku báze (rozměr tranzistoru) pod určitou mez**
- může vzniknout průnik přechodů – vratný děj
- celá báze tvořena vyčerpanou oblastí (vlastnosti a chování jako izolant)

$$d_{NP} < d_B < L_N$$

Teplotní vlastnosti tranzistoru

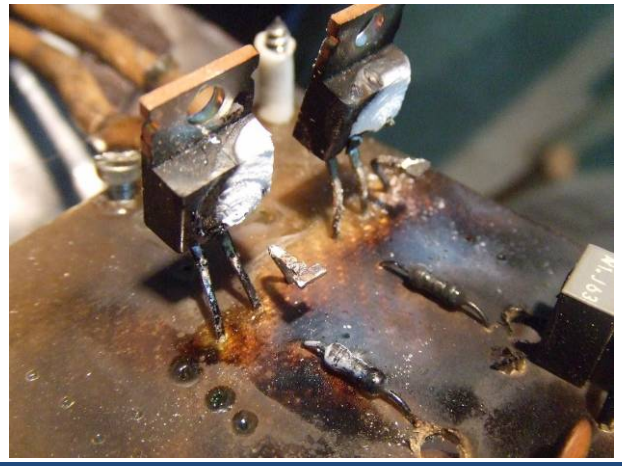
- bipolární tranzistor – **součástka řízena teplotou**
- **teplotní závislost – nežádoucí jev, nárůst kolektorového proudu**
- **nutná stabilizace pracovního bodu** – záporná zpětná vazba, kompenzační prvek
- vznik tepla na kolektorovém přechodu (závěrně polarizovaný – kolektorová ztráta
- **překročení maximálního ztrátového výkonu – prudký nárůst tepla → tepelný průraz**

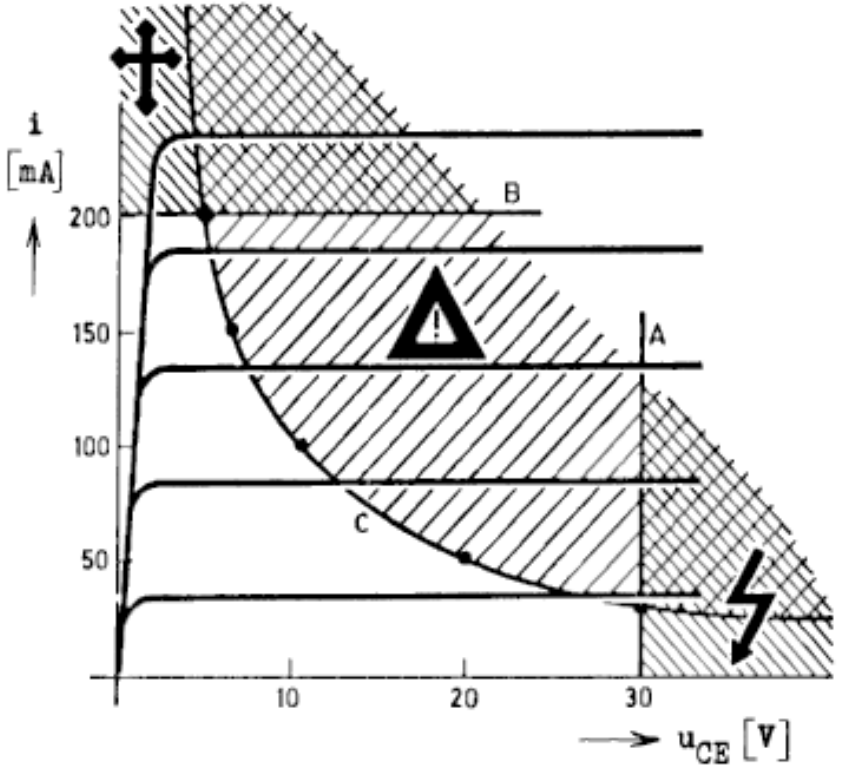


- omezení pracovní oblasti tranzistoru – 3 faktory (SOA – Safe Operating Area)
  - **maximální kolektorová ztráta P_{Cmax}**
  - **maximální kolektorový proud I_{Cmax}**
  - **maximální kolektorové napětí U_{Cmax}**



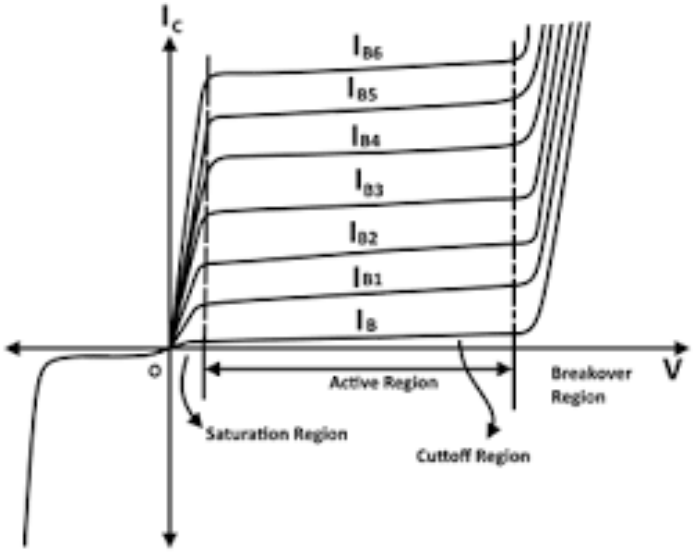
!!! překročení mezních hodnot vede k totálnímu zničení tranzistoru !!!



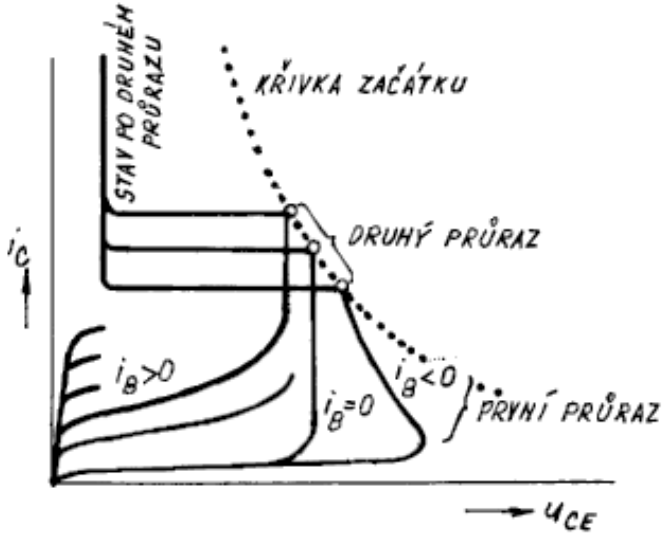


Průrazy tranzistorové struktury

- **první průraz**
  - při zatížení vysokým napětím – průrazné napětí U_{BR}
  - v oblasti prostorového náboje dochází k lavinové ionizaci
  - nemusí dojít ke zničení



- **druhý průraz**
  - vznikne i při nižším ztrátovém výkonu než P_{Cmax}
  - prudký pokles napětí U_{CE}
  - extrémní nárůst kolektorového proudu
  - ztráta schopnosti řízení dva způsoby - tepelný a proudový průraz



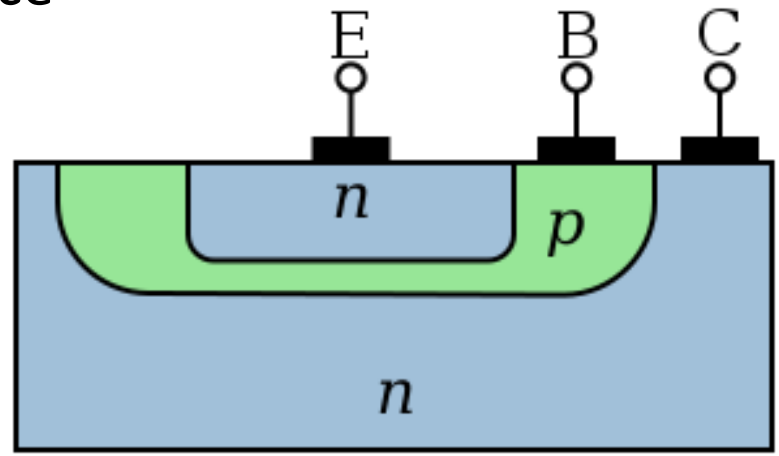
Průrazy tranzistorové struktury

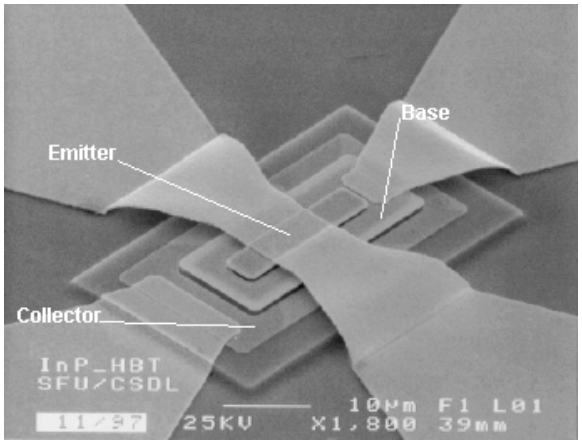
- **druhý průraz – tepelný**
  - nehomogenita struktury → vyšší proudová hustota → zvýšení teploty
  - vznik kladné zpětné vazby
  - impulzní režim – nerovnoměrné rozložení proudové hustoty
  - destrukce tranzistoru

- **druhý průraz – proudový**
  - při vypínání tranzistoru záporným impulzem proudu v bázi – indukční zátěže
  - mechanizmus lavinové ionizace
  - lokální prudké zvýšení proudové hustoty
  - rychlá destrukce oblasti

Vlastnosti a konstrukce tranzistorů

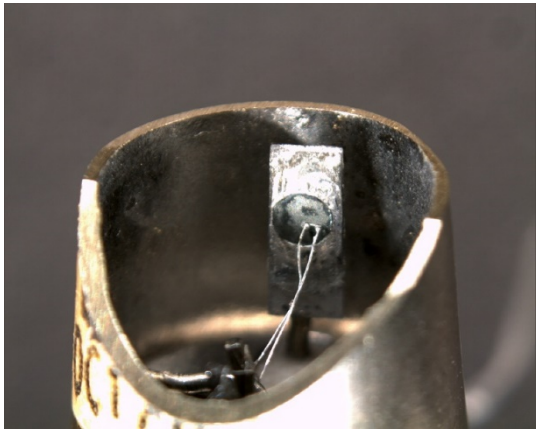
- vyšší napětí než elektronky
- nemá žhavení jako elektronky
- **nelze tranzistor s velkým výkonem a pro vysoké frekvence**
- **možnost komplementárního zapojení – kombinace NPN a PNP tranzistorů (logické obvody)**
- výstup tranzistoru – zdroj proudu (proudový zesilovač)
- aplikace:
  - zesilovače
  - spínače

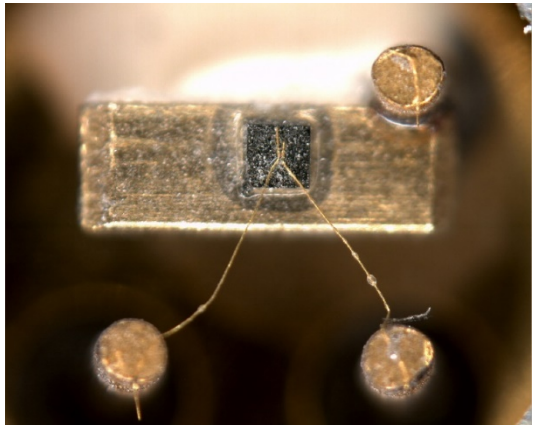




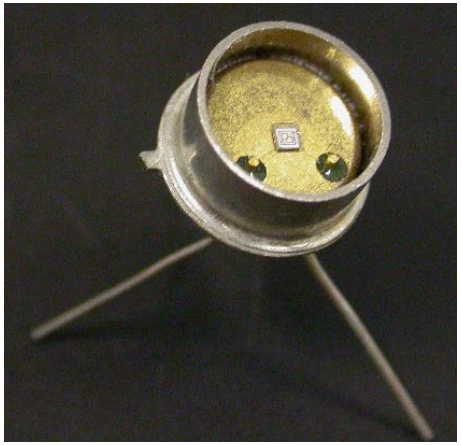
Germaniový tranzistor

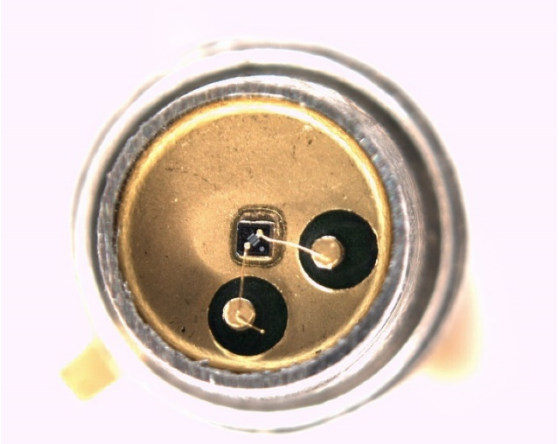


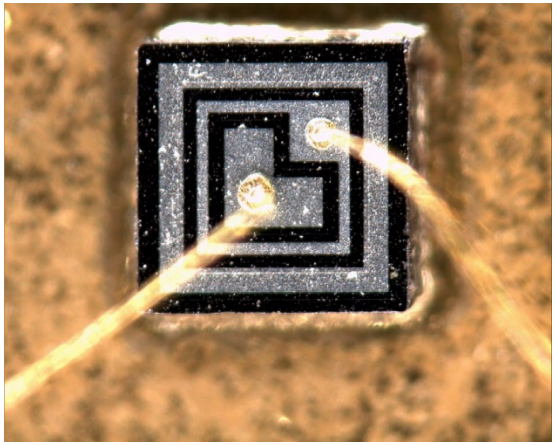




Křemíkový tranzistor

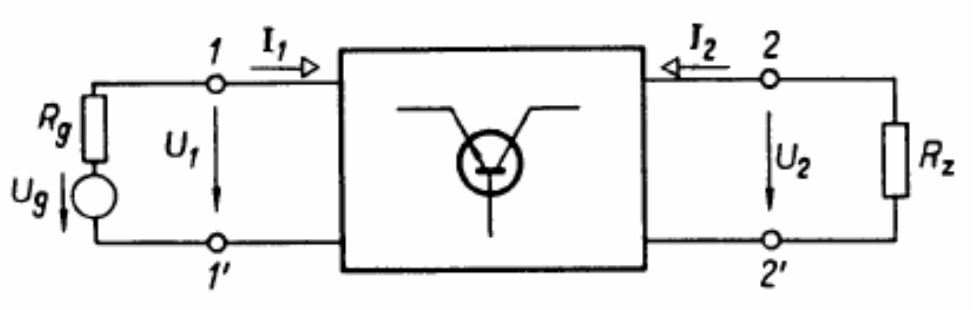






Model bipolárního tranzistoru

- **tranzistor – trojpól, zapojení jako dvojbran s jednou společnou svorkou**
- dvojbran – popis pomocí libovolné soustavy parametrů, existuje vzájemný přepočet
- lze popsat pomocí obvodových modelů – idealizované prvky, simulace činnosti



- **2 typy modelů**
  - dvojbranové modely – dvojbran s neznámou vnitřní strukturou
  - modely založené na matematickém popisu fyzikálních veličin – tranzistor + kapacity přechodů a pouzdra + indukčnosti přívodů + odpory

H-parametry (hybridní parametry)

- vznikly přímo pro tranzistory
- platí pro linearizovaný tranzistor

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

- **h11 [Ω] – vstupní impedance**
- **h22 [S] – výstupní admitance**
- **h21 [-] – proudový zesilovací činitel (nejvyšší zesílení – tranzistor pracuje do zkratu)**
- **h12 [-] – zpětný napěťový zesilovací činitel (popis zpětné vazby tranzistoru)**

$$u_1 = h_{11} i_1 + h_{12} u_2$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2$$

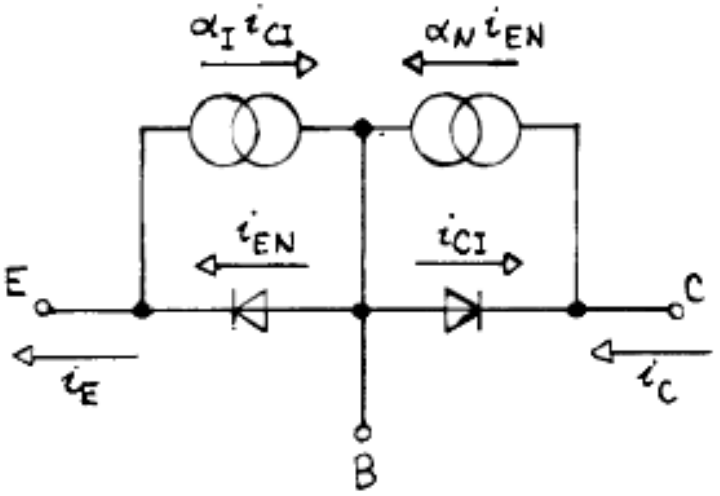
i_1 – nezávisle proměnná

i_2 – závisle proměnná

$$h_{11} = \left.\frac{u_1}{i_1}\right|_{u_2=0} \qquad h_{12} = \left.\frac{u_1}{u_2}\right|_{i_1=0} \qquad h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{u_2=0} \qquad h_{22} = \left.\frac{i_2}{u_2}\right|_{i_1=0}$$

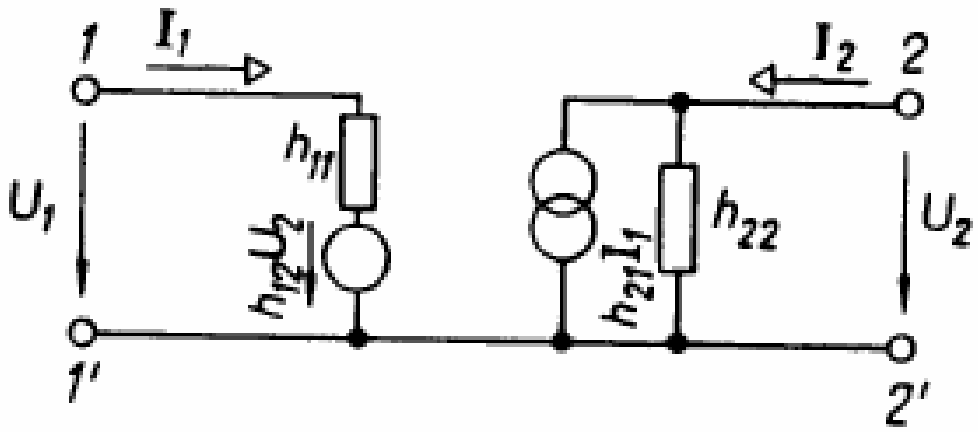
H-parametry (hybridní parametry)

- **nelineární modely**
  - Gummelův-Poonův model – přesný, velký počet parametrů, součástí SPICE
- **linearizované modely**



Model na základě H parametrů

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$



Základní zapojení

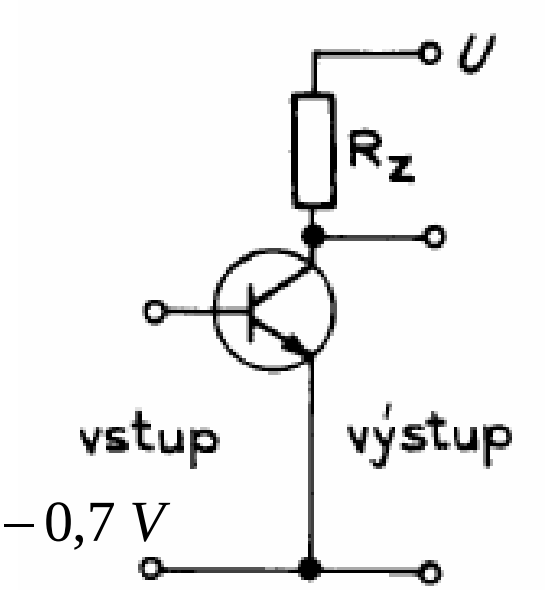
- 3 základní zapojení
  - **se společným emitorem (SE)**
  - **se společným kolektorem (SC)**
  - **se společnou bází (SB)**
- **každé zapojení má svoji H matici**
- teoreticky 6 možných zapojení (záměna vstupu a výstupu)

$$I_E = I_C + I_B \qquad U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

Proudová a napěťová rovnice platí vždy pro všechna zapojení.

Zapojení se společným emitorem (SE)

- **zesiluje proud, napětí, výkon**
- nejčastější zapojení
- přechod BE – propustný směr
- malý vstupní odpor (Ω – kΩ)
- přechod CE – závěrný směr
- velký výstupní odpor (kW)
- proudový zesilovací činitel 10 – 1000
- **výstupní signál fázově otočen o 180° vzhledem ke vstupnímu signálu**
- výkonové zesílení – dáno součinem napěťového a proudového zesílení (20 000)



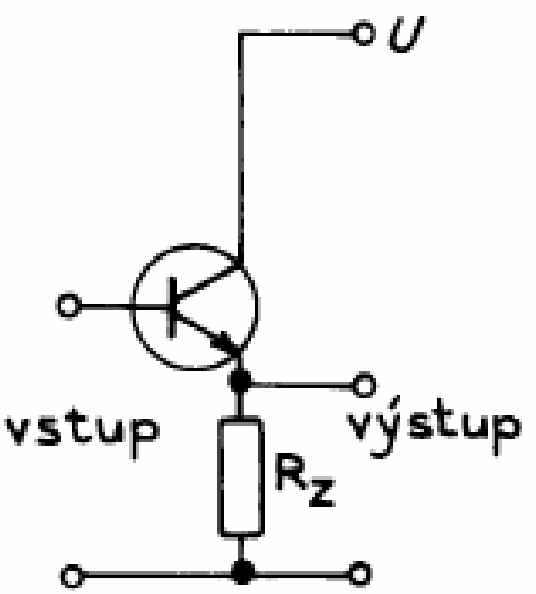
$$U_{BE} = 0{,}6 - 0{,}7\ V$$

$$u_1 = U_{BE} \quad i_1 = I_B$$

$$u_2 = U_{CE} \quad i_2 = I_C$$

Zapojení se společným kolektorem (SC)

- **zesiluje proud**
- velký vstupní odpor (MΩ)
- malý výstupní odpor (Ω)
- **žádné napěťové zesílení** – napětí na výstupu stejné jako na vstupu
- emitorový sledovač
- výkonové zesílení (500)
- výstupní napětí nezávislé na zatěžovacím odporu
- velký vstupní odpor – součin zatěžovacího odporu s proudovým zesilovacím činitelem
- **výstupní signál je ve fázi se vstupním**

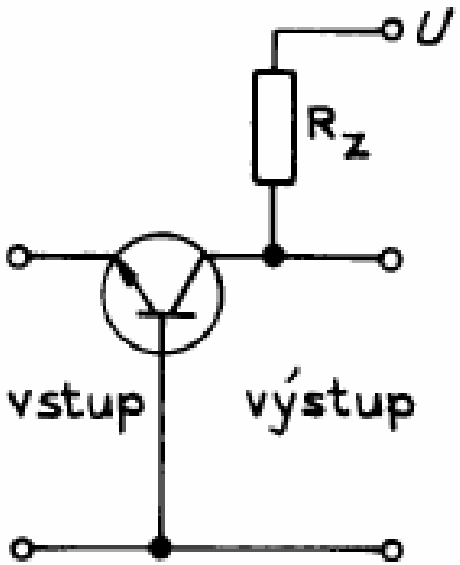


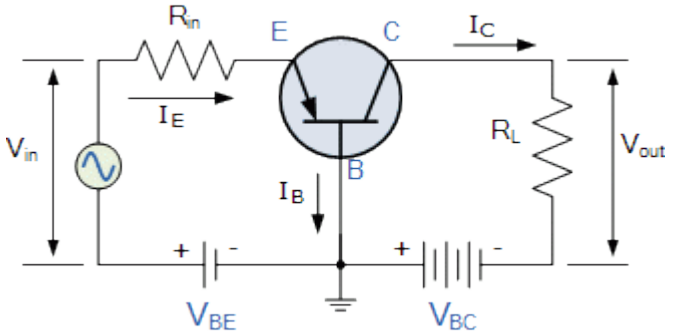
$$u_1 = U_{BC} \qquad i_1 = I_B$$

$$u_2 = U_{CE} \qquad i_2 = I_E$$

Zapojení se společnou bází (SB)

- **zesiluje napětí**
- malý vstupní odpor (Ω)
- velký výstupní odpor (MΩ)
- **proudové zesílení < 1**
- výkonové zesílení (200)
- **výstupní signál ve fázi se vstupním**
- málo používané zapojení – vysokofrekvenční obvody (vyšší mezní kmitočet)



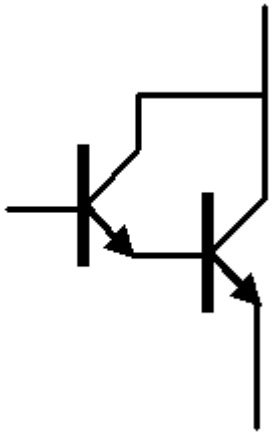


$$u_1 = U_{BE} \qquad i_1 = I_E$$

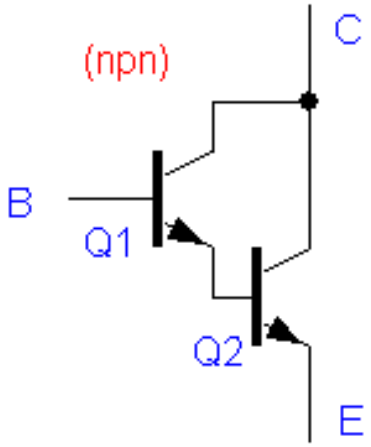
$$u_2 = U_{CB} \qquad i_2 = I_C$$

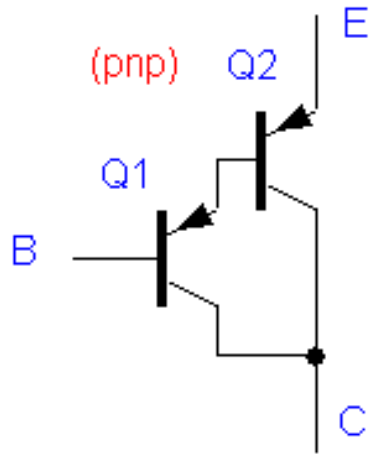
Darlingtonovo zapojení

- **snížení proudu do báze**
- **zvýšení proudového zesilovacího činitele**
- vyšší napětí U_{CE} → větší výkonová ztráta
- neobrací fázi vstupního signálu
- větší doba vypnutí t_{off}



$$\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$$





Vysokofrekvenční tranzistory

- **doba zotavení jako u diod**
- čas průletu bází – určuje mezní frekvenci
- **přechod BC uzavřen – chová se jako kapacita**
- **nižší kapacita → vyšší frekvence**
- **nelze tranzistor pro vysoké frekvence a vysoký výkon – vysoký výkon vede na zvětšení plochy kolektorového přechodu → zvýšení kapacity**
- GaAs – lepší vf vlastnosti

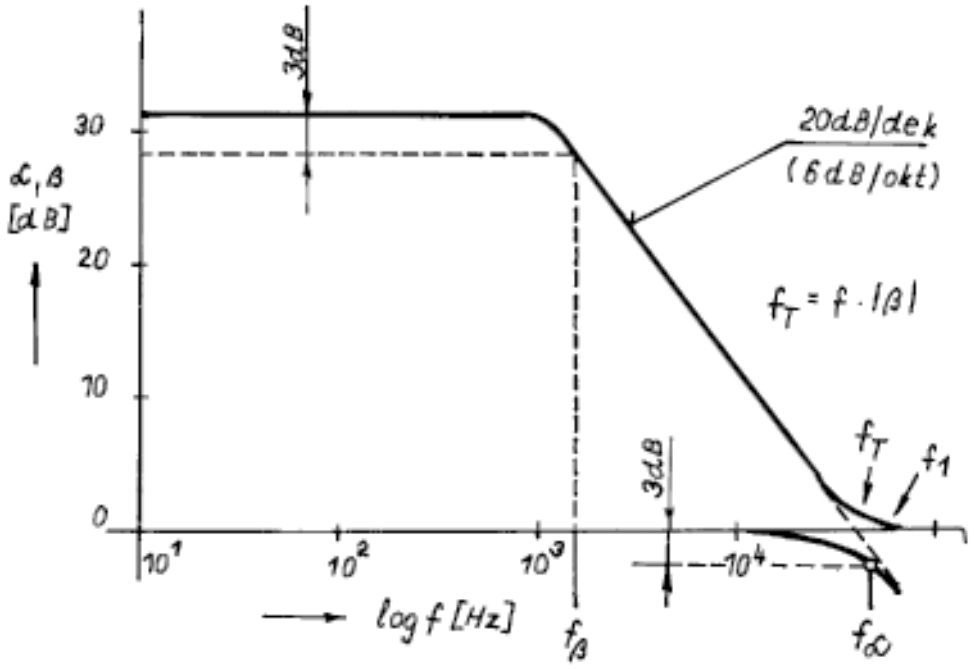
$$f < \frac{1}{\tau} \qquad \tau = RC$$

Mezní kmitočet

- pokles zesílení s rostoucím kmitočtem
- tranzientní kmitočet f_T – proudový zesilovací činitel β=1
- maximální kmitočet f_{max} – jednotkový přenos výkonu

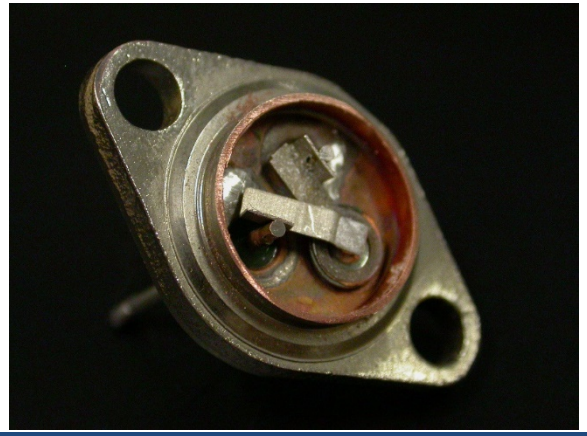
$$f_\beta = \frac{1}{2\pi R_{BE} C_{BE}}$$

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_{BE} C_{BC}}}$$



Výkonové tranzistory

- 2 základní požadavky – nelze oba najednou
  - **vysoké napětí U_{CE}** (400 – 1200 V)
  - **krátká vypínací doba t_{off}**
- ovládání výkonu v oblasti síťového napájení
- průrazné napětí přechodu BC musí převyšovat pracovní napětí
- kolektorová oblast s vysokým měrným odporem a tloušťkou
- nízké hodnoty proudového zesilovacího činitele (10 – 100)
- poměrně velký proud do báze

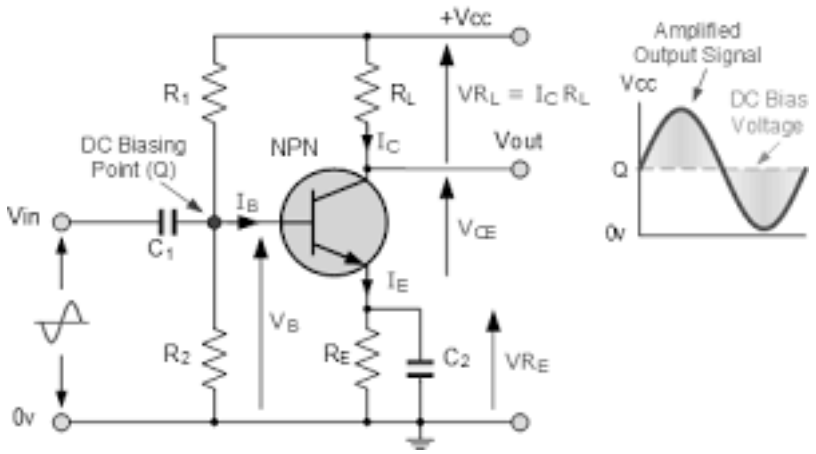


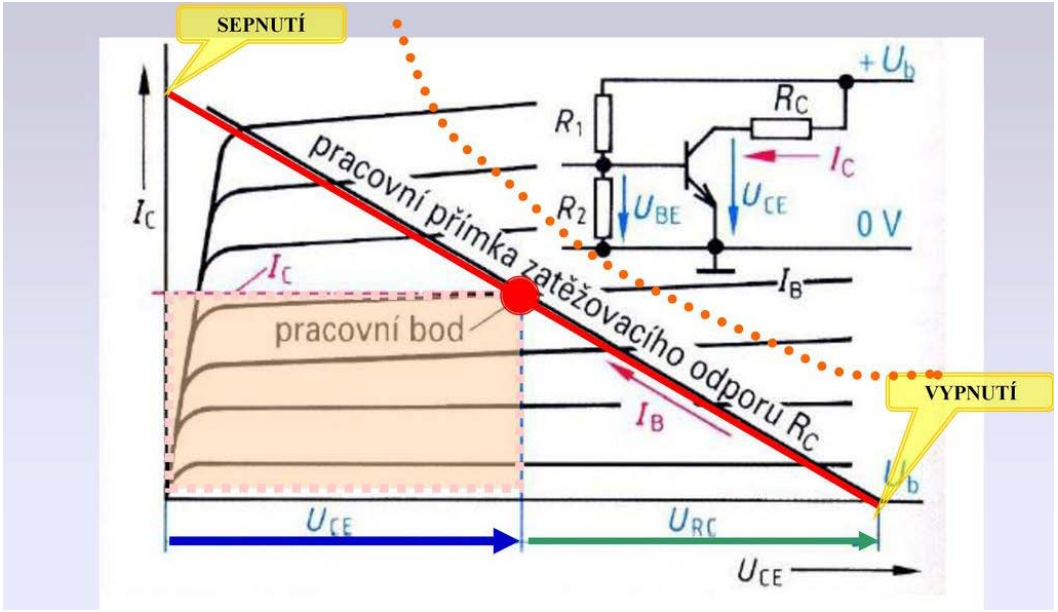




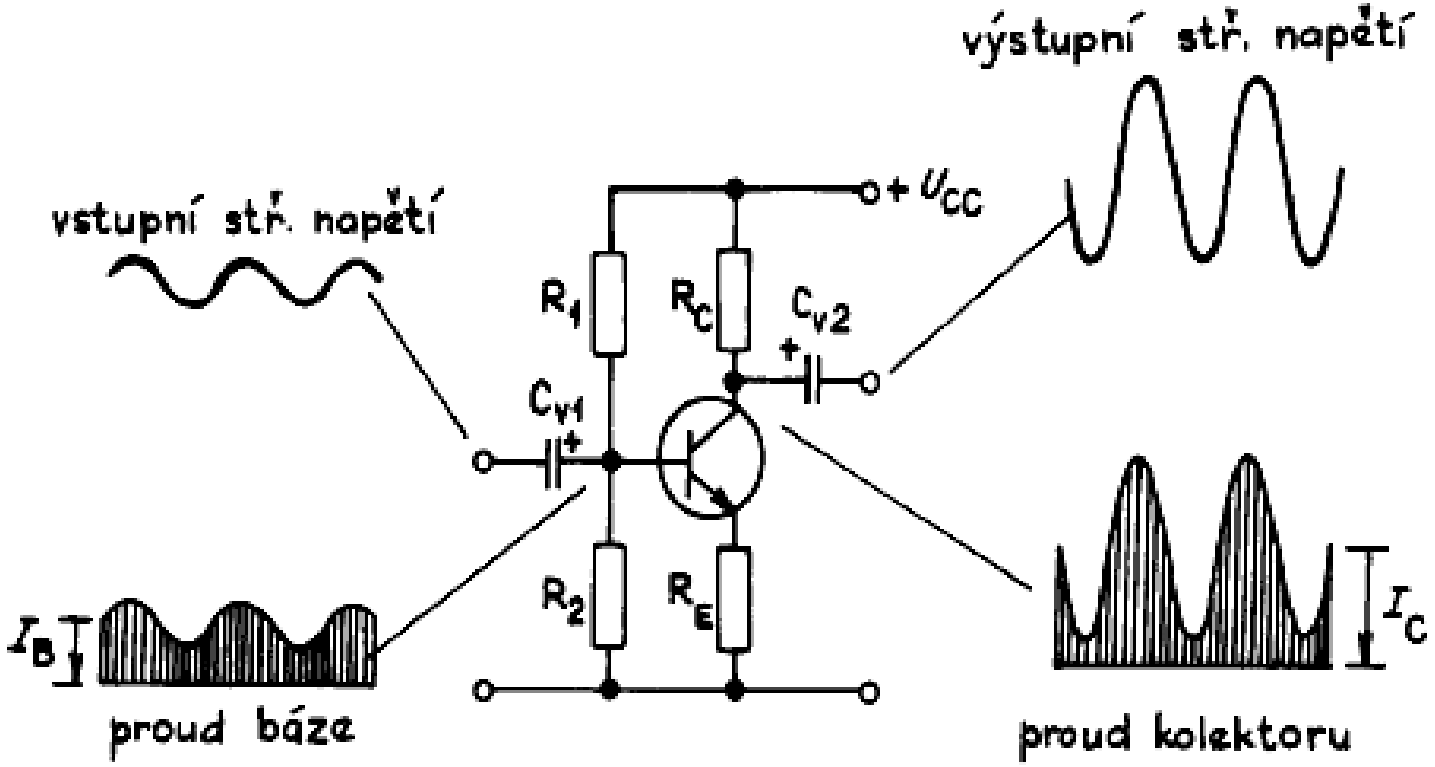
Tranzistorový zesilovač

- **nutné nastavení klidového pracovního bodu** – zavedení předpětí do báze
- 4 základní třídy zesilovačů (A, B, C, D) – podle umístění pracovního bodu
- **stabilizace pracovního bodu** – zavedení záporné zpětné vazby

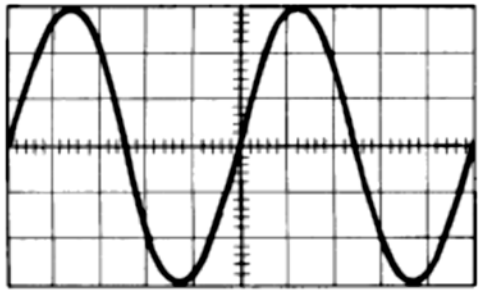




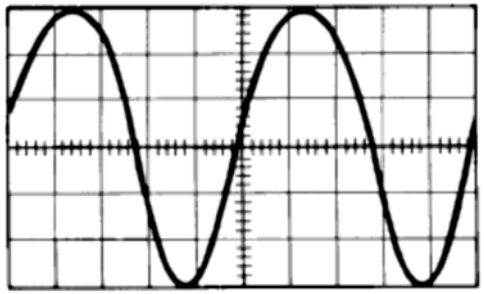
- malé změny napětí na bázi – kolísání klidového proudu
- **vstupní signál na bázi se superponuje k nastavenému předpětí**
- **změna kolektorového proudu odpovídá změnám proudu báze**
- tvar napětí se nelišší
- lišší se velikost napětí na výstupu



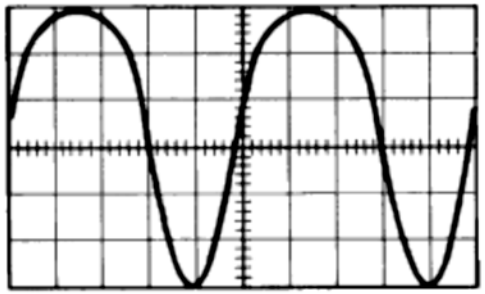
- 4 základní nastavení zesilovače
  - buzení malým a pomalým signálem
  - buzení velkým a pomalým signálem
  - buzení malým a rychlým signálem
  - buzení velkým a rychlým signálem



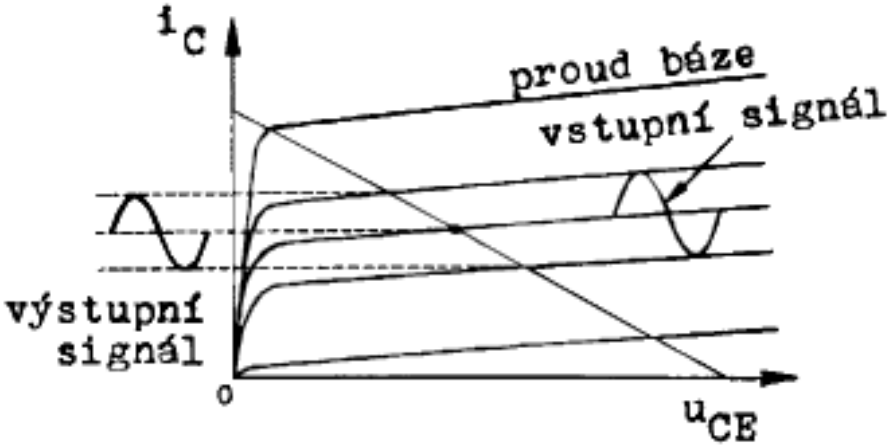
1% zkreslení

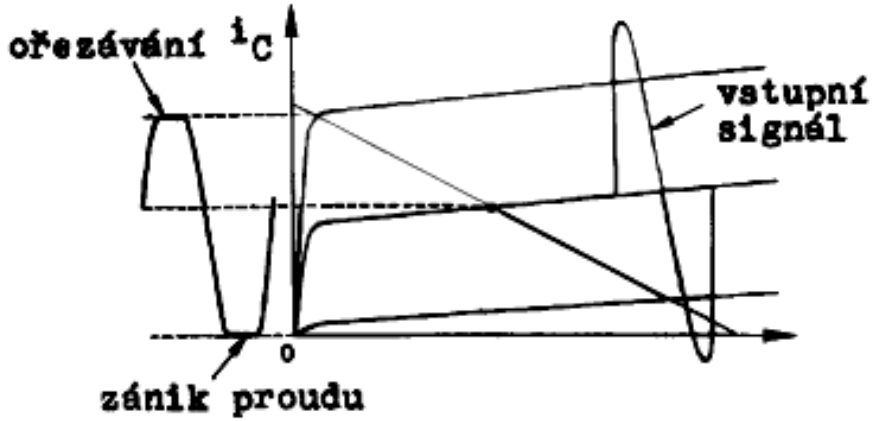


10% zkreslení

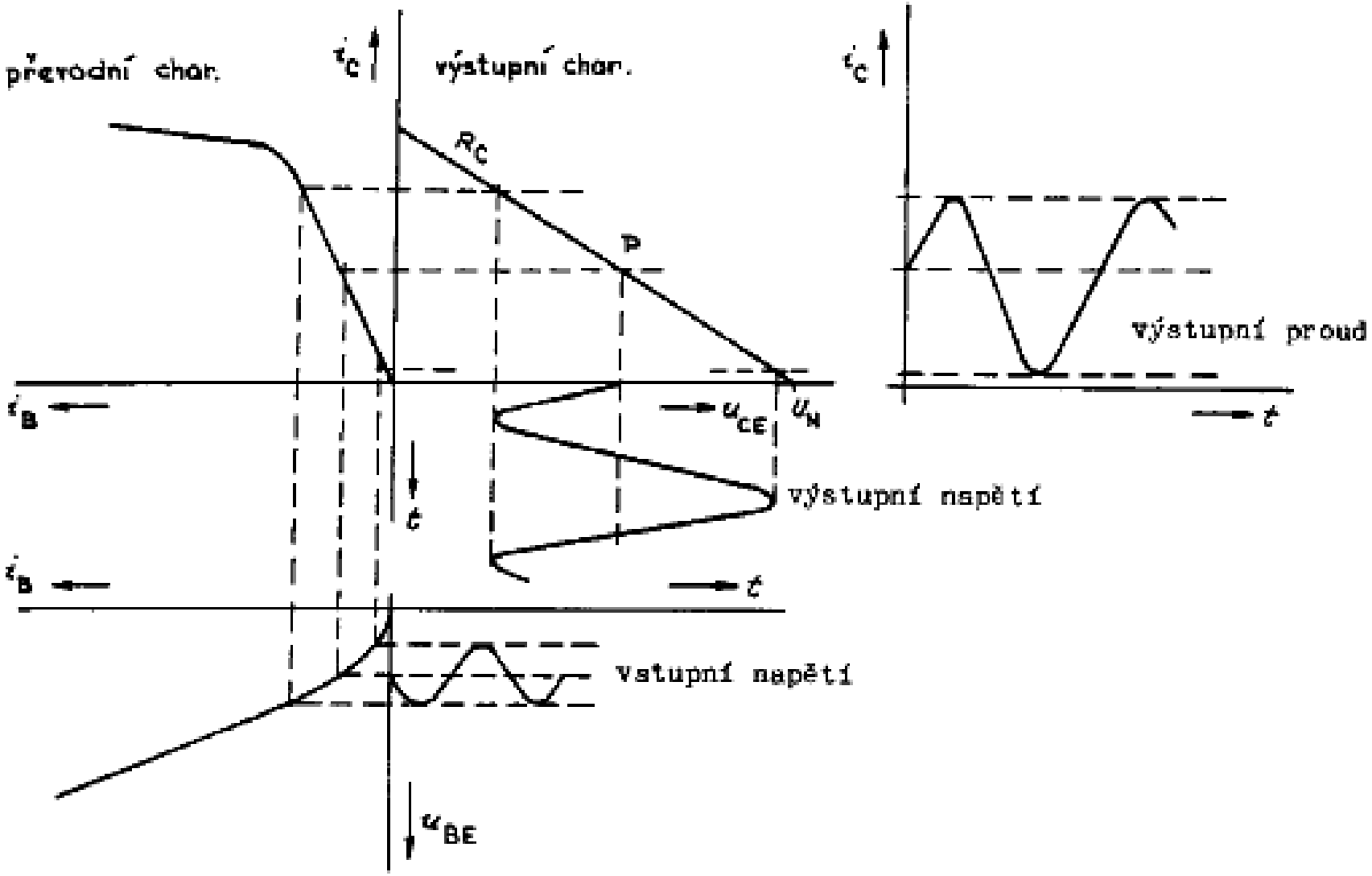


20% zkreslení



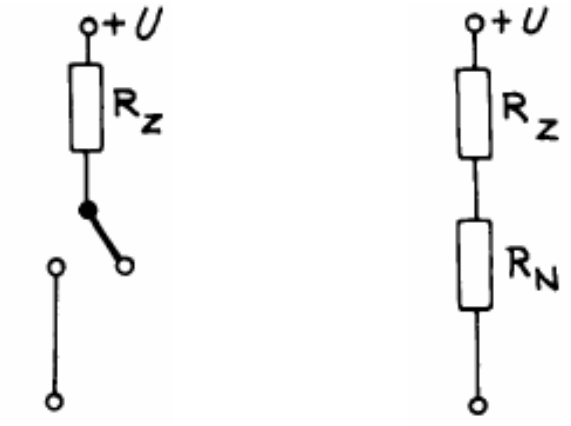


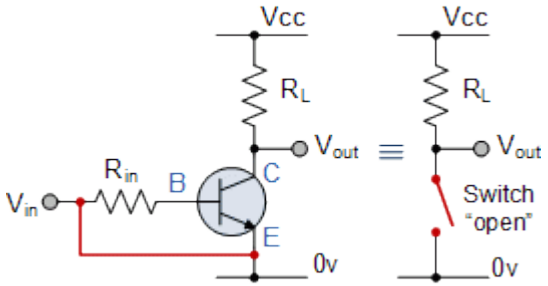
Grafické řešení tranzistorového zesilovače

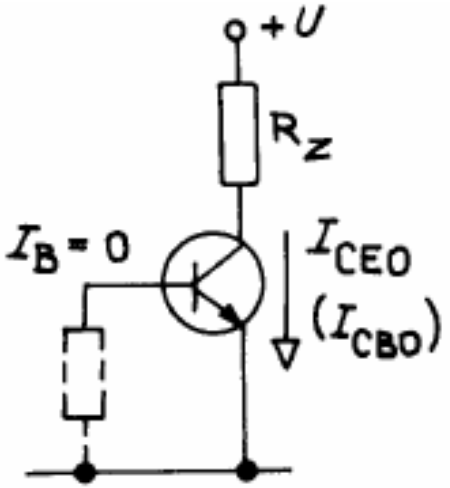


Tranzistorový spínač

- malá spotřeba energie ke spínání
- **požadavek na krátkou dobu sepnutí**
- **požadavek na vysoký opakovací kmitočet**
- malý ztrátový výkon při sepnutí
- 2 stavy – sepnuto, rozepnuto
- oblast nasycení, aktivní a průrazu
- zapojení se společným emitorem (SE)





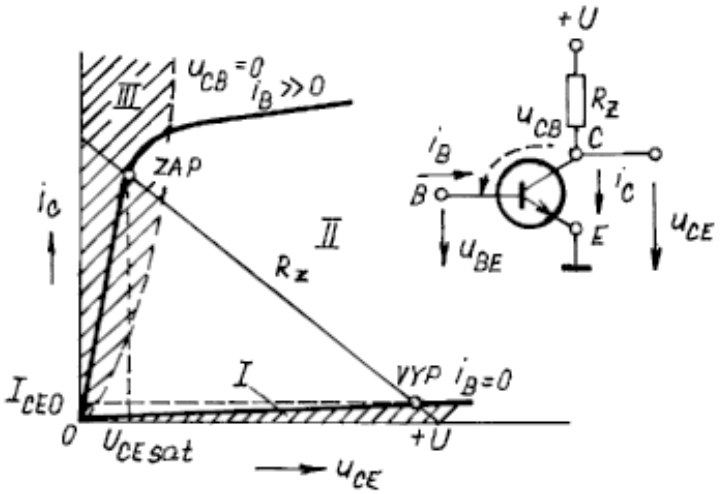


I_{CE0} – zbytkový proud při odpojené bázi

I_{CB0} – zbytkový proud při bázi spojené s emitorem

- sepnutý stav – přechod CE otevřený (malý odpor)
- malý odpor + velký proud = úbytek napětí (saturační napětí) (0,2 – 1 V)
- vznik ztrátového výkonu během přepínání → přeměna v teplo
- **požadovaný malý odpor v sepnutém stavu**
- **požadovaný velký odpor v rozpojeném stavu**
- **požadovaný velký proudový zesilovací účinek - minimalizace spínací a rozpínací doby**

- I –oblast nevodivého stavu I_B=0
  - nevodivý stav, rezistor s velkým odporem
- II – oblast aktivního zesílení (hranice IB=0 a U_{CB}=0)
  - lineární zesilovač
- III – oblast nasycení (saturace) U_{CB}=0
  - vodivý stav, rezistor s malým odporem



nasycení – nadbytek volných nosičů na bázi, nelze vyvolat další proudové zesílení

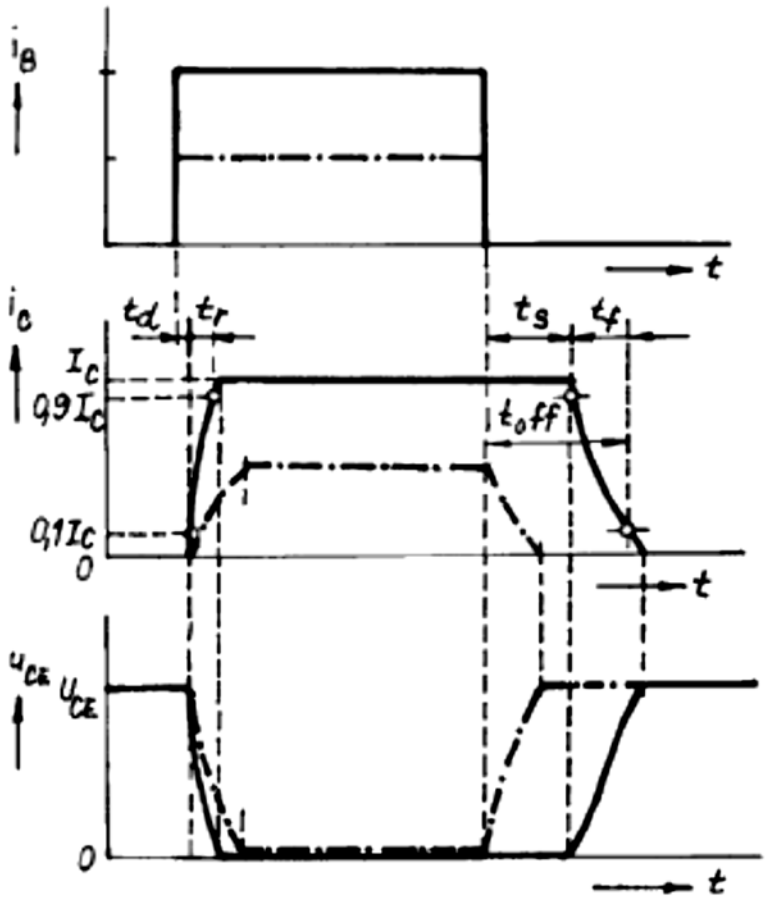
Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=UIEGKvCfDOA
https://www.youtube.com/watch?v=oE1_CO4bpHI

- t_d – doba zpoždění
- t_r – doba náběhu (rise time)
- t_s – doba přesahu (saturation time)
- t_f – doba sestupu (fall time)
- t_{on} – celková doba sepnutí
- t_{off} – celková doba vypnutí

$$t_{on} = t_d + t_r \cong t_r$$

$$t_{off} = t_s + t_f$$

t_s – doba potřebná k odčerpání přebytečných nosičů v bázi



Kontrolní otázky

- Nakreslete schematickou značku NPN a PNP tranzistoru.
- Vysvětlete princip činnosti bipolárního tranzistoru.
- Nakreslete V-A charakteristiky bipolárního tranzistoru.
- Co platí pro proudy v bipolárním tranzistoru.
- Jaké jsou zesilovací koeficienty bipolárního tranzistoru.
- Co je Earlyho jev?
- Jaká je teplotní závislost bipolárního tranzistoru?
- Kdy dochází ke zničení tranzistoru.
- Jak vypadá reálná konstrukce bipolárního tranzistoru?



Kontrolní otázky

- Nakreslete náhradní schéma bipolárního tranzistoru.
- Co znamenají jednotlivé H parametry bipolárního tranzistoru?
- Jaká existují zapojení s bipolárním tranzistorem?
- Jaké jsou požadavky pro výkonový a vysokofrekvenční tranzistor?
- Co je mezní kmitočet?
- Vysvětlete princip zesilovače s bipolárním tranzistorem.
- Vysvětlete princip spínače s bipolárním tranzistorem.



Použitá literatura

- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5