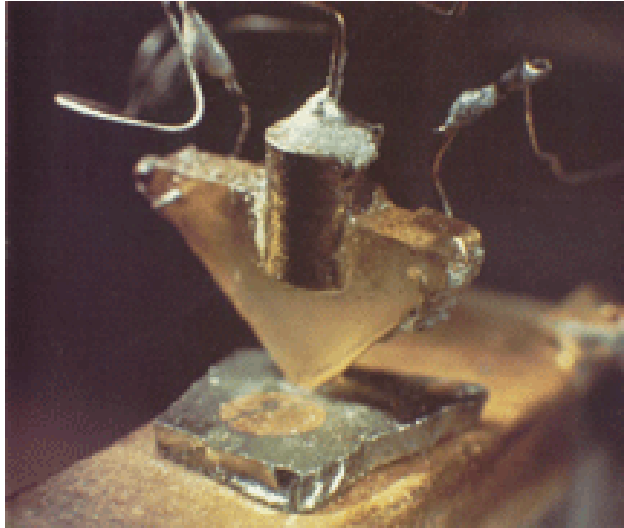


5.přednáška

Bipolární tranzistor

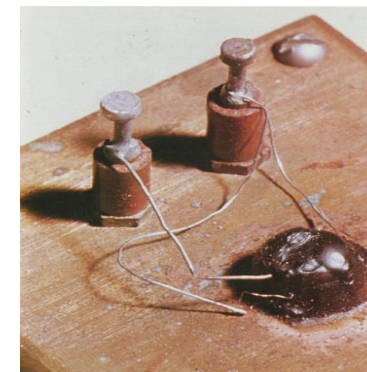
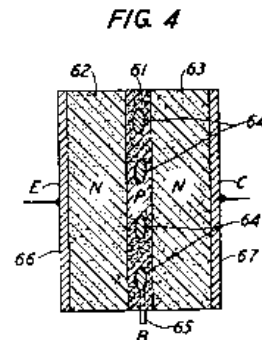
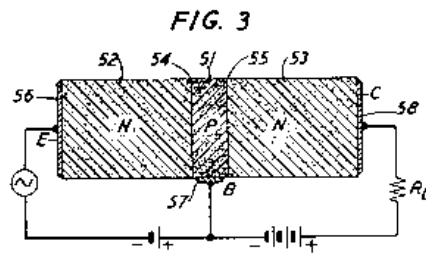
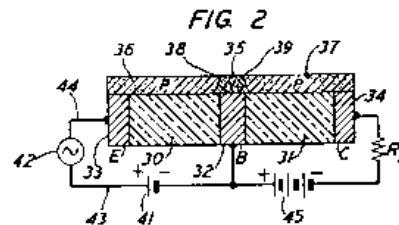
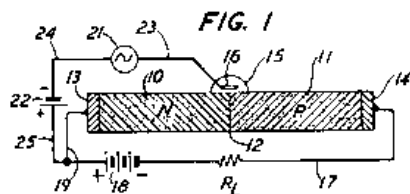


Bardeen

Brattain

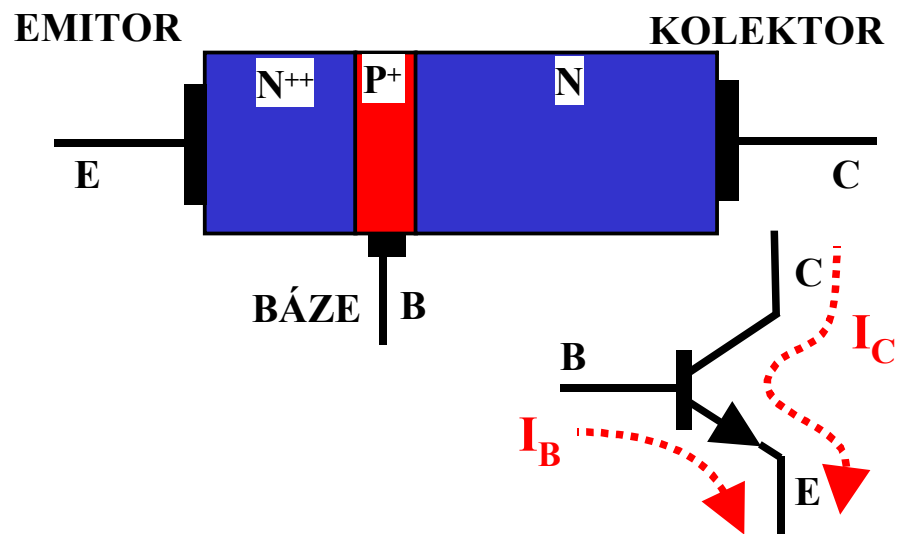


Shockley

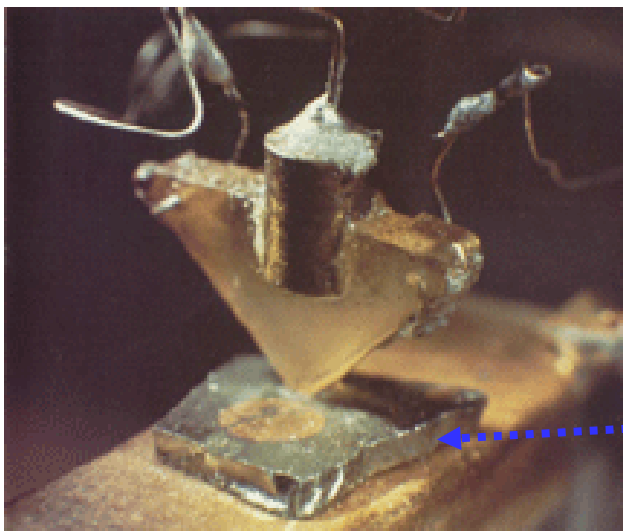


U.S. Patent 2,623,105

Bipolární tranzistor

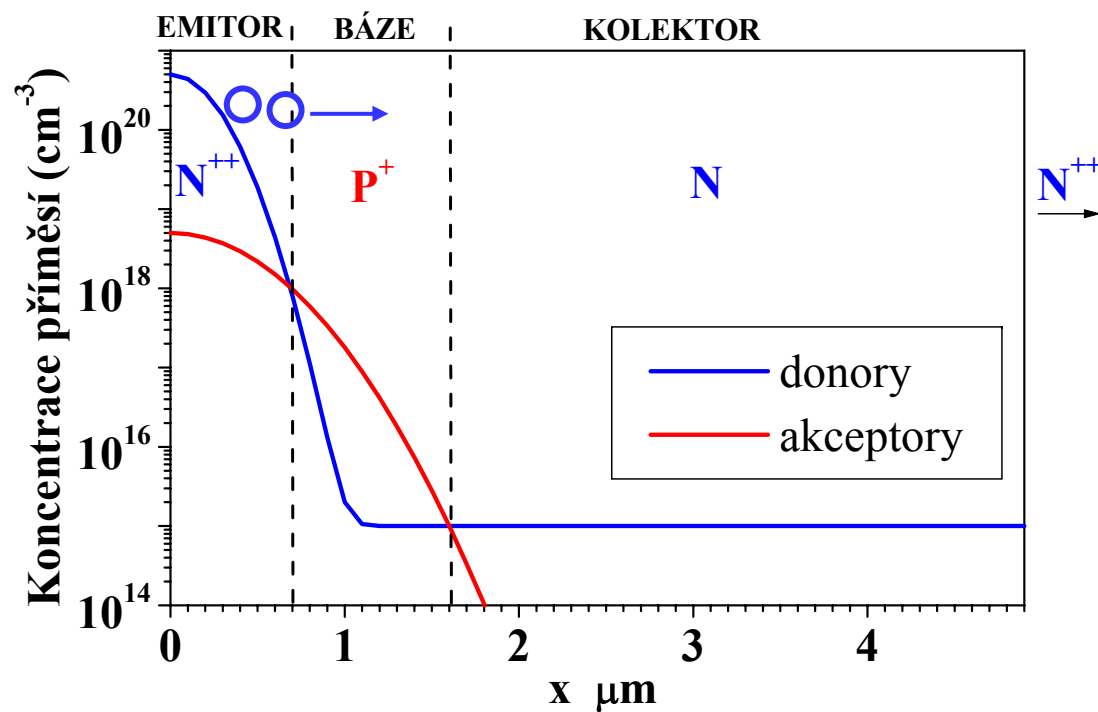
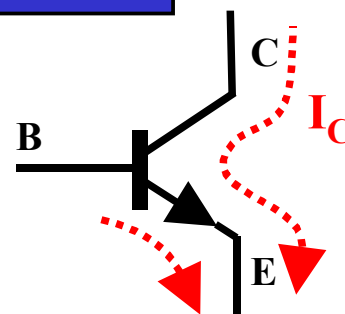
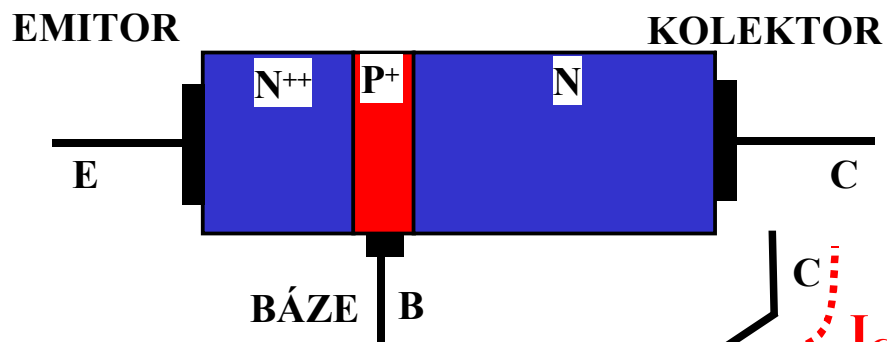


(a)



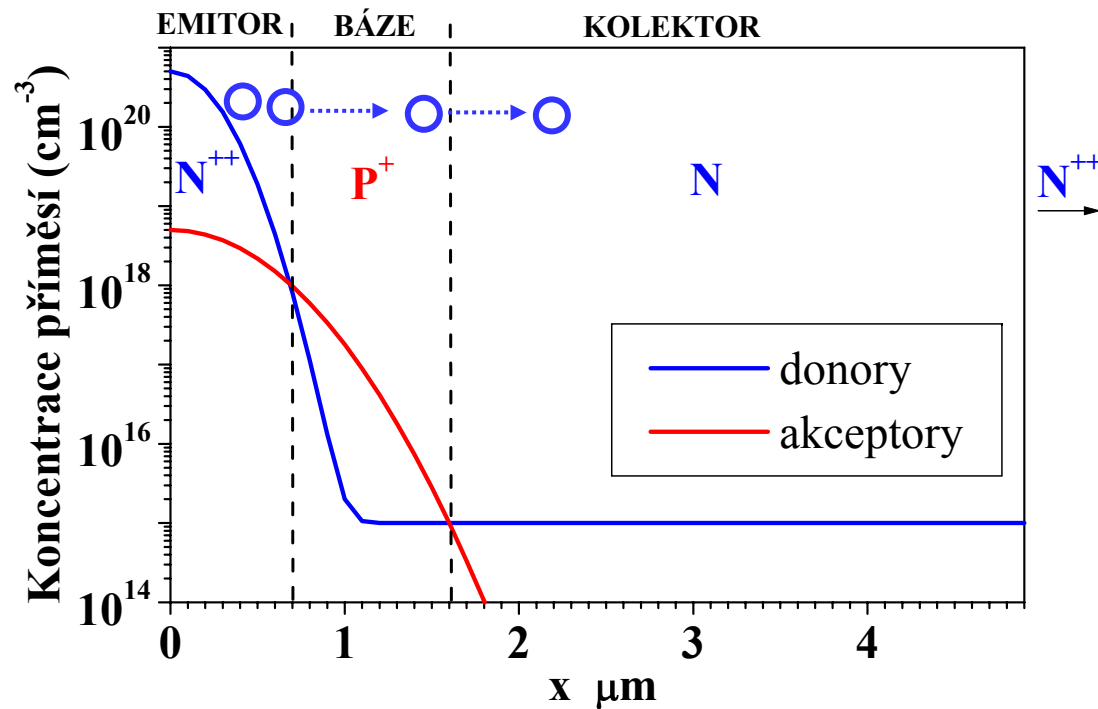
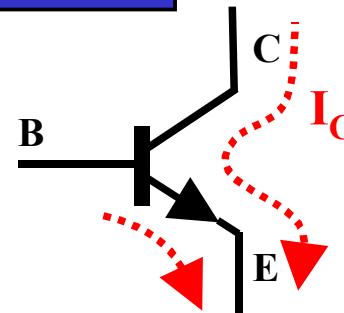
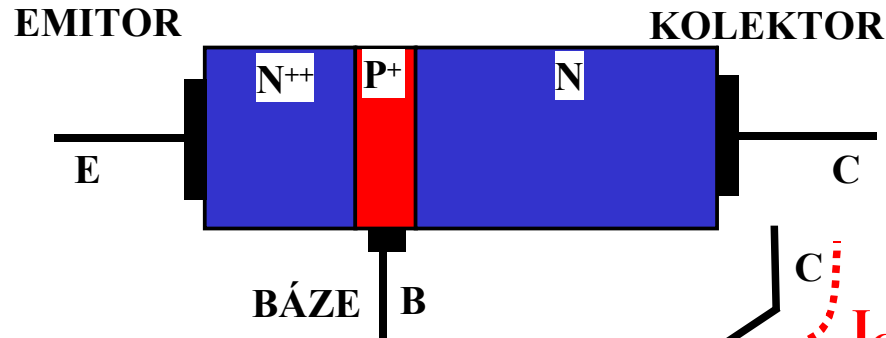
Báze

Bipolární tranzistor



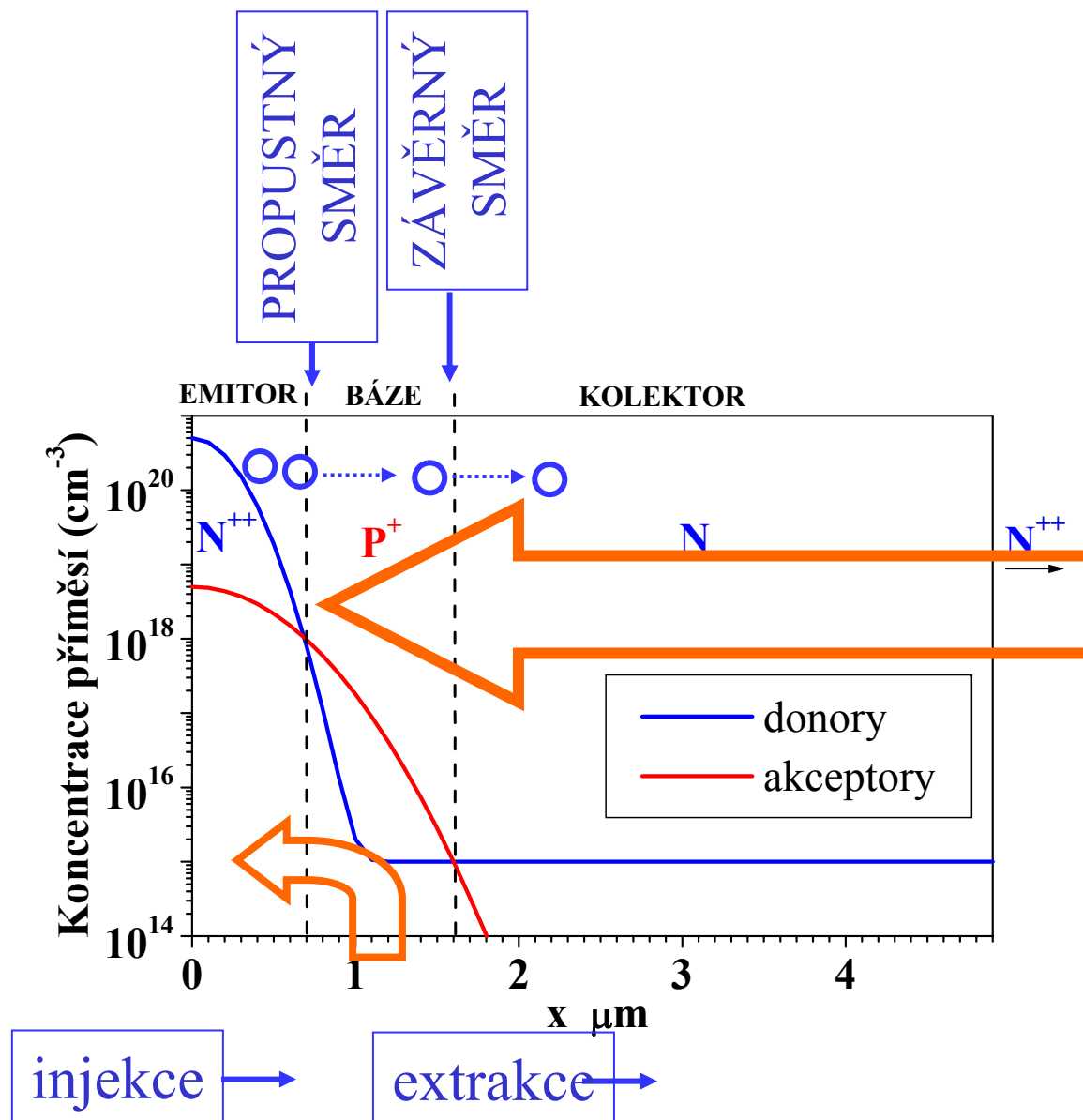
EMITOR
„emituje“ elektrony
do báze

Bipolární tranzistor

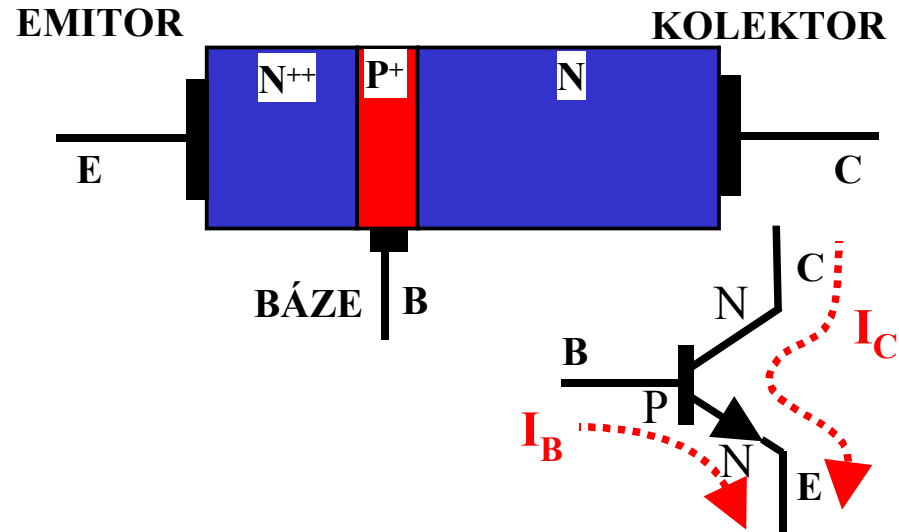


KOLEKTOR
„sbírá“ elektrony,
které prodifundují
bází

Bipolární tranzistor



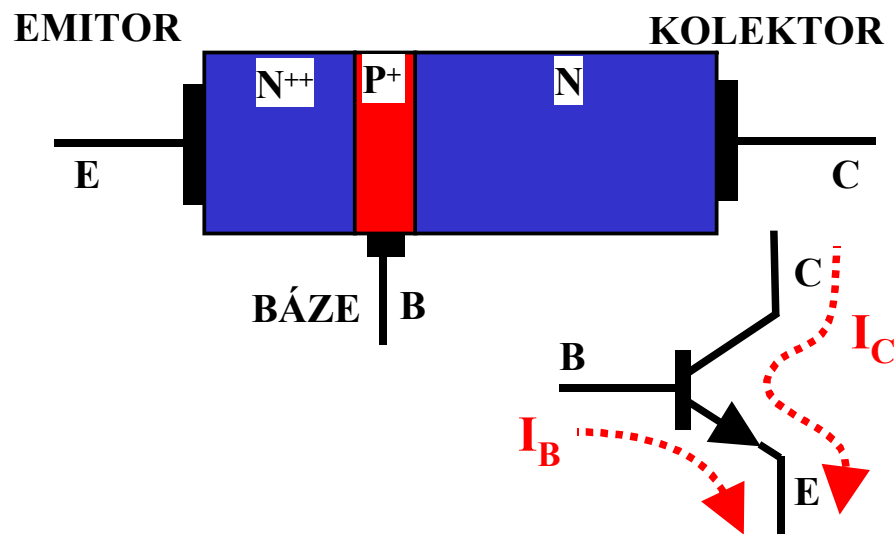
Bipolární tranzistor



Šipka v emitoru ukazuje KLADNÝ směr toku proudu
v normálním aktivním režimu
(proti směru toku elektronů)

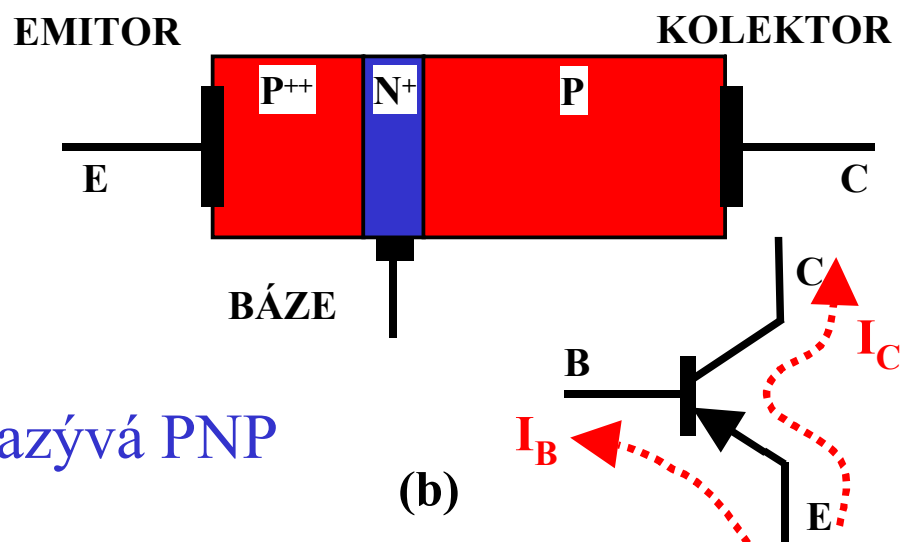
Tranzistor se nazývá NPN

Bipolární tranzistor



(a)

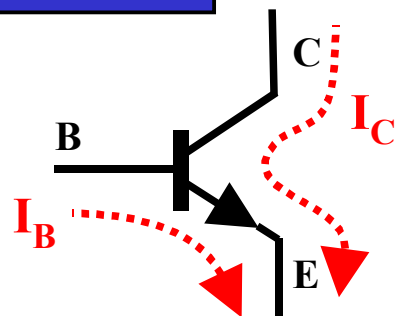
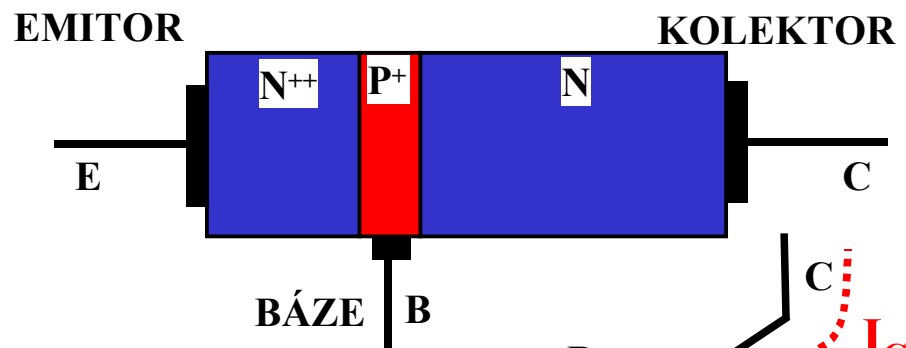
Šipka ukazuje KLADNÝ směr toku proudu v normálním aktivním režimu



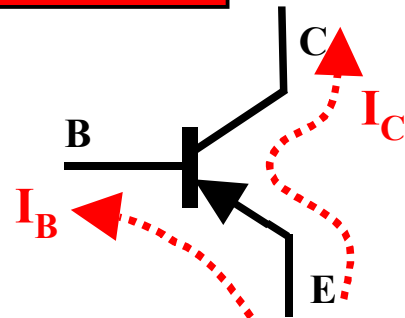
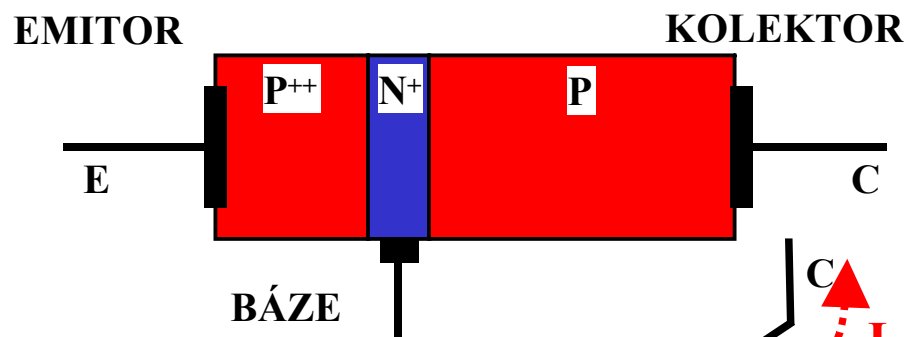
(b)

Tranzistor se nazývá PNP

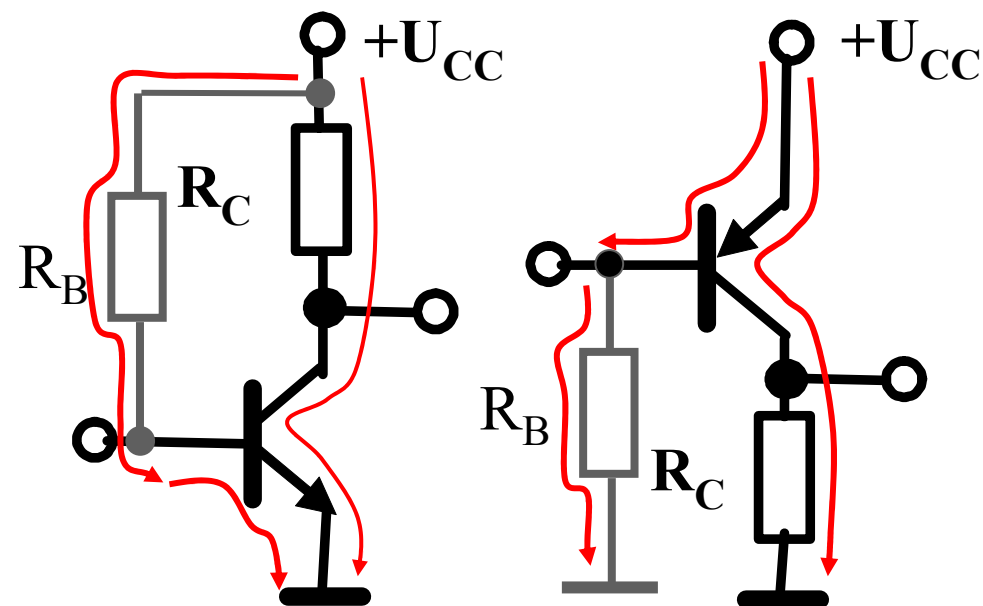
Bipolární tranzistor



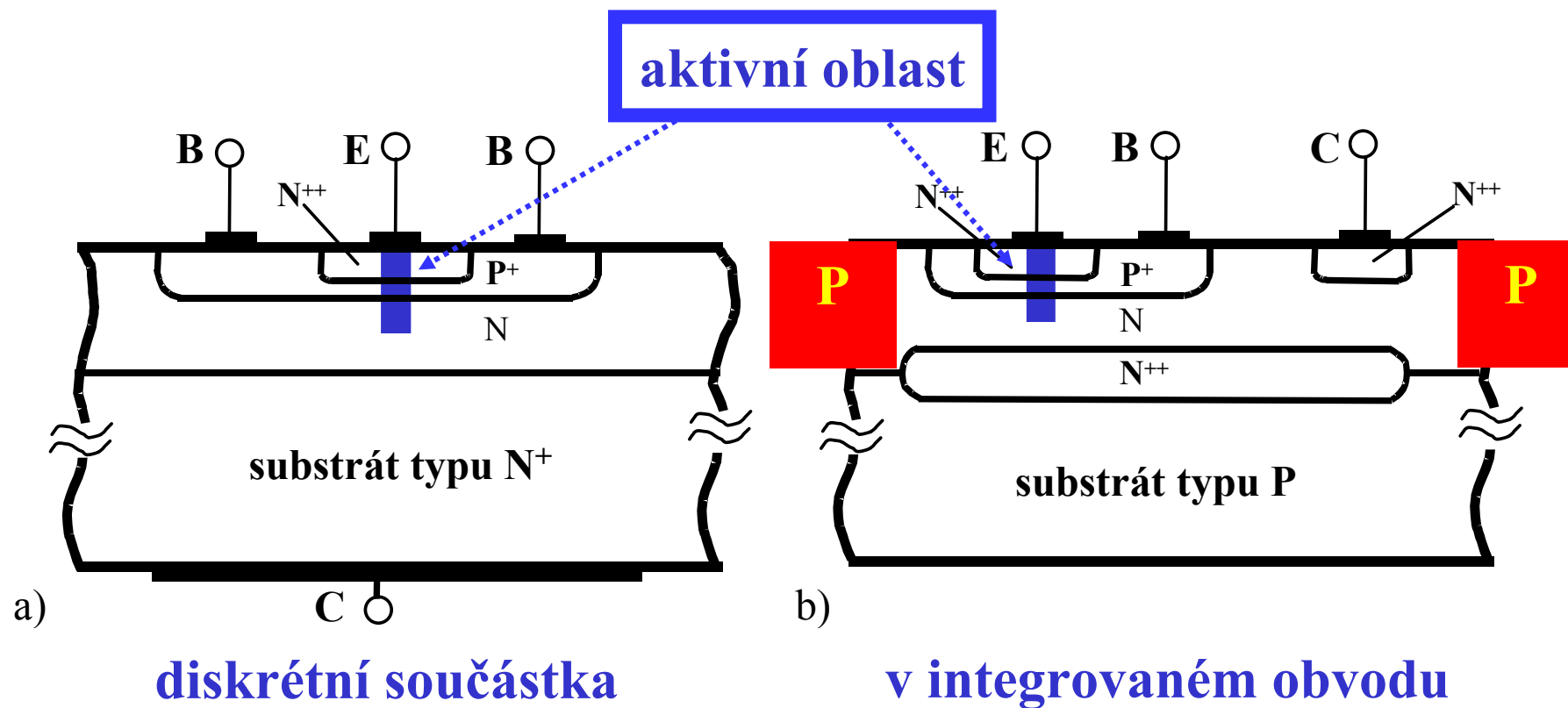
(a)



(b)



Bipolární tranzistor - realita

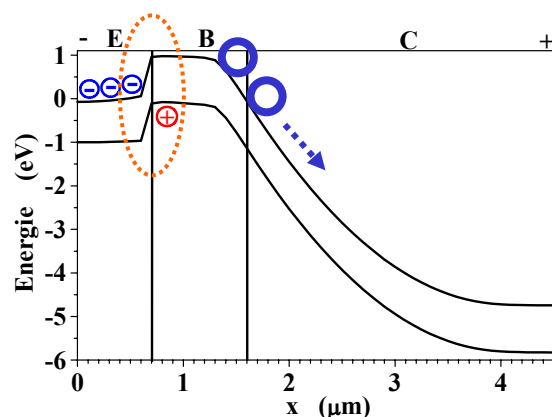


**p-n přechod
jako izolační kapsa**

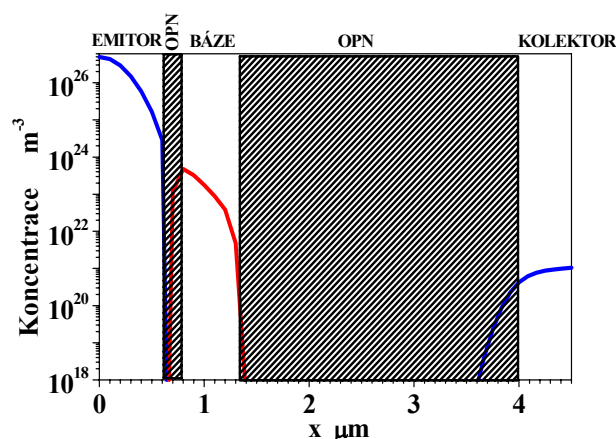
Bipolární tranzistor – režimy činnosti

Polarizace přechodu B-E	Polarizace přechodu B-C	Režim
$U_{BE} < U_P$	$U_{BC} \leq 0$	Nevodivý
$U_{BE} > 0$	$U_{BC} < 0$	Normální aktivní
$U_{BE} < 0$	$U_{BC} > 0$	Inverzní aktivní
$U_{BE} > U_P$	$U_{BC} \geq U_P$	Saturace

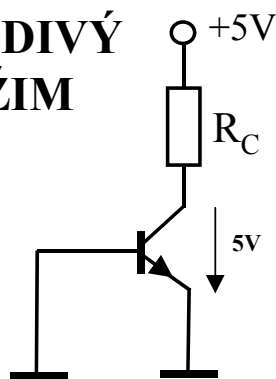
Bipolární tranzistor – nevodivý režim



Vysoká energetická bariéra
brání průchodu elektronů z E do B
a děr z B do E



**NEVODIVÝ
REŽIM**



Elektrony mohou přejít z B do C
a díry z C do B,
ale je jich málo (jsou minoritní)



teče jen malý závěrný proud
přechodu B-C.

Nazývá se **ZBYTKOVÝ** proud.

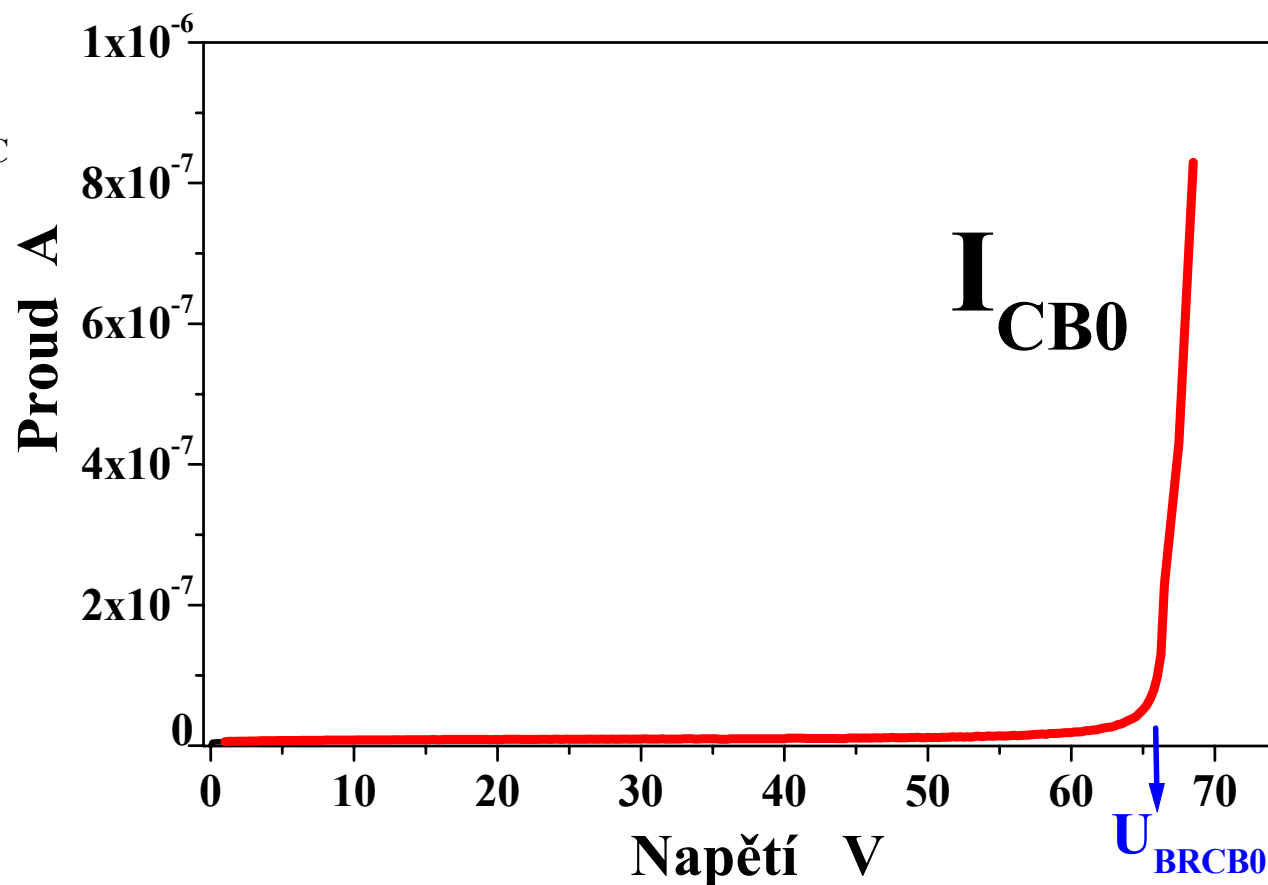
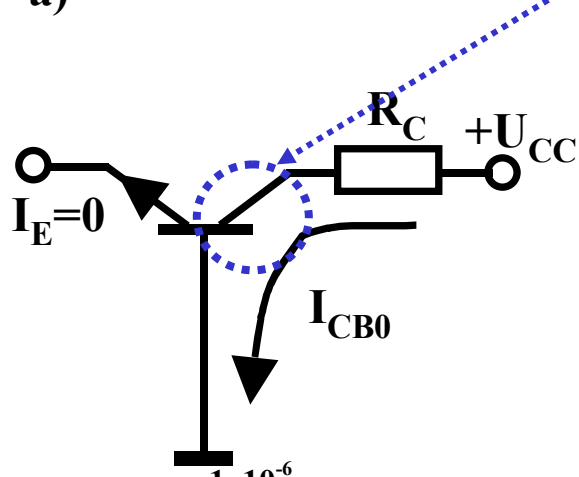
Bipolární tranzistor – zbytkové proudy

Závěrný proud přechodu B-C

⇒ **nejmenší** zbytkový proud

⇒ **nejvyšší** průrazné napětí

a)



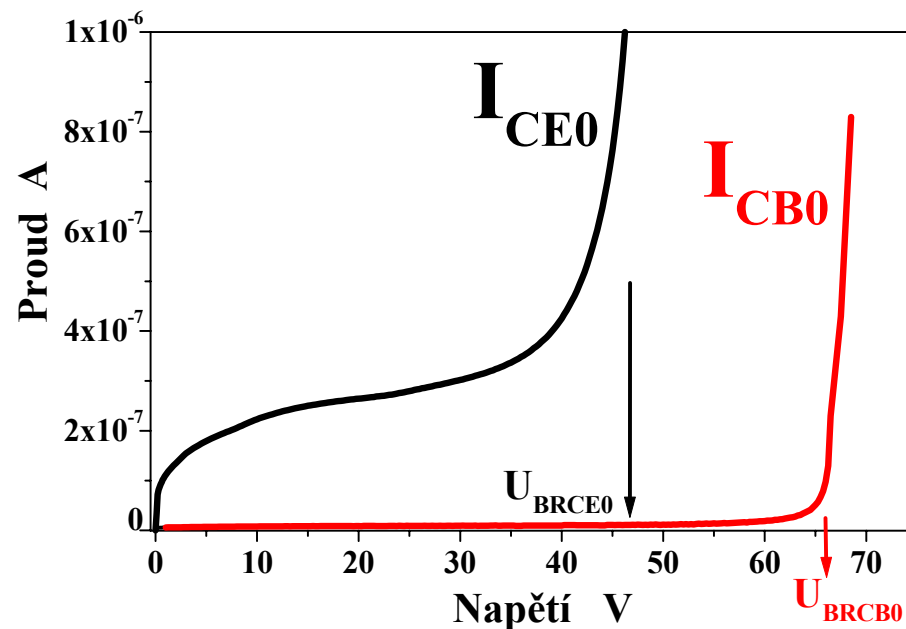
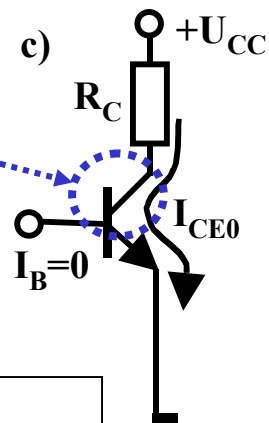
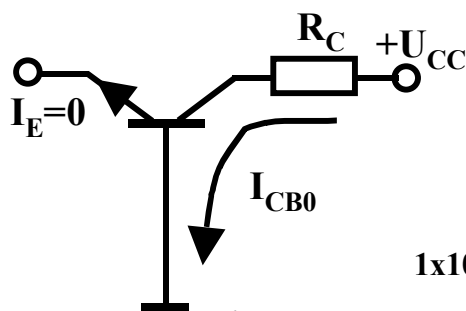
Bipolární tranzistor – zbytkové proudy

Závěrný proud přechodu B-C je zesílen na přechodu B-E

⇒ **největší** zbytkový proud

⇒ **nejnižší** průrazné napětí tranzistoru v tomto zapojení !!!

a)



Tranzistor
vybíráme na

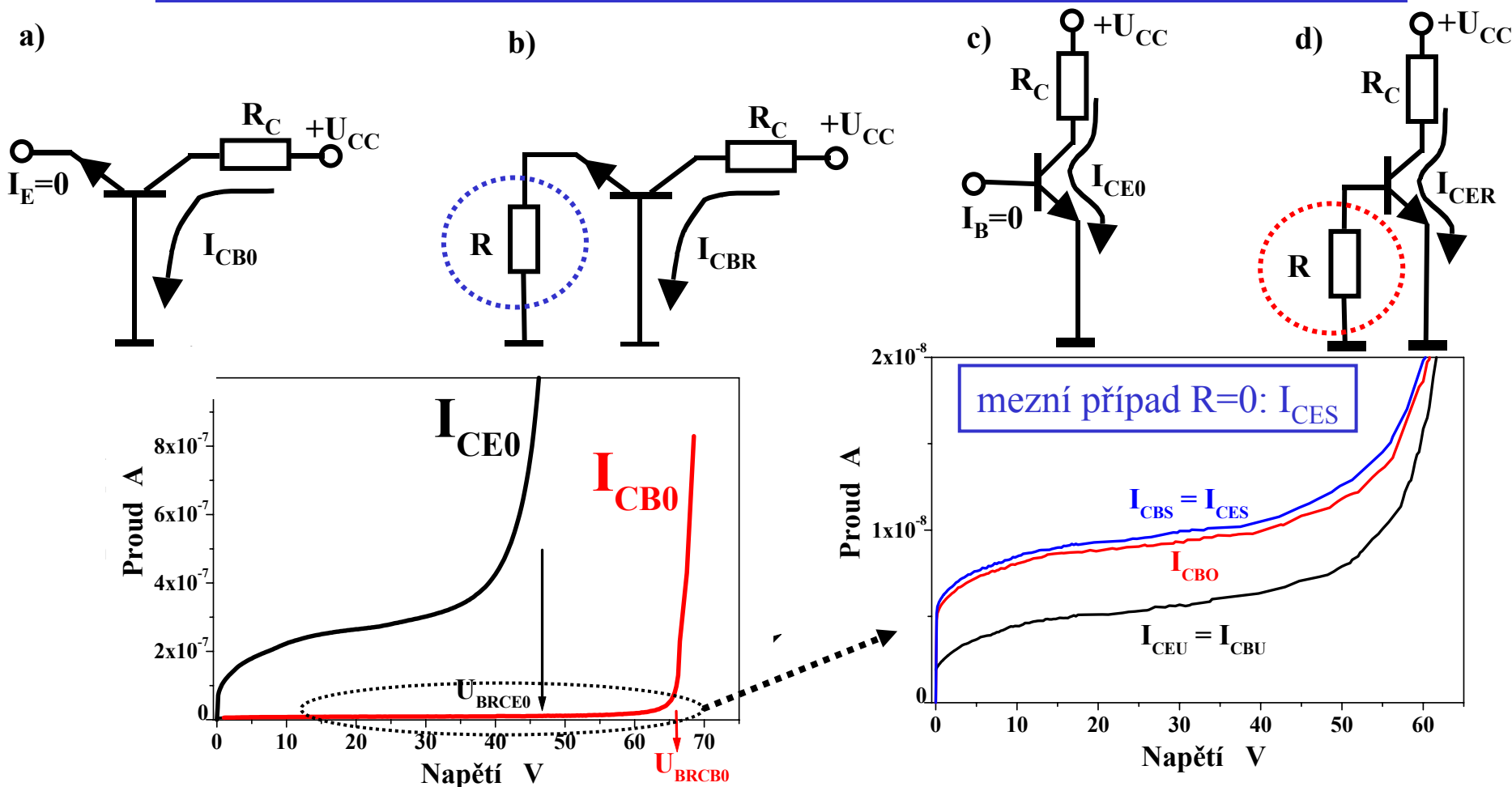
U_{BRCE0}

Bipolární tranzistor – zbytkové proudy

Rezistor R odvádí část závěrného proudu z tranzistoru

⇒ nižší zbytkový proud

⇒ vyšší průrazné napětí



Bipolární tranzistor – režimy činnosti

Polarizace přechodu B-E	Polarizace přechodu B-C	Režim
$U_{BE} < U_P$	$U_{BC} \leq 0$	Nevodivý
$U_{BE} > 0$	$U_{BC} < 0$	Normální aktivní
$U_{BE} < 0$	$U_{BC} > 0$	Inverzní aktivní
$U_{BE} > U_P$	$U_{BC} \geq U_P$	Saturace

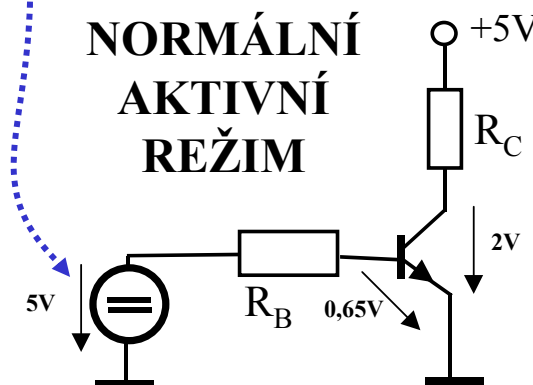
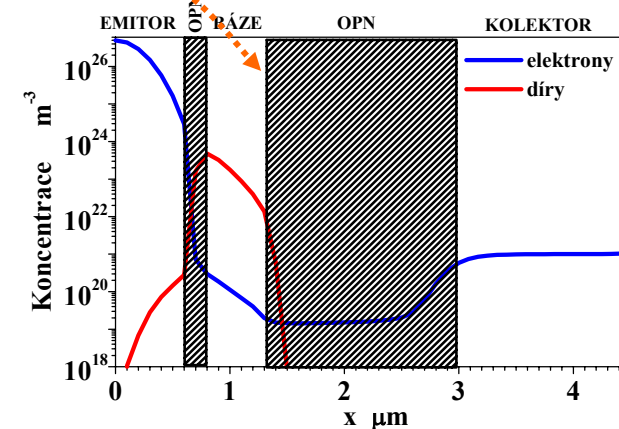
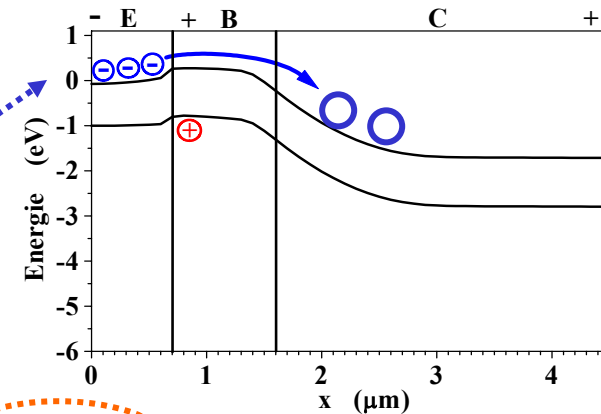
Bipolární tranzistor – normální aktivní režim

Propustná polarizace přechodu B-E
sníží energetickou bariéru
⇒ Injekce elektronů z E do B
a děr z B do E

Závěrná polarizace přechodu B-C
způsobí extrakci elektronů,
které prošly přes bázi k B-C
⇒ průtok velkého proudu z E do C

Aby prošel dostatek elektronů přes
bázi, musí být **tenká**. $w_B \ll L_{Dn}$

Tranzistorový jev:
Napětím U_{BE} řídíme proud I_C .



Bipolární tranzistor – normální aktivní režim

Koncentrace donorů v emitoru
je mnohem větší než akceptorů v bázi

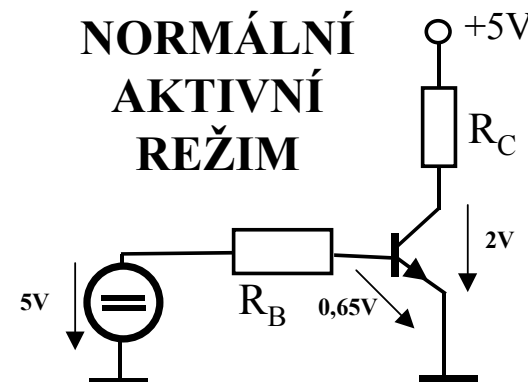
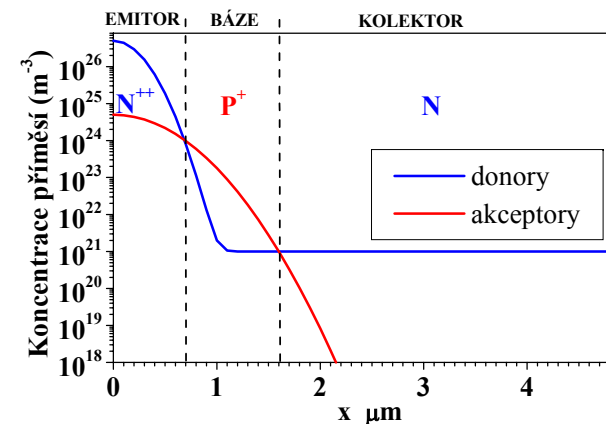
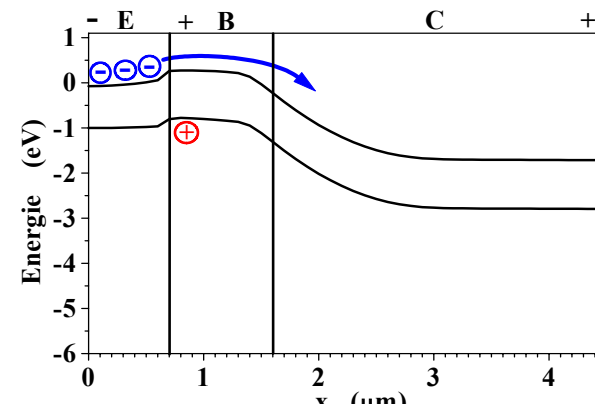
⇒ injekce elektronů z E do B
je mnohem větší než děr z B do E

⇒ **PROUDOVÉ ZESÍLENÍ**

$$N_D \sim 100 \times N_A$$

⇒ proudové zesílení mezi báží
a emitorem je ~ 100

PROUDOVÉ ZESÍLENÍ
vytváří přechod B-E



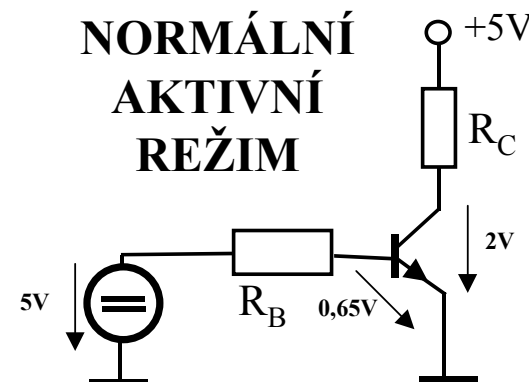
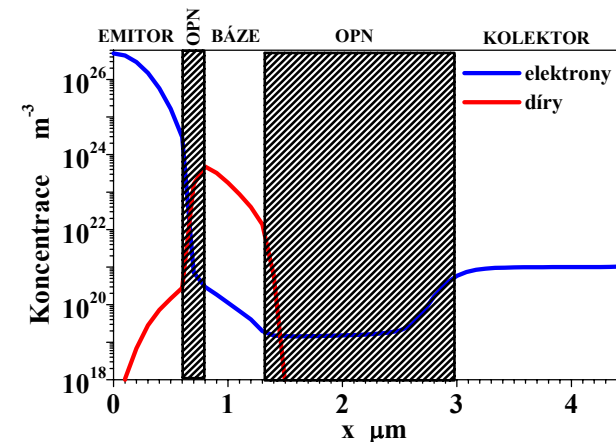
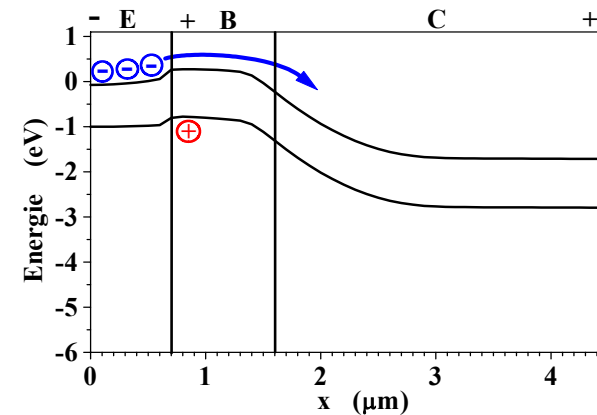
Bipolární tranzistor – normální aktivní režim

Proud do báze je nežádoucí důsledek

1. injekce děr do emitoru
2. rekombinace děr s elektrony v bázi.

Díry na bázevé straně přechodu B-E být musí. Potřebujeme zde kladný potenciál.

Snížení počtu děr injektovaných z B do E
a odtud malý proud báze pro zajištění
velkého proudu kolektoru
zajistí $N_D \sim 100 \times N_A$
 \Rightarrow proudové zesílení ~ 100

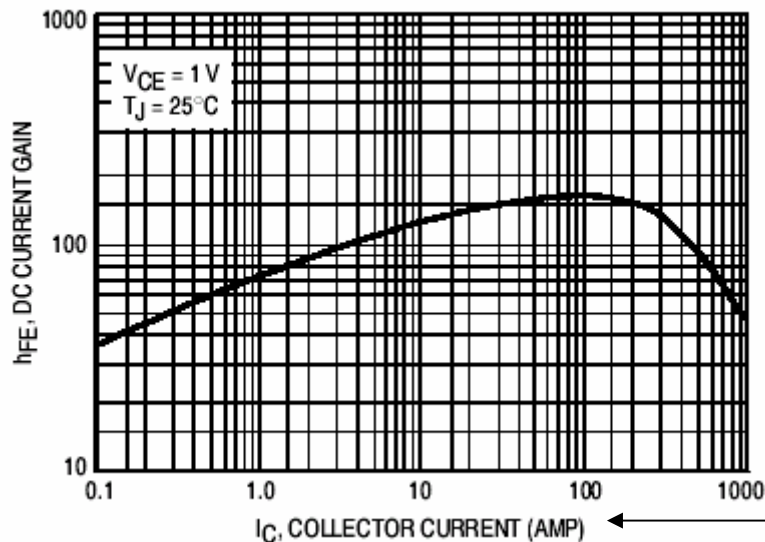


Bipolární tranzistor – proudový zesilovací činitel

$$h_{21E} = h_{FE} = I_C / I_B \sim 100$$

v zapojení se společným Emitorem

DC Current Gain ($I_C = 100 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ V}$)	BC337	h_{FE}	100	–	630	–
	BC337–16		100	–	250	
	BC337–25/BC338–25		160	–	400	
	BC337–40		250	–	630	
($I_C = 300 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ V}$)			60	–	–	



$h_{21E}(h_{FE})$ není konstanta,
závisí na proudu kolektoru !!!

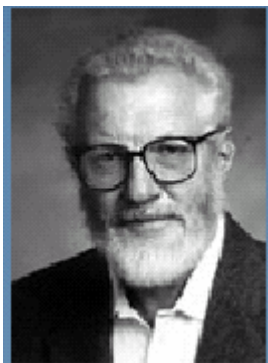
logaritmická stupnice

Jak zvýšit proudové zesílení a mezní kmitočet?

vf tranzistor – Si nebo $A^{III}B^V$?



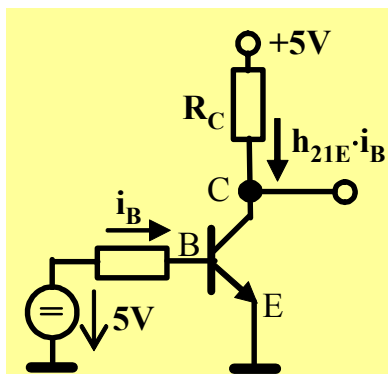
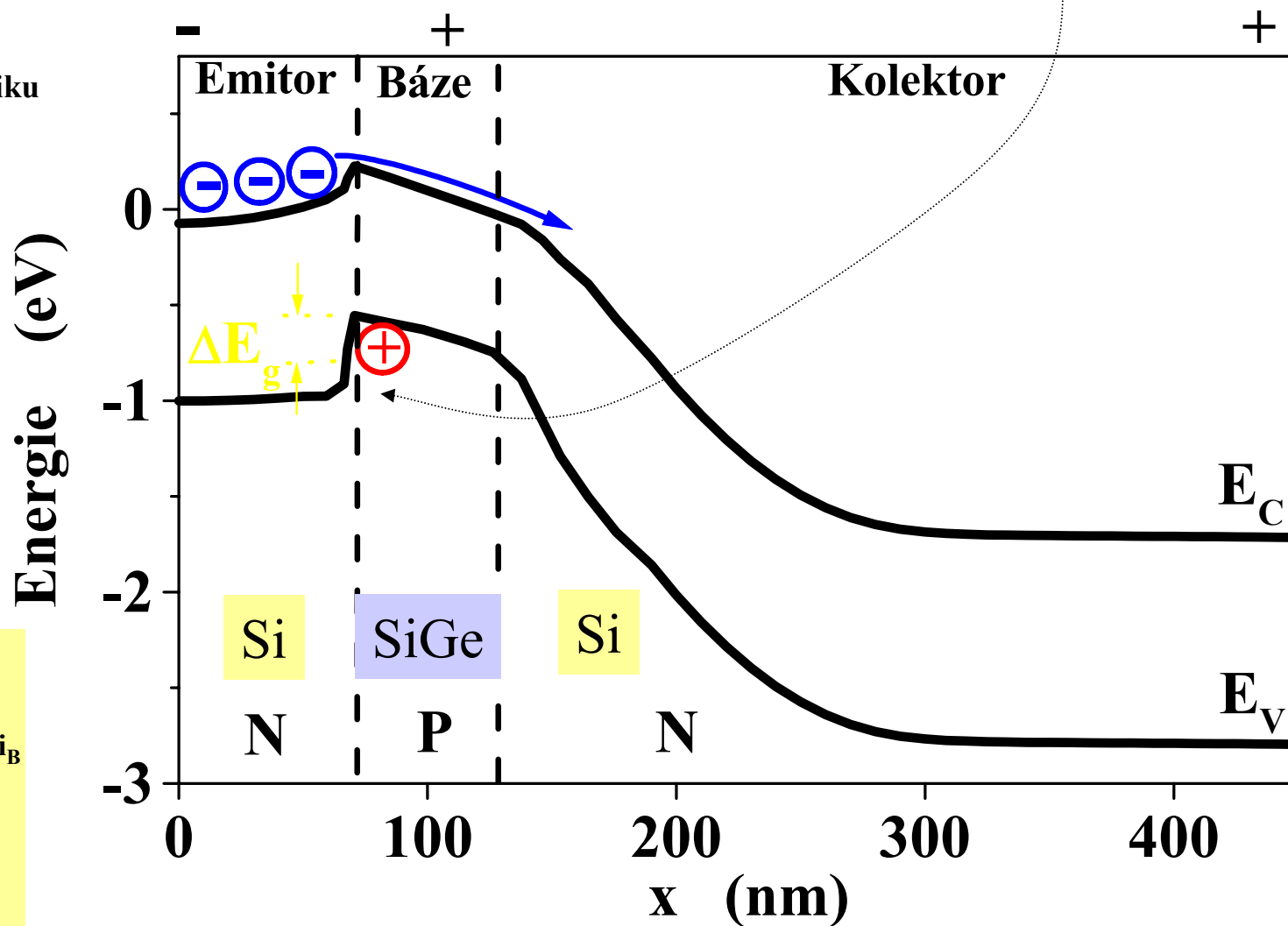
$f_T \sim 200 \text{ GHz}$



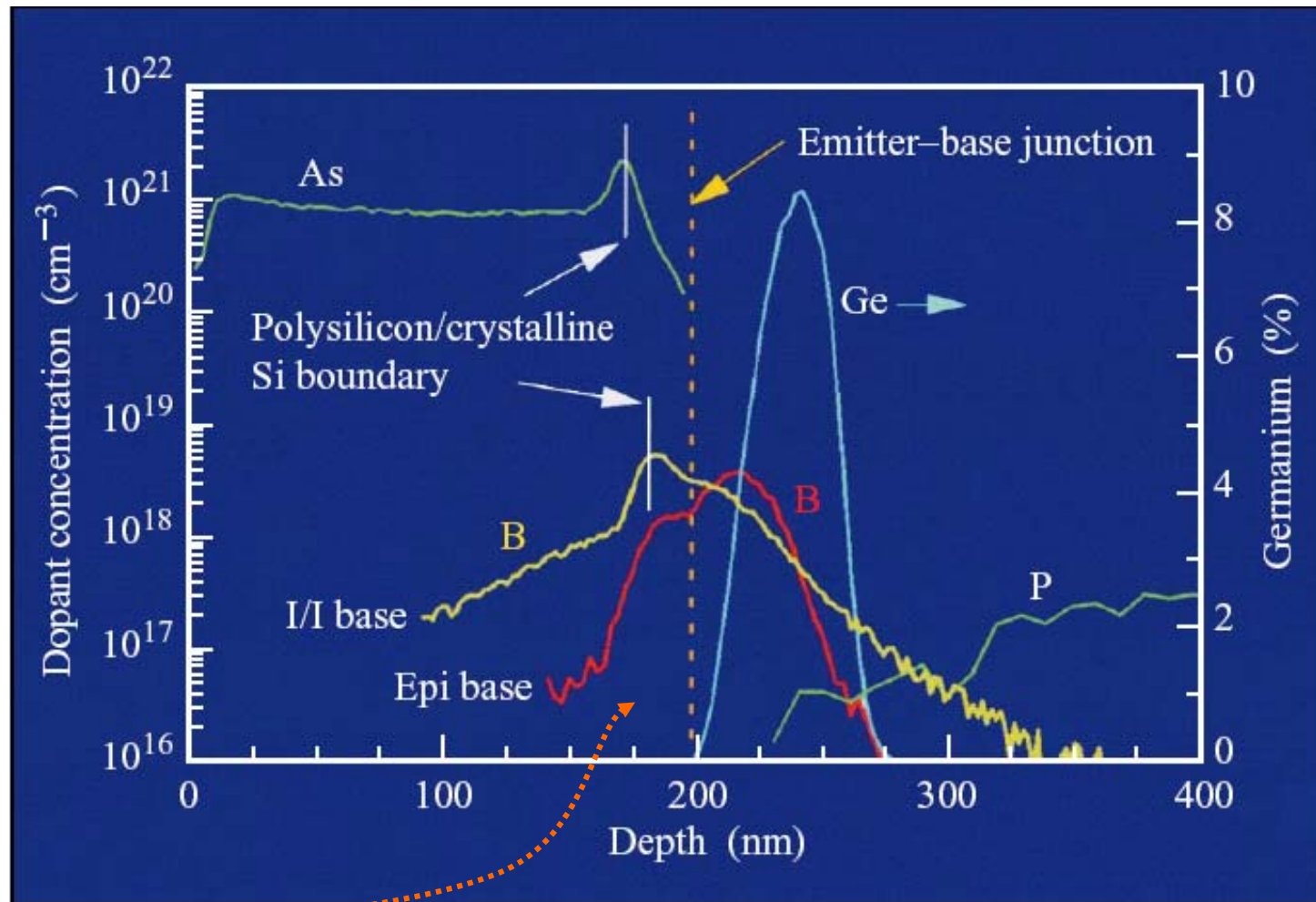
H. Kroemer
Nobelova cena za fyziku

Metody zvýšení proudového zesílení

SiGe - bipolární tranzistor s heteropřechodem



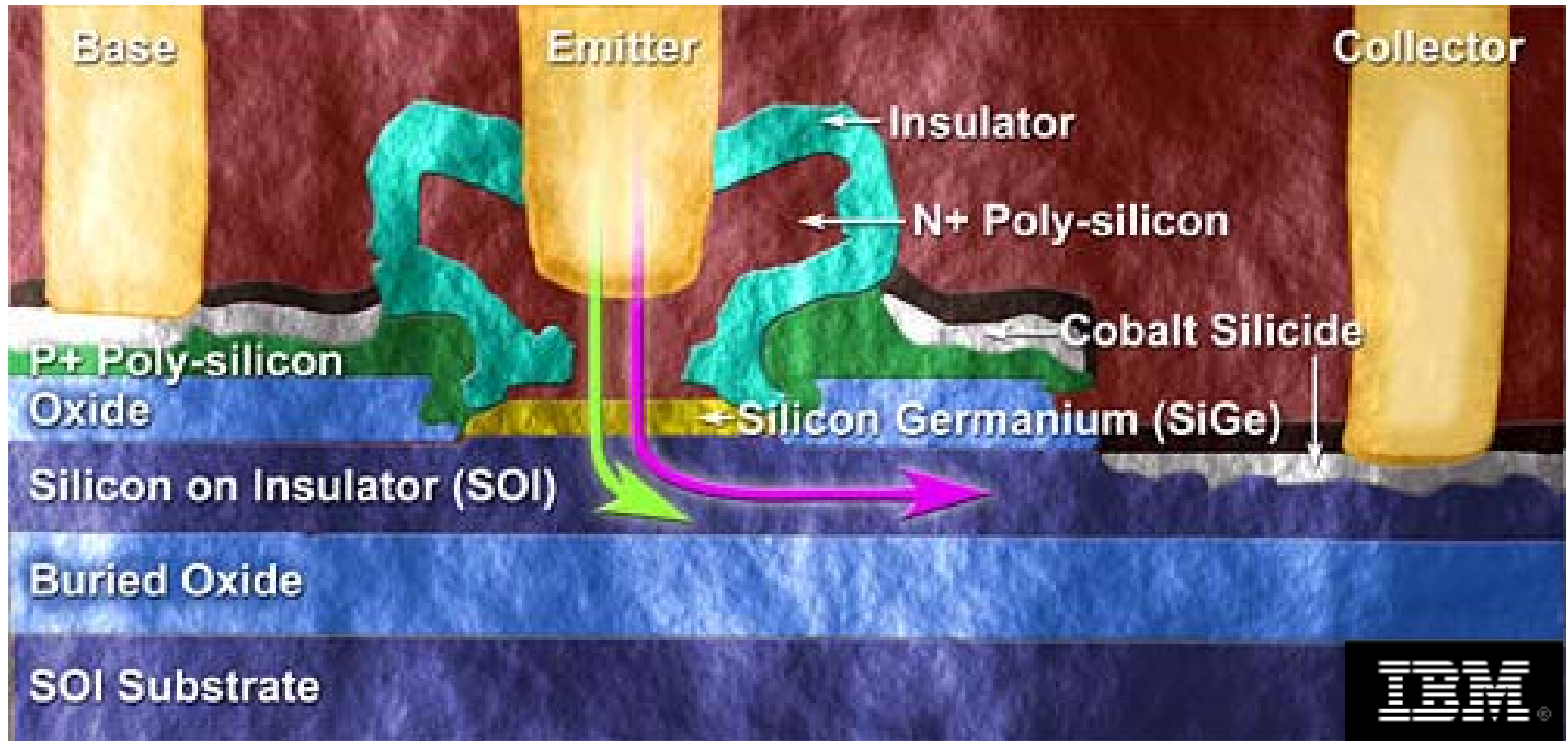
SiGe HBT (*Heterojunction Bipolar Transistor*)



Epitaxní báze: lepší řízení tloušťky a dotace $\Rightarrow w_B \downarrow, N_B \uparrow, R_B \downarrow, f_T \uparrow$

Gradovaná koncentrace Ge v bázi: \Rightarrow přídatné el. pole $\Rightarrow f_T \uparrow$

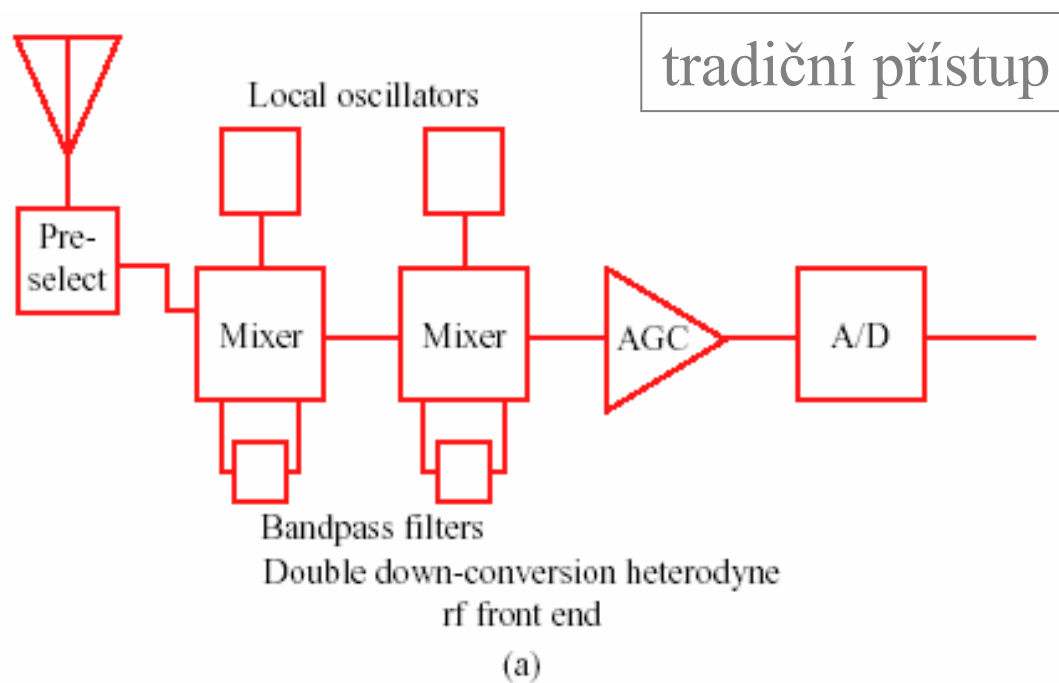
SiGe HBT



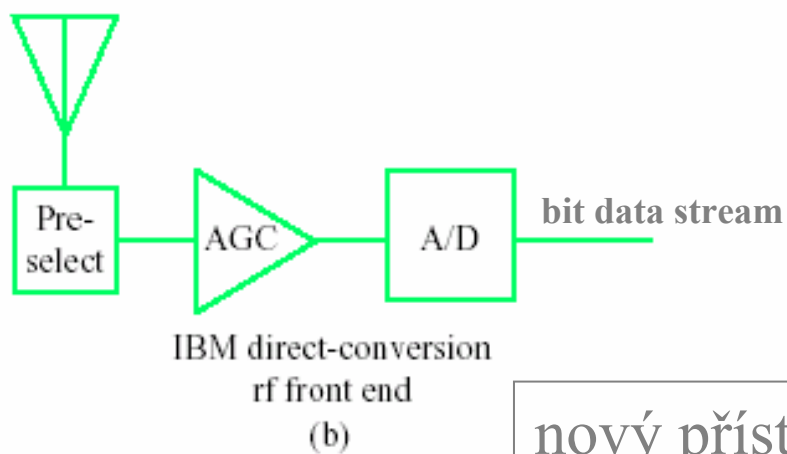
2001: 210 GHz SiGe HBT

2002: 350 GHz SiGe HBT

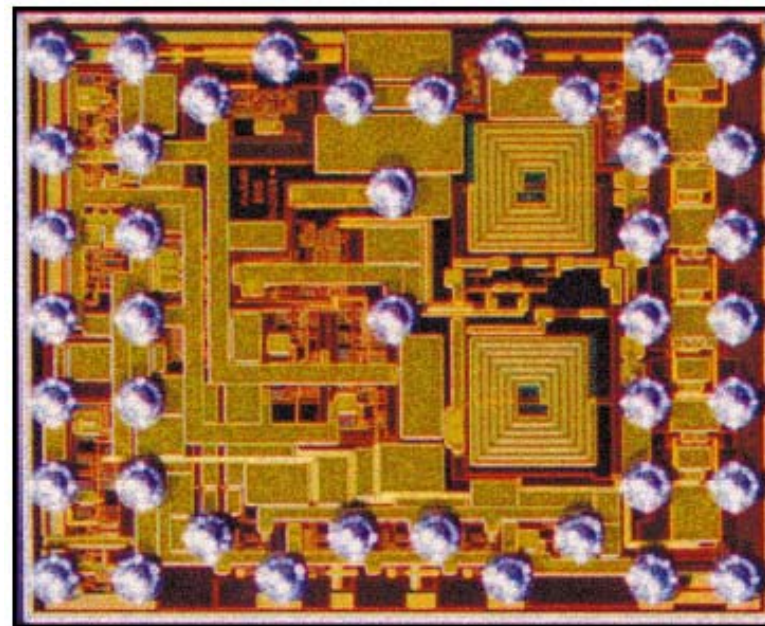
SiGe HBT



GPS radio front end



nový přístup



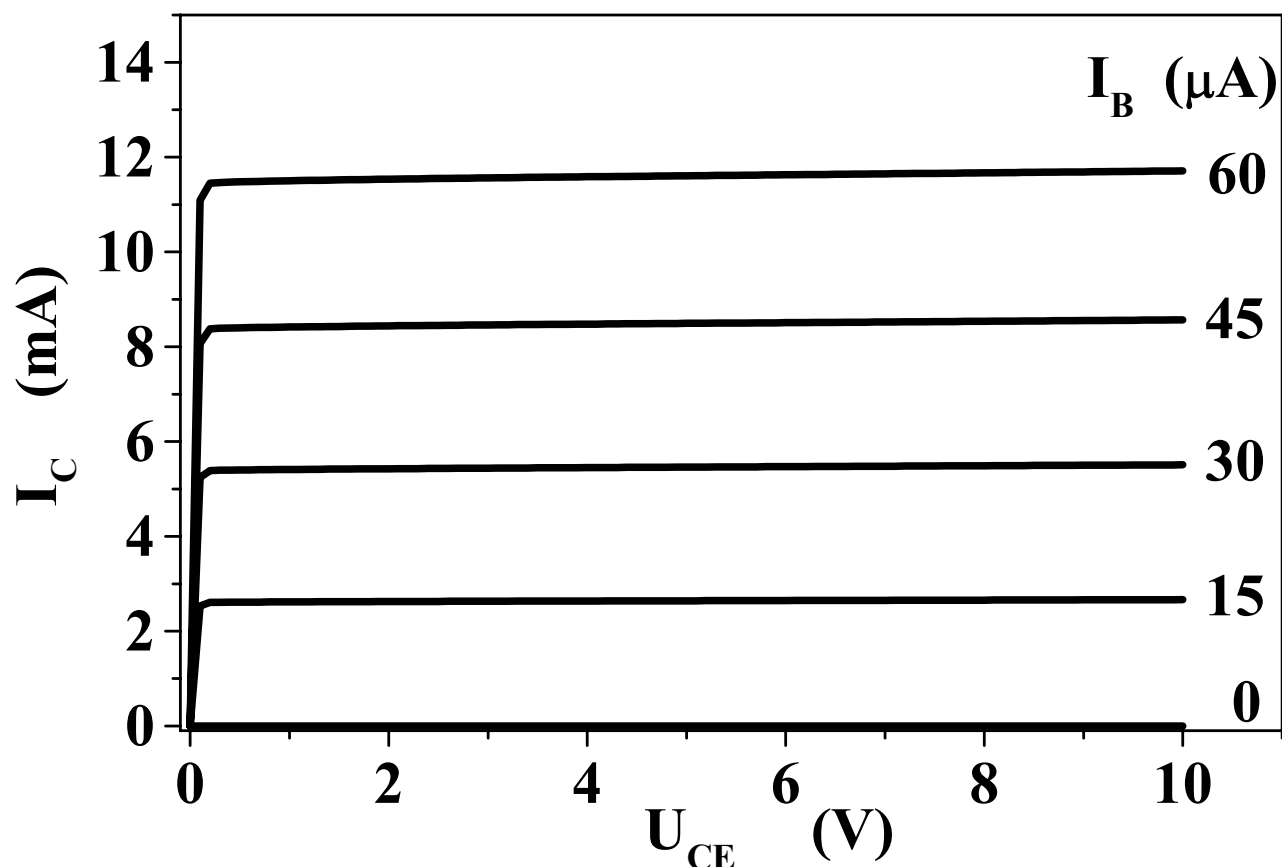
Bipolární tranzistor

pokračování

Bipolární tranzistor – výstupní charakteristiky

Čím větší je U_{BE} , tím více se sníží energ. bariéra a teče větší proud.

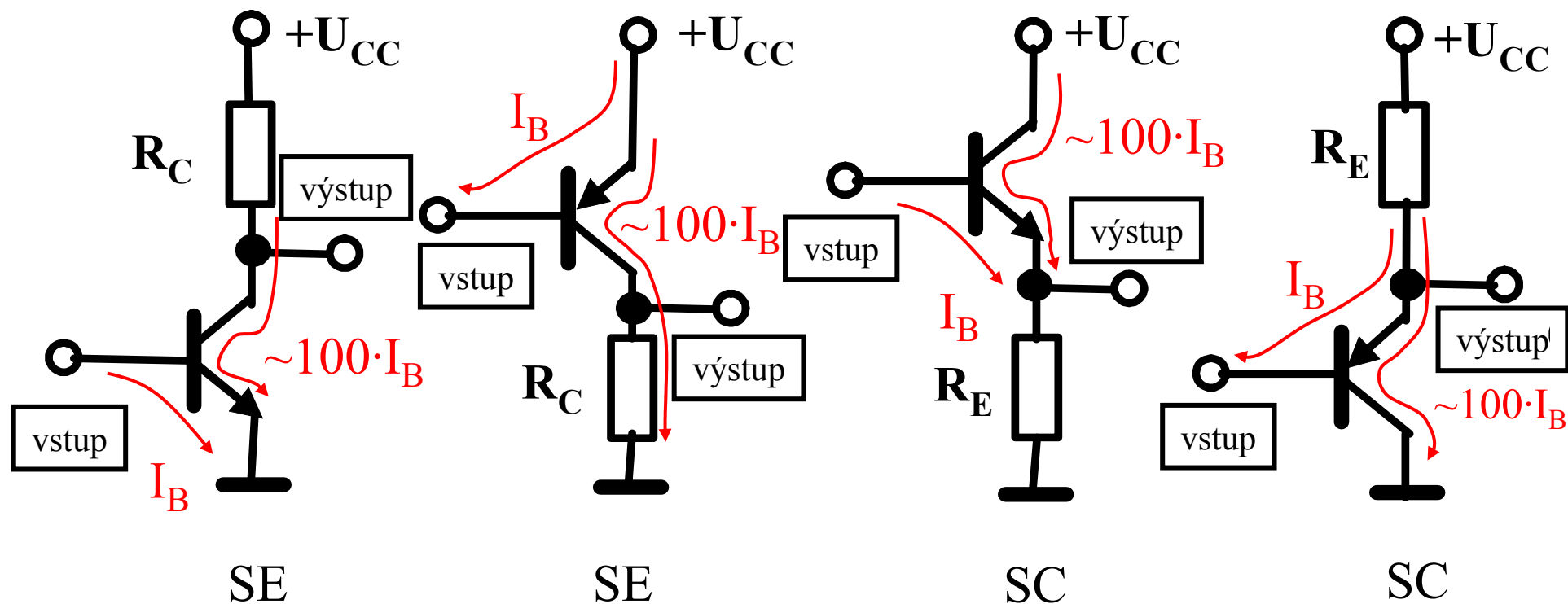
$$I_C \approx I_E = I_0 \cdot \left(\exp \frac{eU_{BE}}{kT} - 1 \right)$$



Tranzistor se chová jako zdroj proudu v širokém rozsahu napětí U_{CE} (U_{CB}).

Bipolární tranzistor

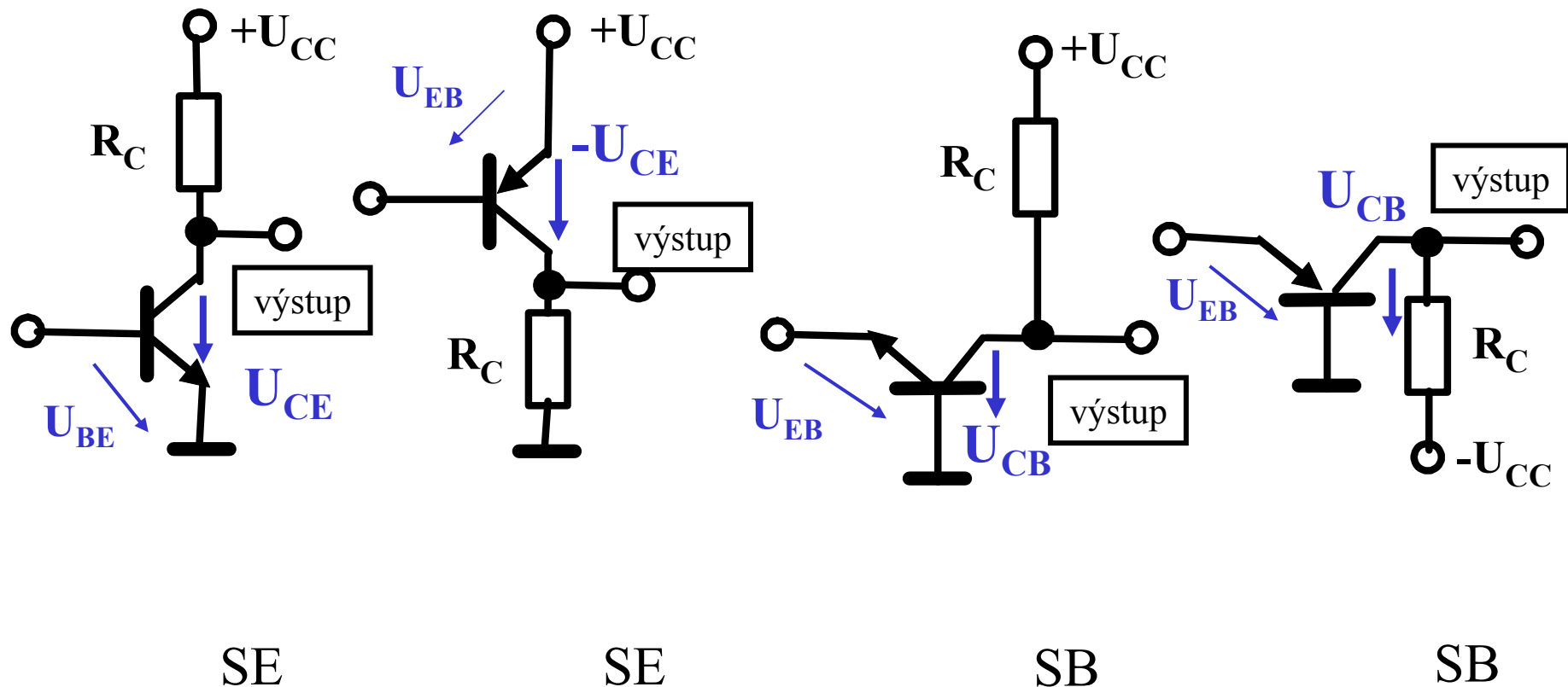
Zesiluje proud v těch konfiguracích, kdy je vstupem báze.



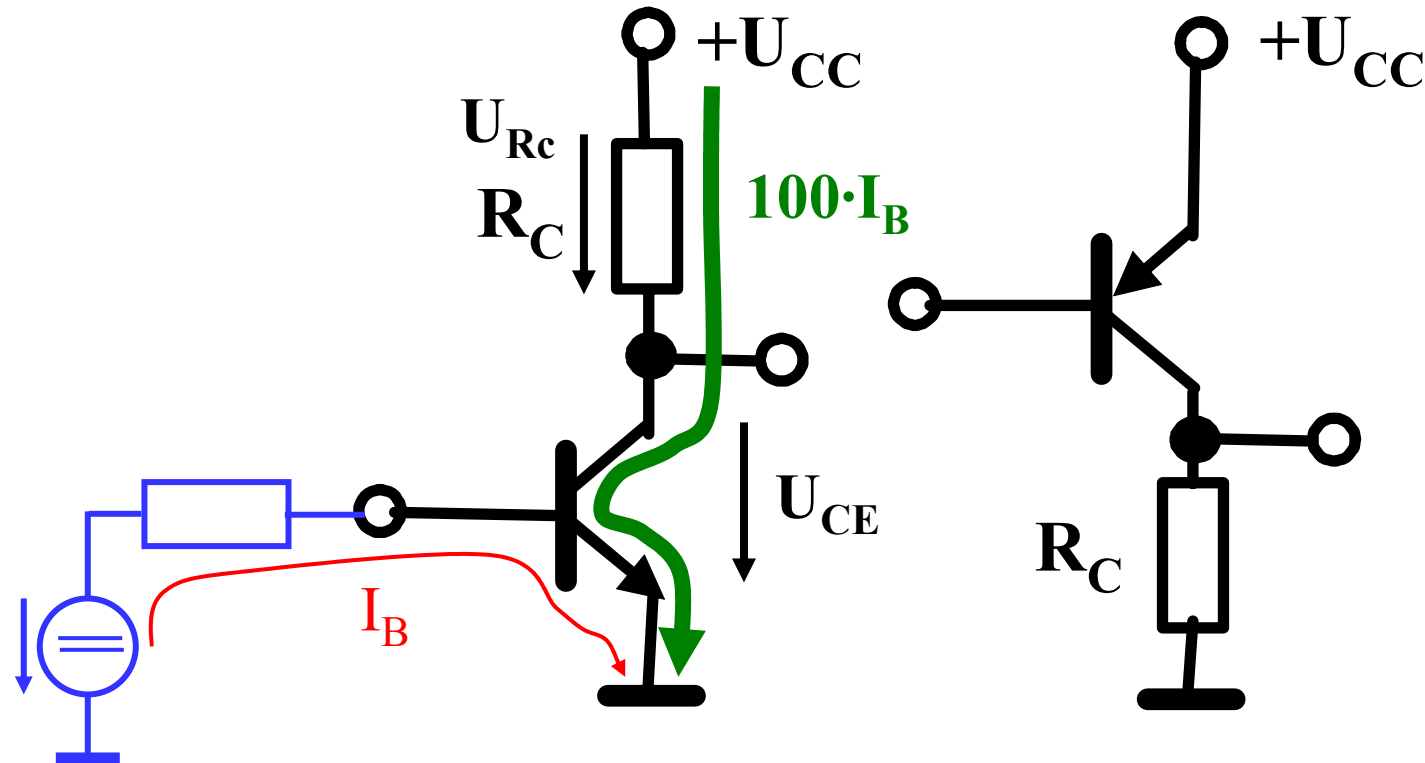
Bipolární tranzistor

Zesiluje napětí v těch konfiguracích, kdy je výstupem kolektor.

Potom malým vstupním napětím U_{BE} (U_{EB}) 0 až 0,7V ovládáme velké výstupní napětí U_{CE} (U_{CB}) 0 až U_{CC} .



Bipolární tranzistor – mechanismus napět'ového zesílení



1. Přivedeme vstupní napětí

2. Proteče proud báze

3. Proteče proud kolektoru $100 \cdot I_B$

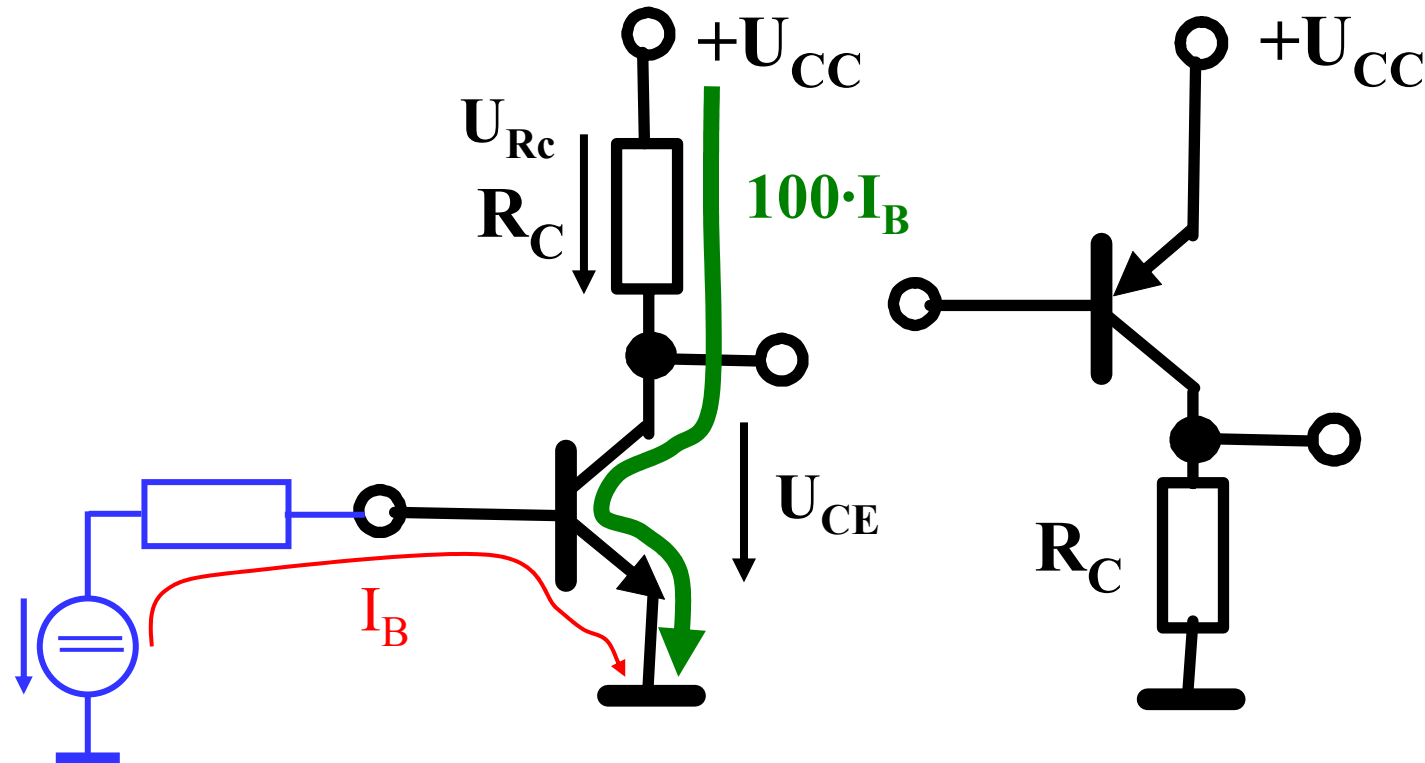
~ 100

4. Vzroste úbytek napětí na R_C na hodnotu $U_{RC} = h_{21E} \cdot I_B \cdot R_C$

Poklesne napětí U_{CE} z hodnoty $U_{CE} = U_{CC}$

na hodnotu $U_{CE} = U_{CC} - U_{RC} = U_{CC} - h_{21E} \cdot I_B \cdot R_C$

Bipolární tranzistor – mechanismus napět'ového zesílení

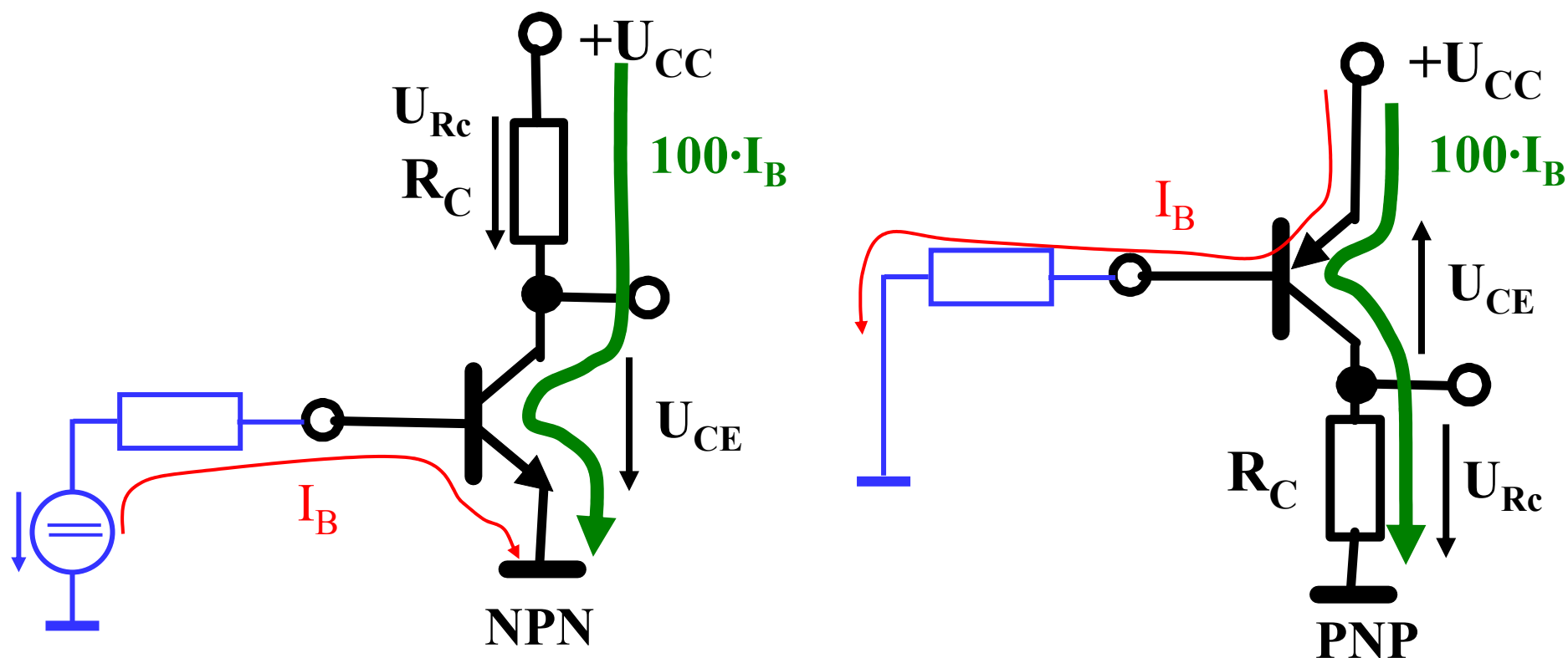


Poklesne napětí U_{CE} z hodnoty $U_{CE} = U_{CC}$ na hodnotu
$$U_{CE} = U_{CC} - U_{RC} = U_{CC} - h_{21E} \cdot I_B \cdot R_C$$

Malý nárůst U_{BE} způsobí velký pokles U_{CE} .

Tranzistor zesiluje a invertuje !!!

Bipolární tranzistor – mechanismus napět'ového zesílení



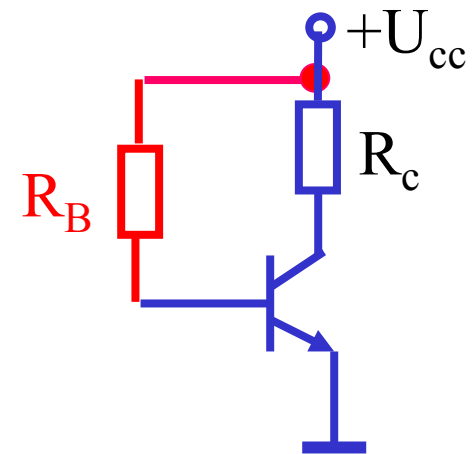
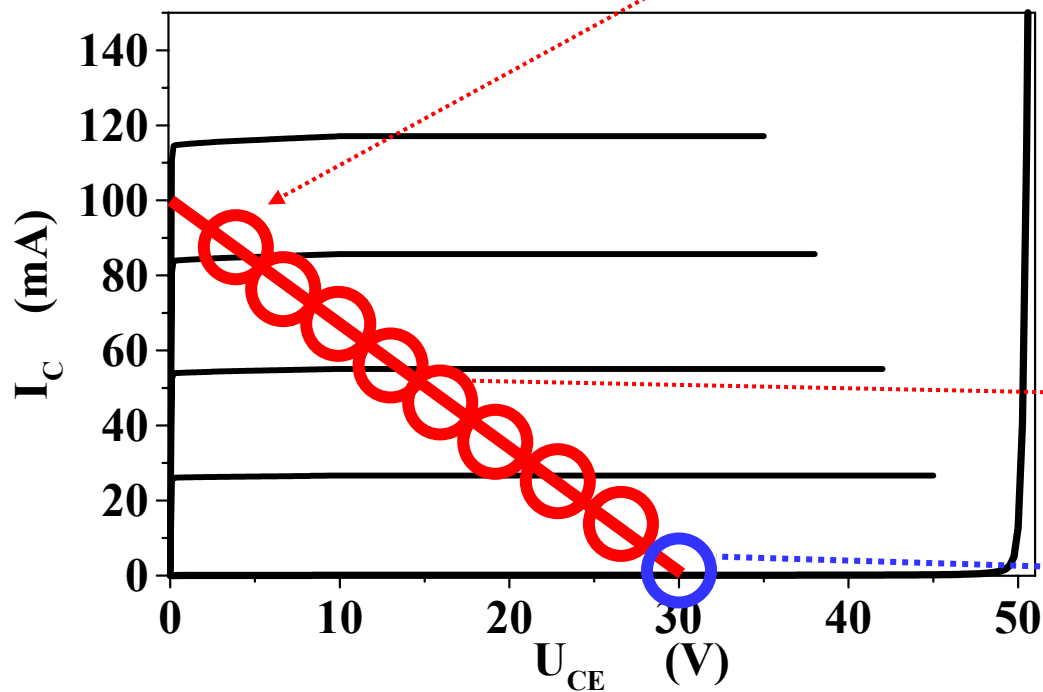
Princip zesilování napětí je shodný pro NPN a PNP.

Zátěž (R_C) zapojena
proti $+U_{CC}$

Zátěž (R_C) zapojena
proti zemi

Bipolární tranzistor

Normální aktivní režim – zesilovač
sepnutý stav spínače



Aktivní režim

Nevodivý režim

Bipolární tranzistor - příklad

Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

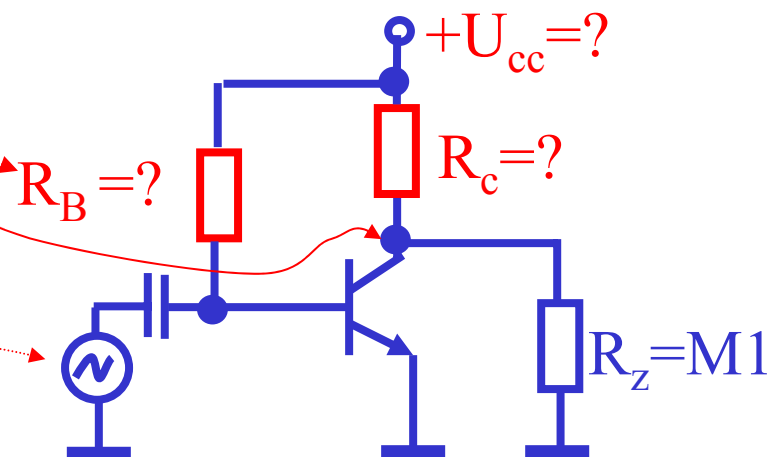
$$u_{\text{výstšš}} = 6 \text{ V}, R_z = 100 \text{ k}\Omega$$

$$u_{\text{vstšš}} = 60 \text{ mV}, h_{21e} = 100$$

Volba U_{CC} :

$$u_{\text{výstšš}} = 6 \text{ V}$$

$$U_{CC} = 6 \text{ V (min.)}$$



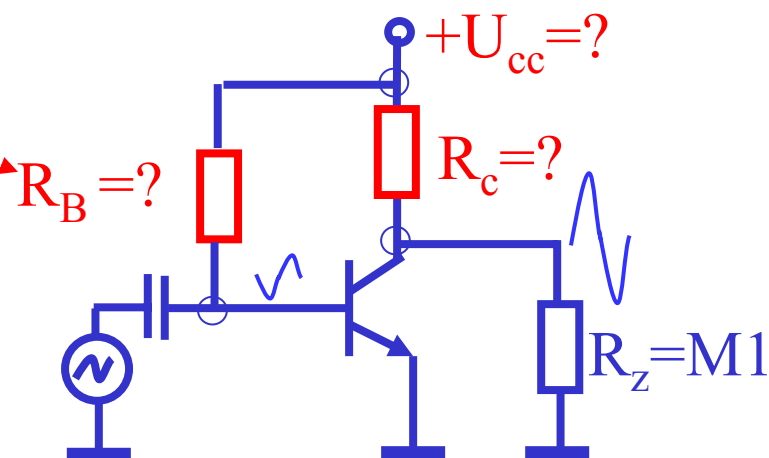
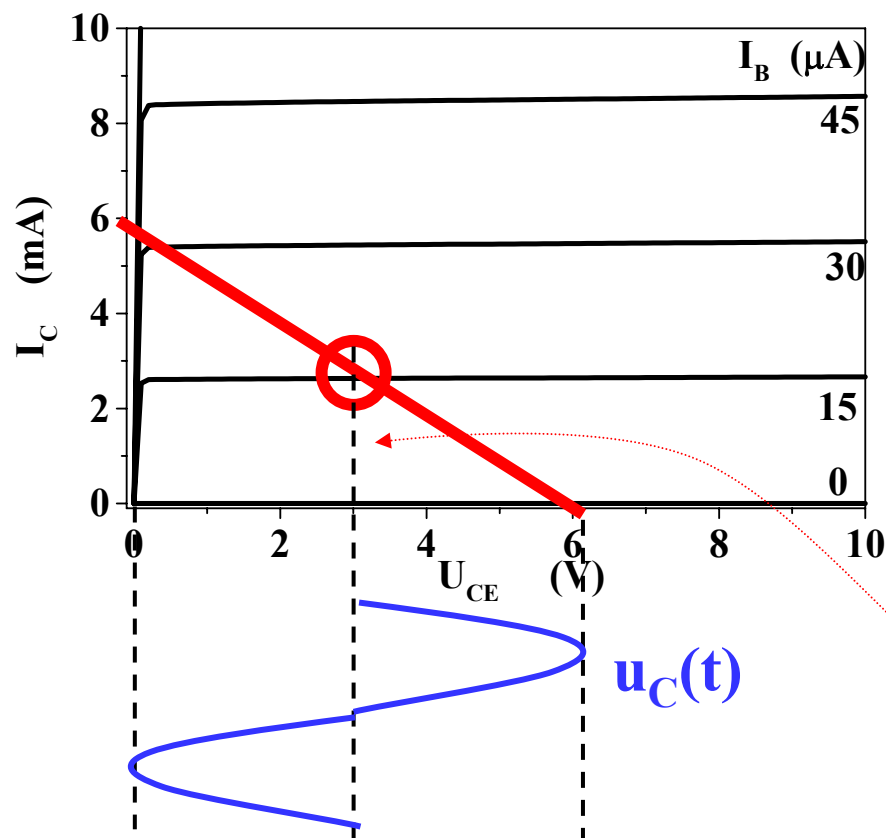
Bipolární tranzistor - příklad

Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

$u_{\text{výstš}} = 6 \text{ V}$, $R_z = 100 \text{ k}\Omega$

$u_{\text{vstš}} = 60 \text{ mV}$, $h_{21e} = 100$



TŘÍDA A:

1 tranzistor zesílí obě půlvlny
s min. zkreslením na max. $u_{\text{šš}}$

Hodnota R_B taková, aby:

$$U_{CE} = U_{CC}/2 = 3 \text{ V}$$

Bipolární tranzistor - příklad

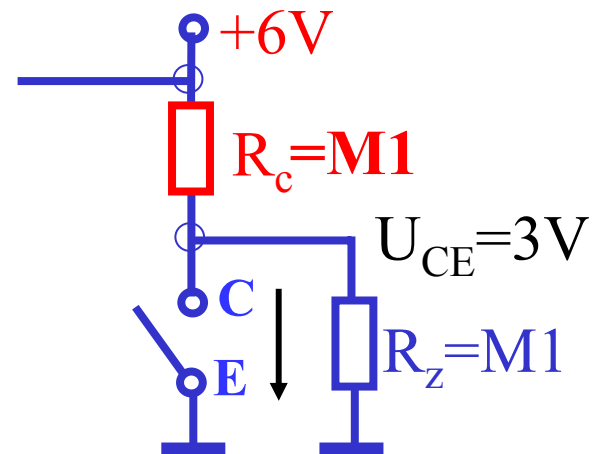
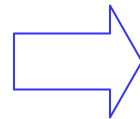
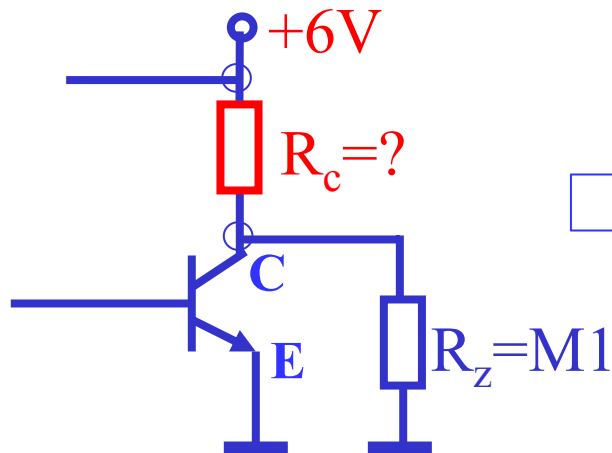
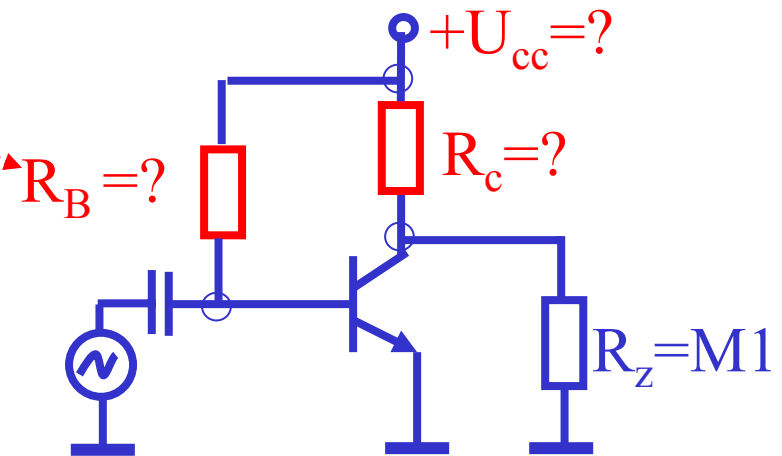
Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

$$u_{\text{výstš}} = 6 \text{ V}, R_z = 100 \text{ k}\Omega$$

$$u_{\text{vstš}} = 60 \text{ mV}, h_{21e} = 100$$

Volba R_C :



Bipolární tranzistor - příklad

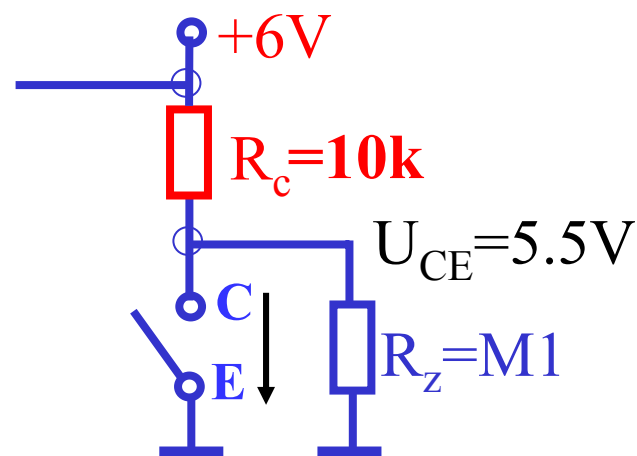
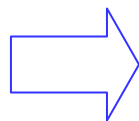
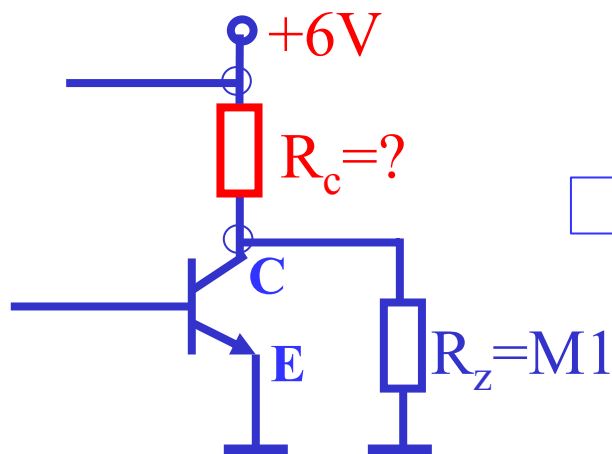
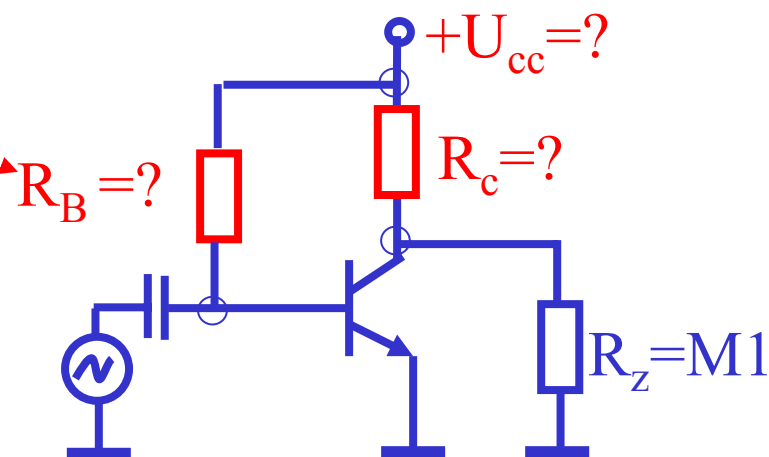
Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

$$u_{\text{výstš}} = 6 \text{ V}, R_z = 100 \text{ k}\Omega$$

$$u_{\text{vstš}} = 60 \text{ mV}, h_{21e} = 100$$

Volba R_C :



Bipolární tranzistor - příklad

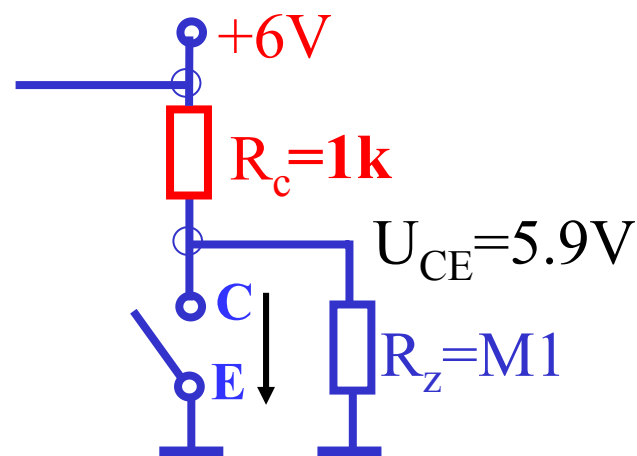
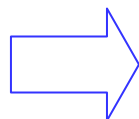
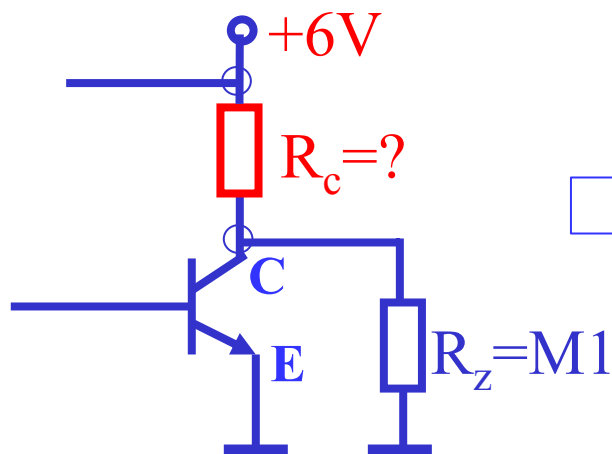
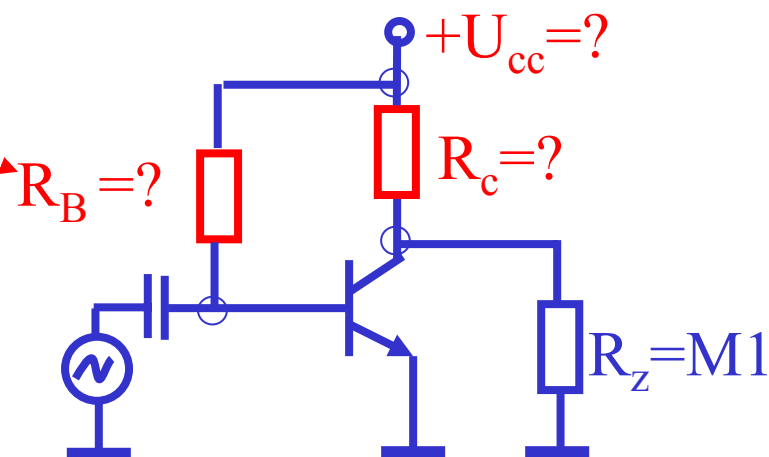
Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

$$u_{\text{výstš}} = 6 \text{ V}, R_z = 100 \text{ k}\Omega$$

$$u_{\text{vstš}} = 60 \text{ mV}, h_{21e} = 100$$

Volba R_C :



Bipolární tranzistor - příklad

Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

$$u_{\text{výstšš}} = 6 \text{ V}, R_z = 100 \text{ k}\Omega$$

$$u_{\text{vstšš}} = 60 \text{ mV}, h_{21e} = 100$$

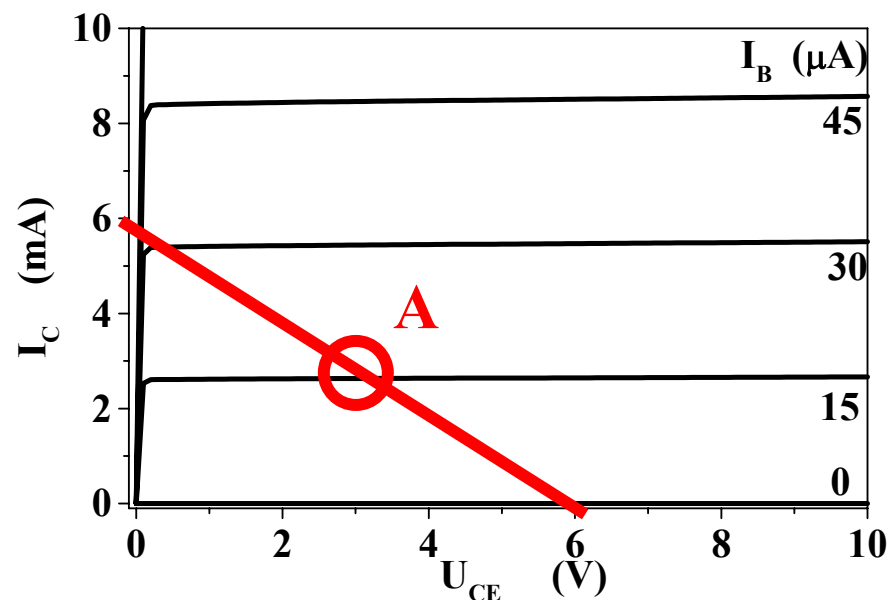
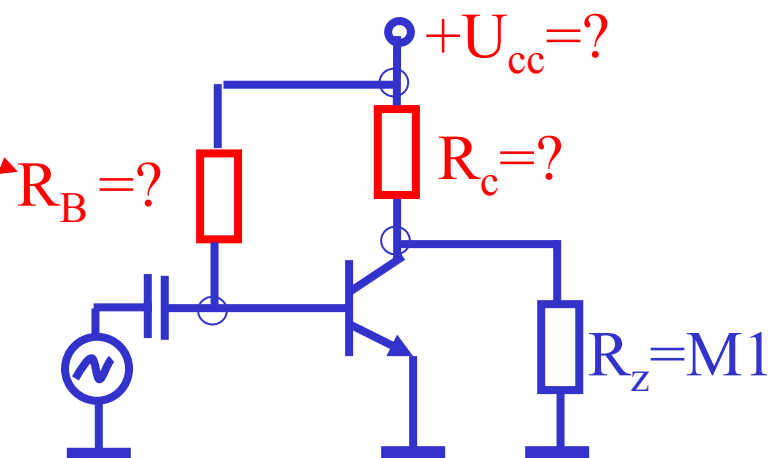
$$R_z = 100 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_c \ll R_z$$

Platí:

$$A_u = (h_{21e}/h_{11e}) \cdot R_c$$
$$h_{21e} = 100, h_{11e} \sim 1000$$

Chceme:

$$A_u = 100 = (h_{21e}/h_{11e}) \cdot R_c$$
$$\Rightarrow R_c \text{ volíme } 1 \text{ k}\Omega$$



Bipolární tranzistor - příklad

Normální aktivní režim – zesilovač ve třídě A

Dáno: zesilovač ve třídě A

$$u_{\text{výstšš}} = 6 \text{ V}, R_z = 100 \text{ k}\Omega$$

$$u_{\text{vstšš}} = 60 \text{ mV}, h_{21e} = 100$$

$$R_z = 100 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_c \ll R_z$$

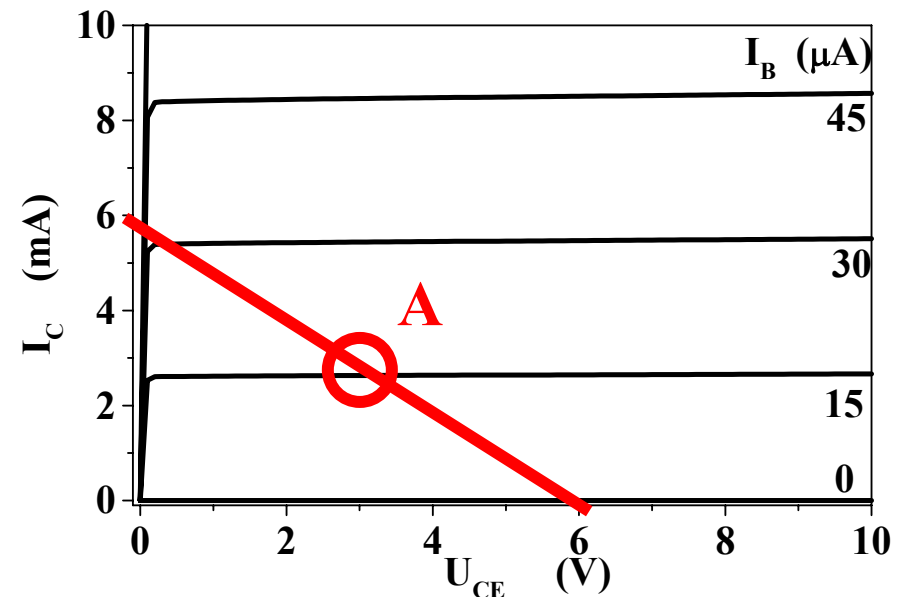
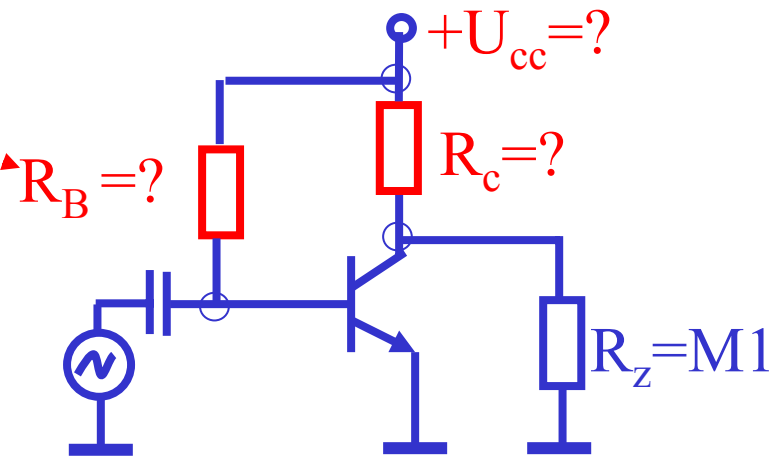
$$A_u = (h_{21e} / h_{11e}) \cdot R_c$$

R_c volíme 1 k Ω

$$u_{\text{výstšš}} \leq 6 \text{ V} \Rightarrow U_{cc} \approx 6 \text{ V}, U_{CE} = 3 \text{ V}$$

$$I_C = (U_{CC} - U_{CE}) / R_C = 3 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} R_B &= [(U_{cc} - U_{BE}) \cdot h_{21e}] / I_C \\ &= [(6 - 0,7) \cdot 100] / 0,003 = \\ &= 176 \text{ k}\Omega \Rightarrow \text{volíme } 180 \text{ k} \end{aligned}$$



... konec