

Bipolární tranzistor



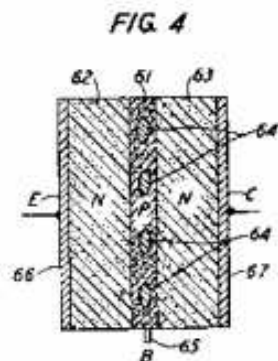
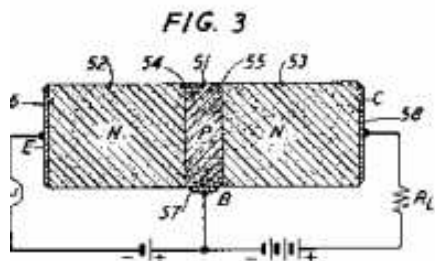
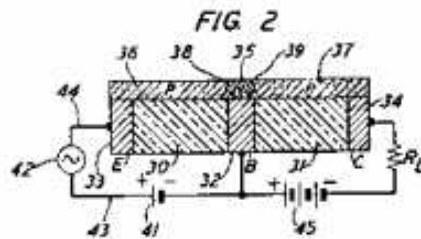
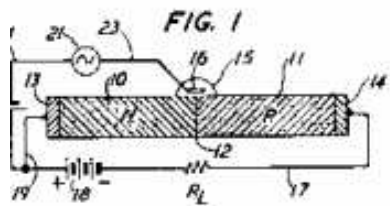
Bardeen

Brattain

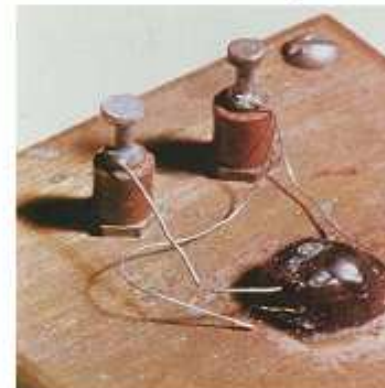


Bell Laboratories, courtesy AIP

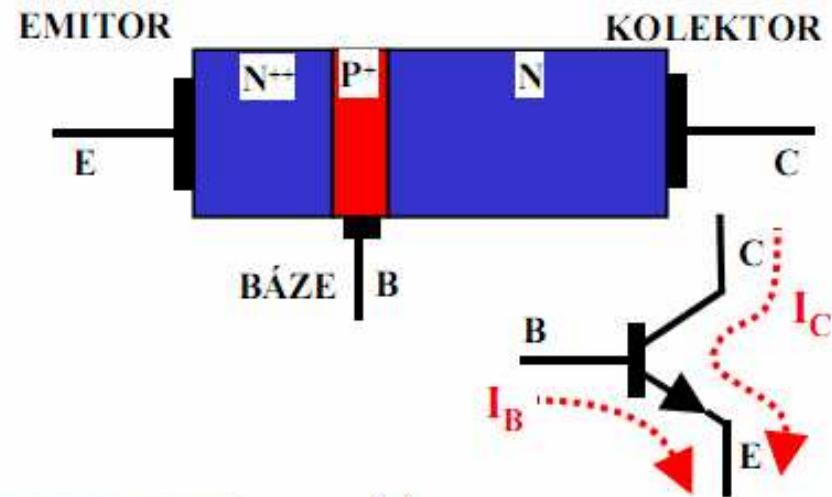
Shockley



U.S. Patent 2.623.105



Bipolární tranzistor

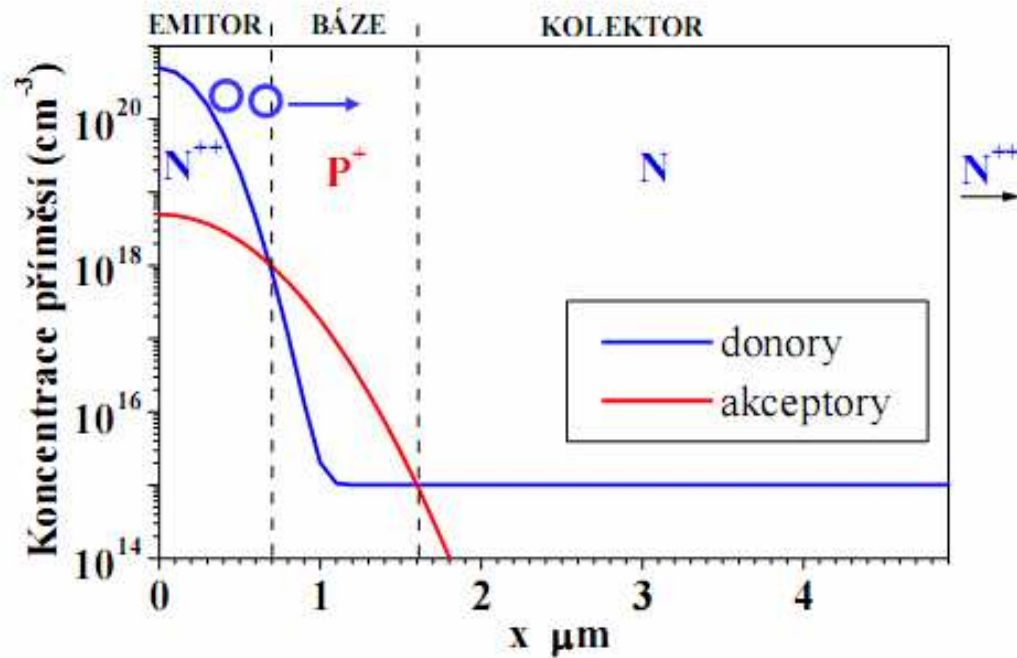
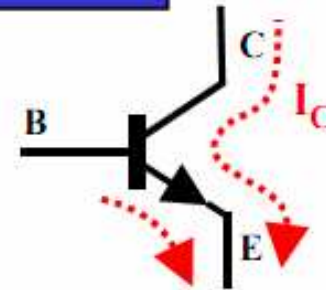
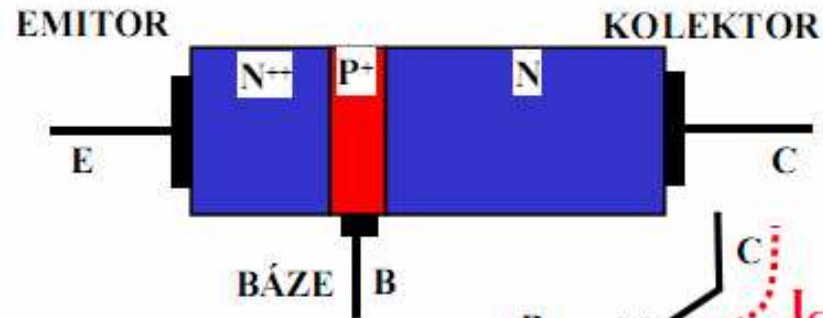


(a)



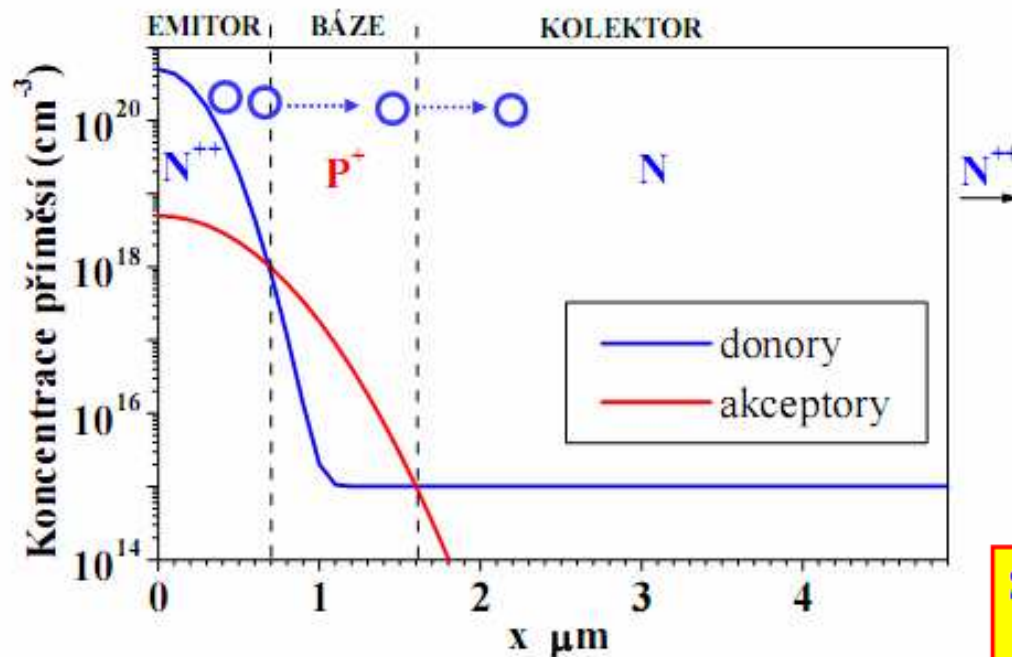
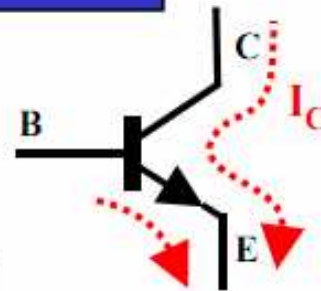
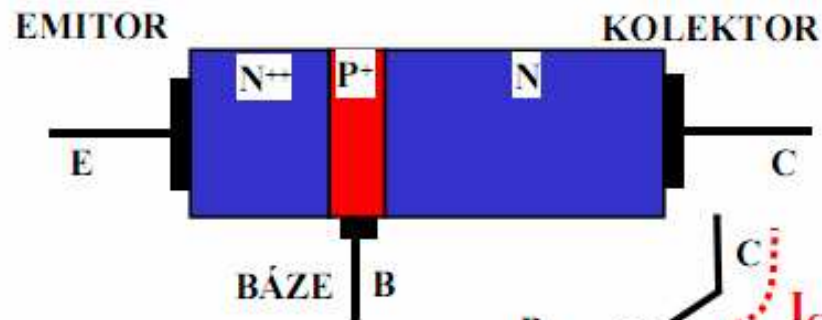
Báze

Bipolární tranzistor



EMITOR
„emituje“ elektrony
do báze

Bipolární tranzistor

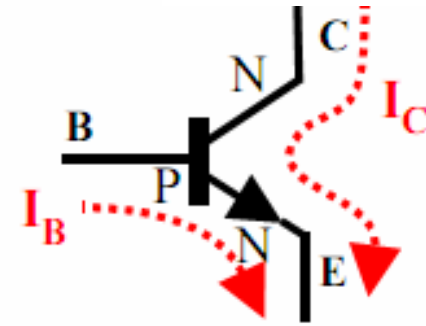
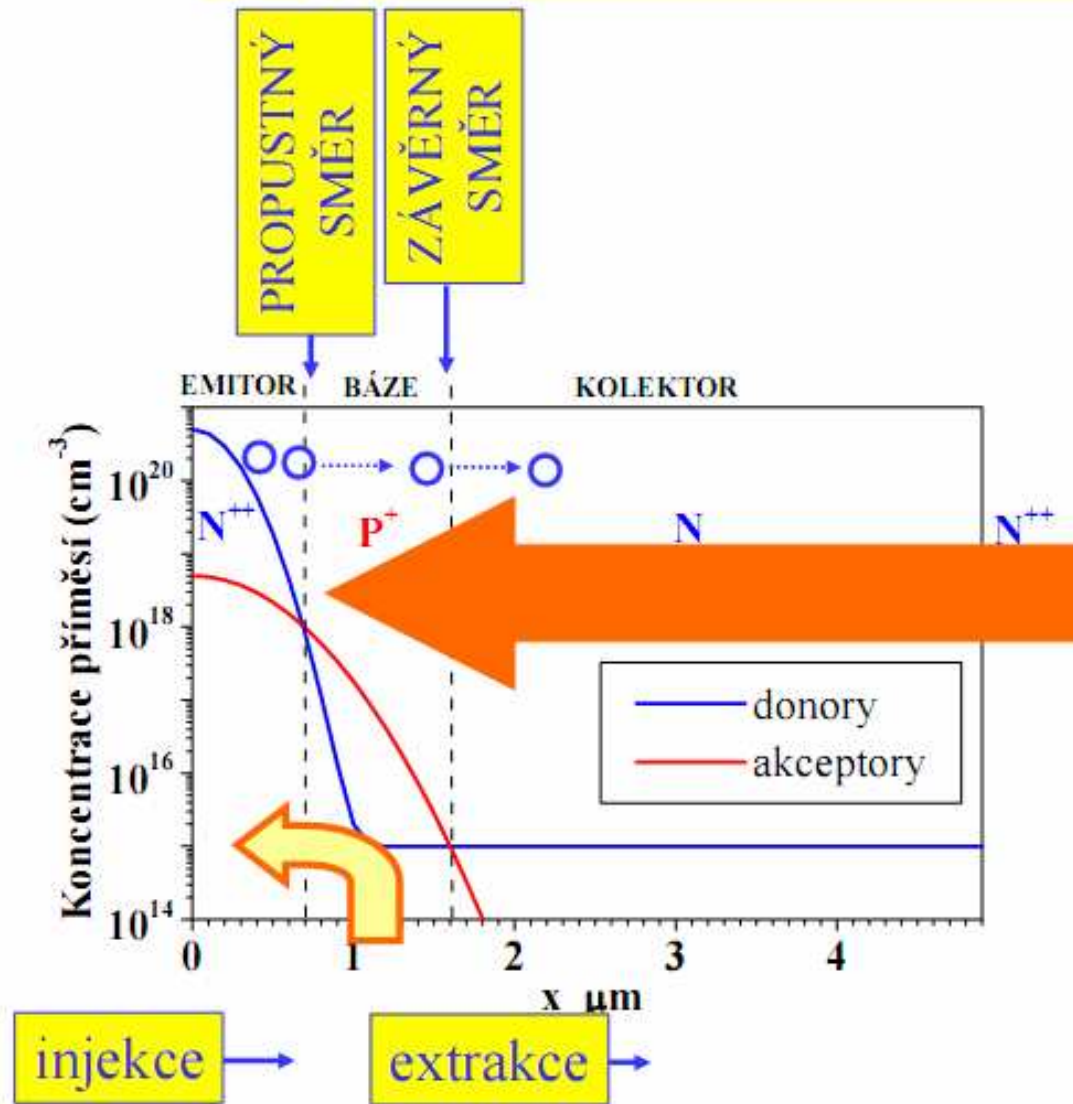


KOLEKTOR
„sbírá“ elektrony,
které prodifundují
bázi

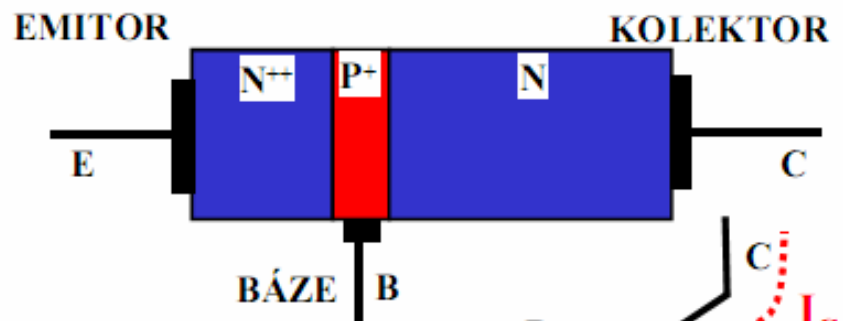
Šipka v emitoru ukazuje KLADNÝ směr toku proudu
v normálním aktivním režimu
(proti směru toku elektronů)

Tranzistor se nazývá NPN

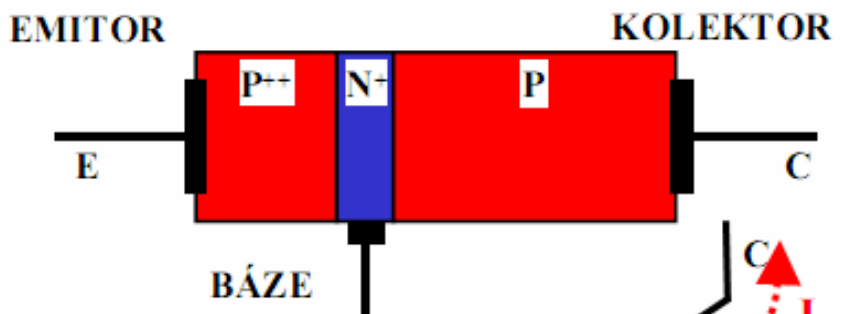
Bipolární tranzistor



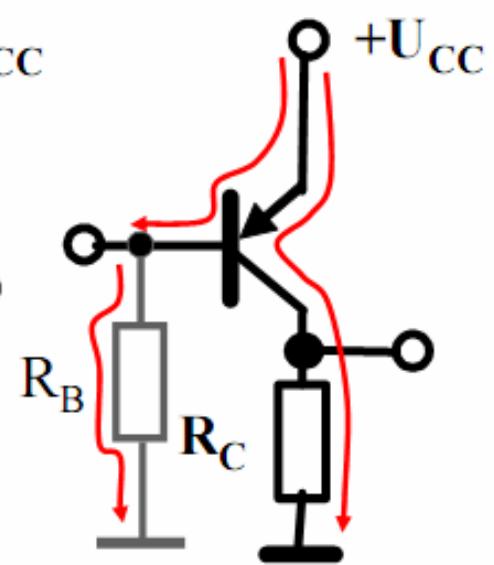
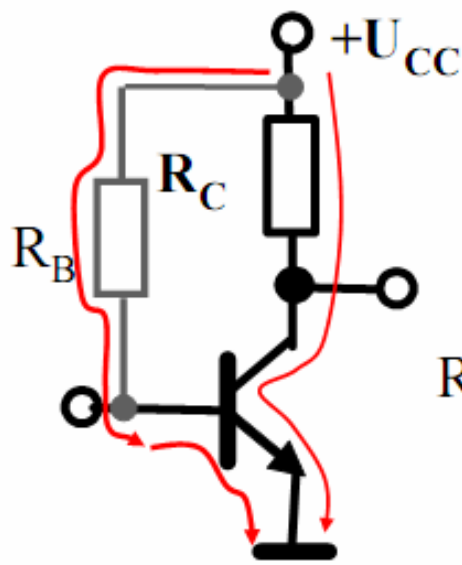
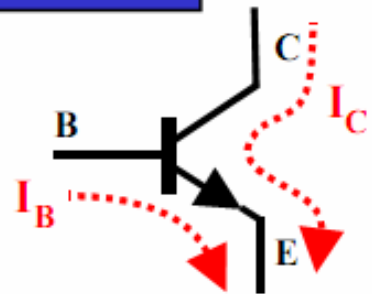
Bipolární tranzistor



(a)

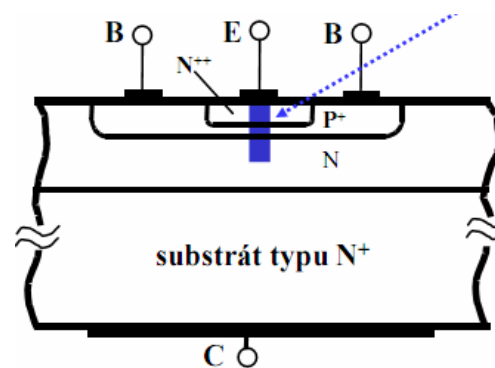


(b)



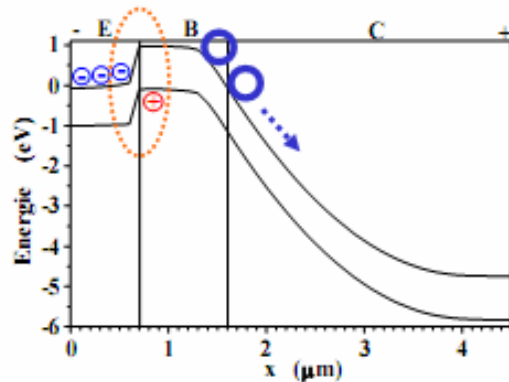
Bipolární tranzistor – režimy činnosti

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

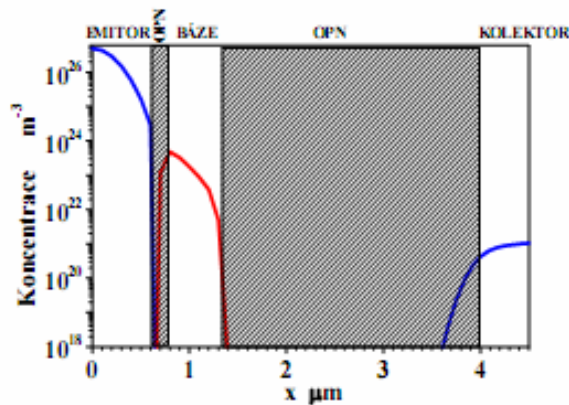


diskrétní součástka

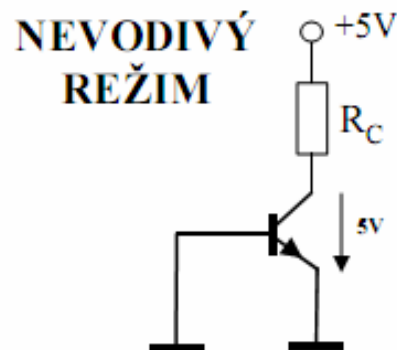
Bipolární tranzistor – nevodivý režim



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



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.

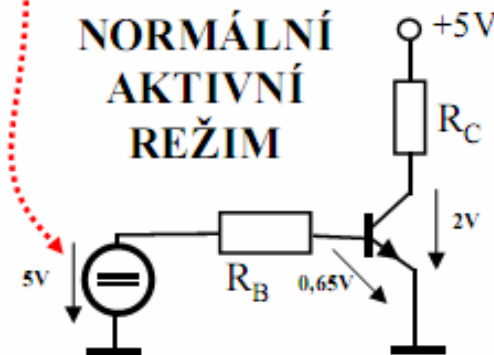
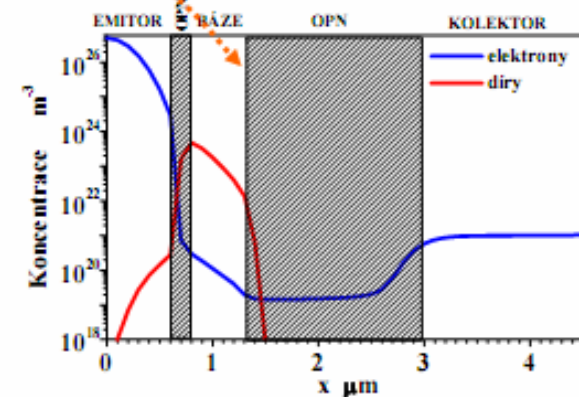
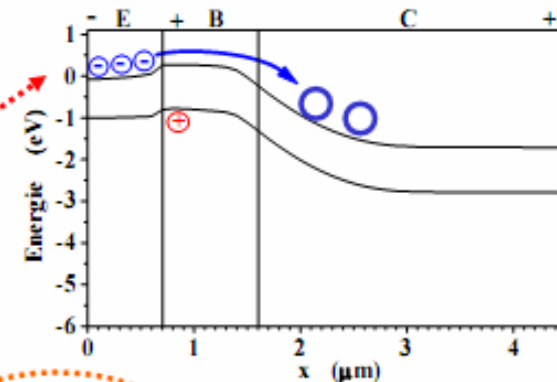
Bipolární tranzistor – normální aktivní režim

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 .

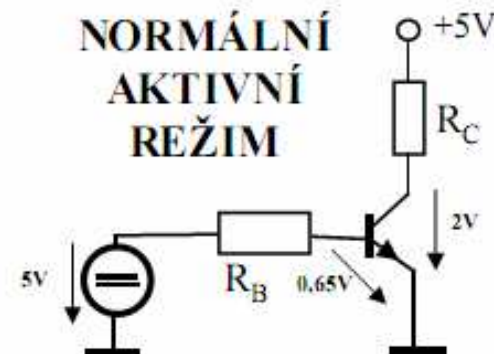
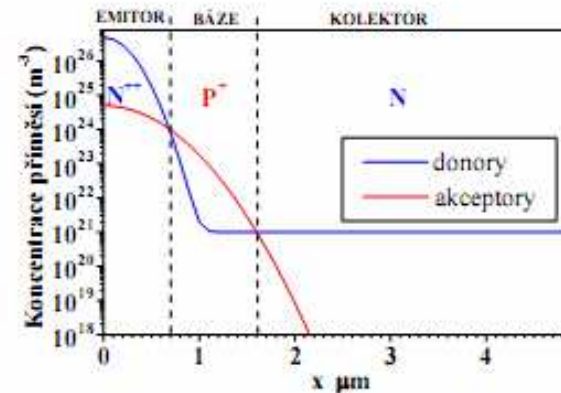
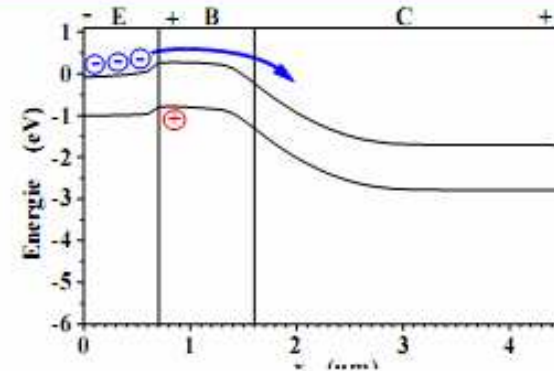


Bipolární tranzistor – normální aktivní režim

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 bázi a emitorem je ~ 100

PROUDOVÉ ZESÍLENÍ
vytváří přechod B-E

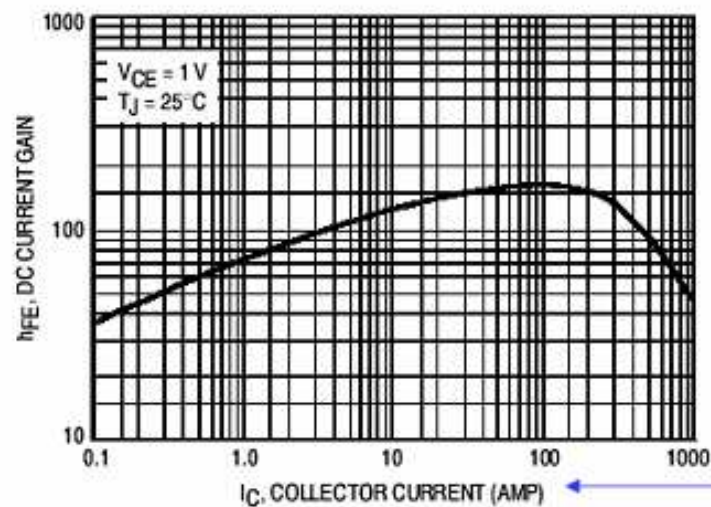


Bipolární tranzistor – proudový zesilovací činitel

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

v zapojení se společným Emitorem

DC Current Gain ($I_C = 100 \text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0 \text{ V}$)		h_{FE}			
	BC337	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	–	–	–



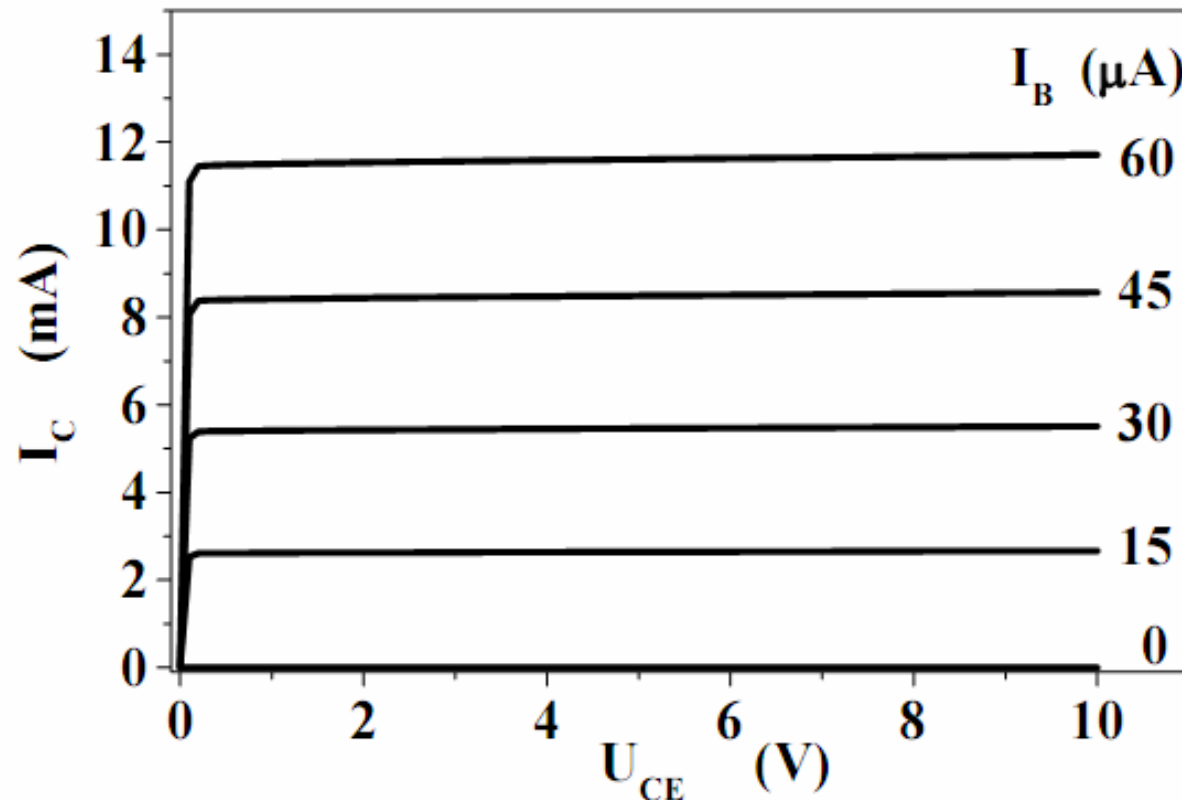
$h_{21E}(h_{FE})$ není konstanta,
závisí na proudu kolektoru !!!

logaritmická stupnice

Bipolární tranzistor – výstupní charakteristiky

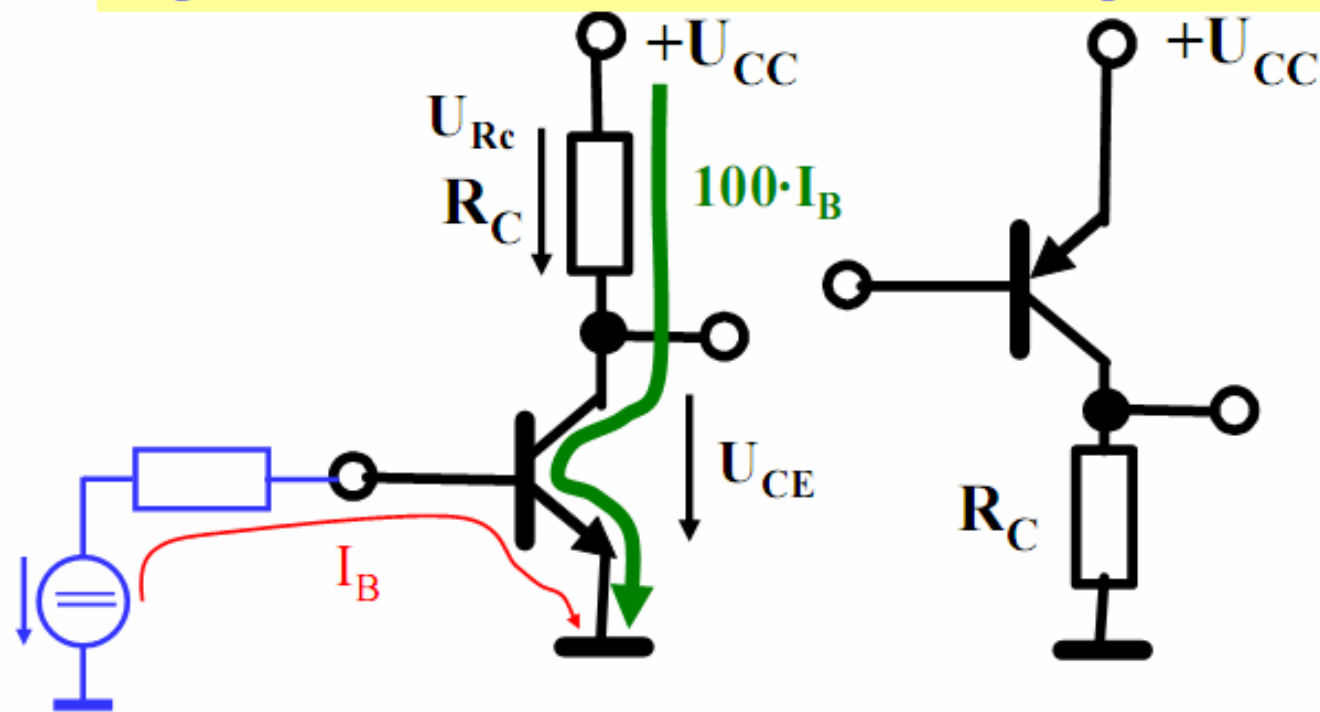
Čím větší je U_{BE} , tím více se sníží energ. bariéra a teče větší proud.

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



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

Bipolární tranzistor – mechanismus napět'ového zesílení



1. Přivedeme vstupní napětí

2. Proteče proud báze

3. Proteče proud kolektoru $100 \cdot I_B$

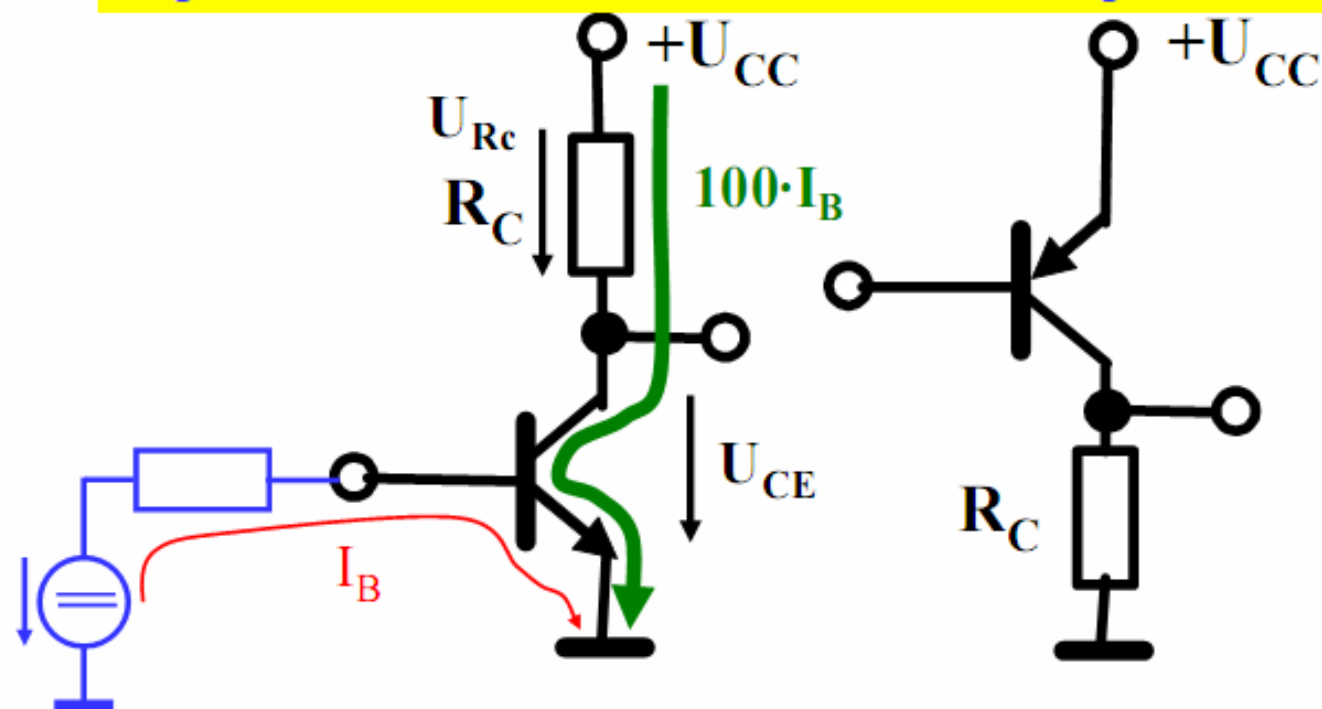
4. Vzroste úbytek napětí na R_C na hodnotu $U_{RC} = h_{21E} \cdot I_B \cdot R_C$

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

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

~ 100

Bipolární tranzistor – mechanismus napět'ového zesílení



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

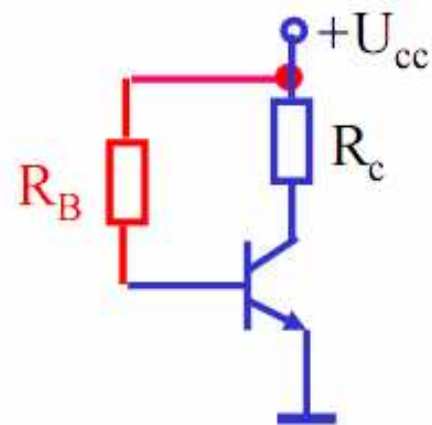
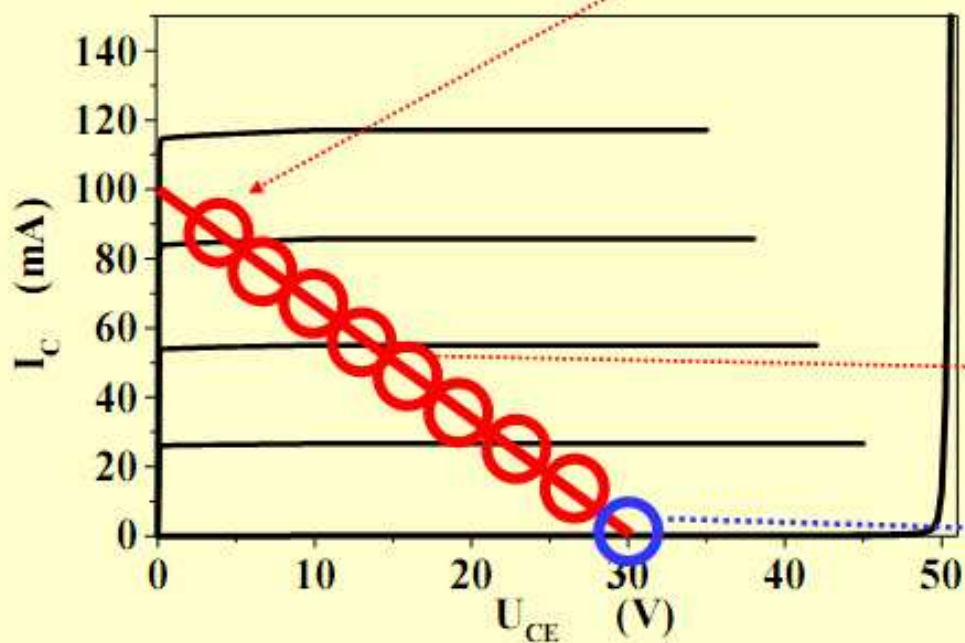
$$U_{CE} = U_{CC} - U_{RC} = U_{CC} - h_{21E} \cdot I_B \cdot R_C$$

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

Tranzistor zesiluje a invertuje !!!

Bipolární tranzistor

Normální aktivní režim – zesilovač
sepnutý stav spínače

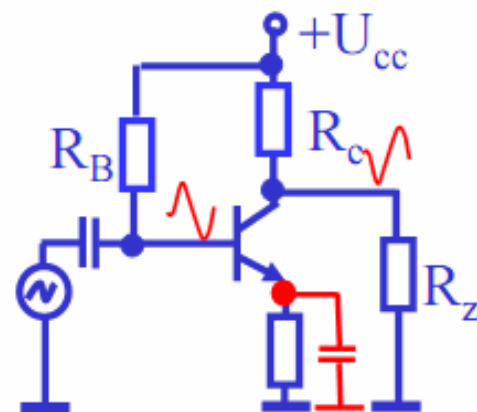
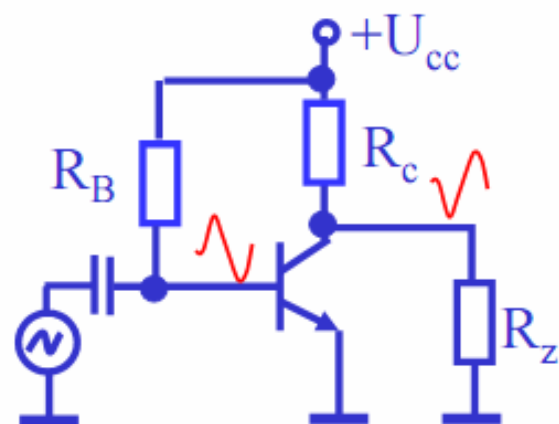


Aktivní režim

Nevodivý režim

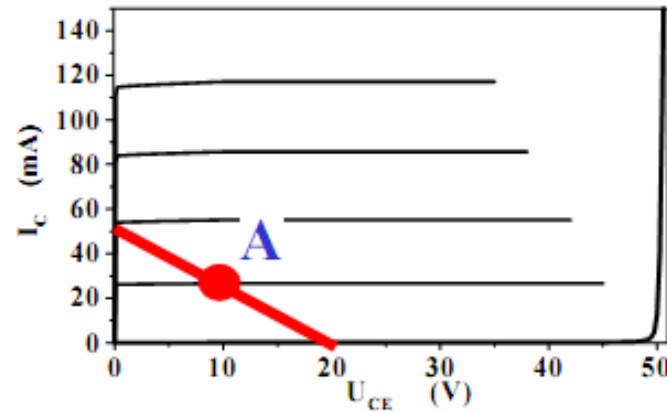
Bipolární tranzistor

zesilovač malého signálu

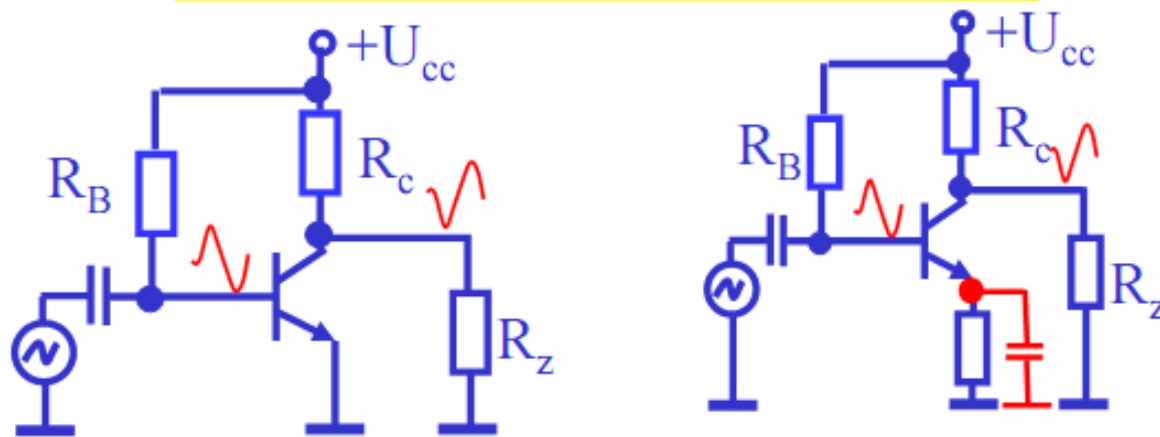


Bipolární tranzistor – zesilovač malého signálu

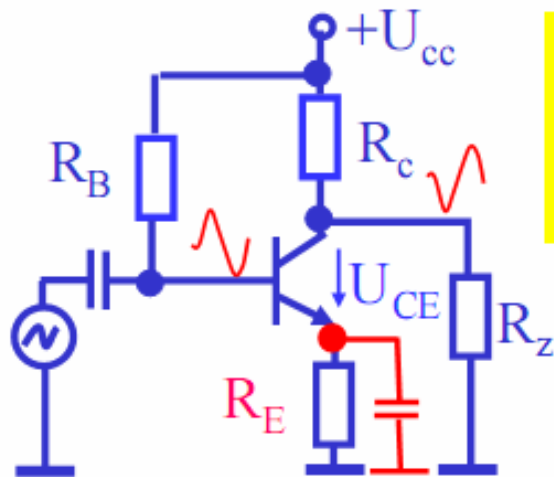
1. nastavení ss pracovního bodu



2. přivedení zesilovaného signálu



Bipolární tranzistor – nastavení ss pracovního bodu



Zadáno: zesilovač ve třídě A

$$U_{cc} = 12 \text{ V}, R_E = 220, R_C = 1 \text{ k}\Omega, \\ h_{21E} = 100, R_Z = 100\text{k}$$

$$U_{CE} = U_{cc} / 2 = 6 \text{ V}$$

$$I_C = (U_{CC} - U_{CE}) / (R_C + R_E) =$$

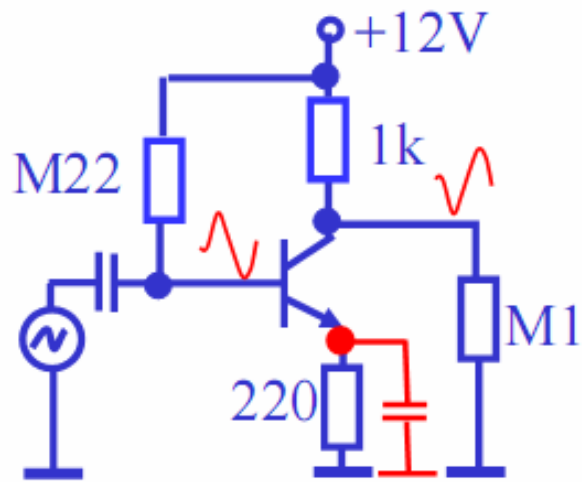
$$(12 - 6) / (1000 + 220) \approx 5 \text{ mA}$$

$$U_{RE} = R_E \cdot I_c = 220 \times 0,005 = 1,1 \text{ V}$$

$$R_B = [(U_{cc} - U_{BE} - U_{RE}) \cdot h_{21e}] / I_C$$

$$= [(12 - 0,7 - 1,1) \cdot 100] / 0.005 = 204\,000 \text{ }\Omega \Rightarrow \text{M}22$$

Bipolární tranzistor – zesilovač malého signálu

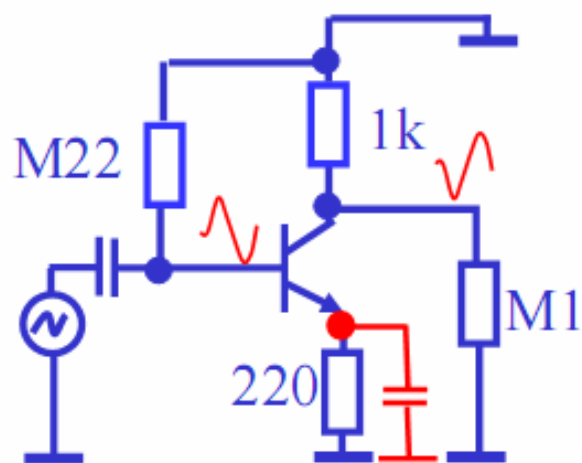


Jak to vidí střídavý signál na vstupu?

SS zdroj napětí se pro střídavý signál chová jako zkrat.

SS zdroj proudu se pro střídavý signál chová jako rozpojený obvod.

Bipolární tranzistor – zesilovač malého signálu



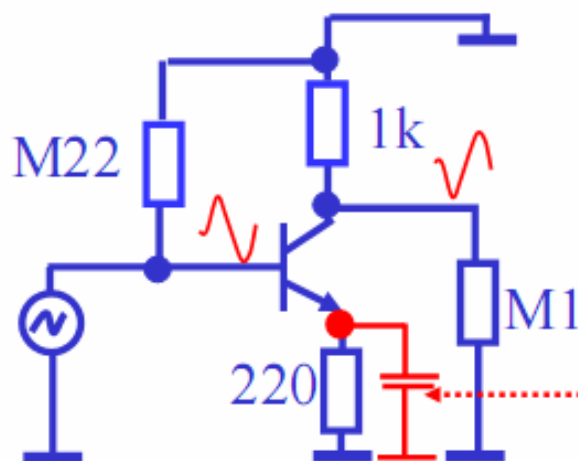
Jak to vidí střídavý signál na vstupu?

SS zdroj napětí se pro střídavý signál chová jako zkrat.

SS zdroj proudu se pro střídavý signál chová jako rozpojený obvod.

Kapacitor se pro uvažovanou frekvenci střídavého signálu chová jako zkrat.

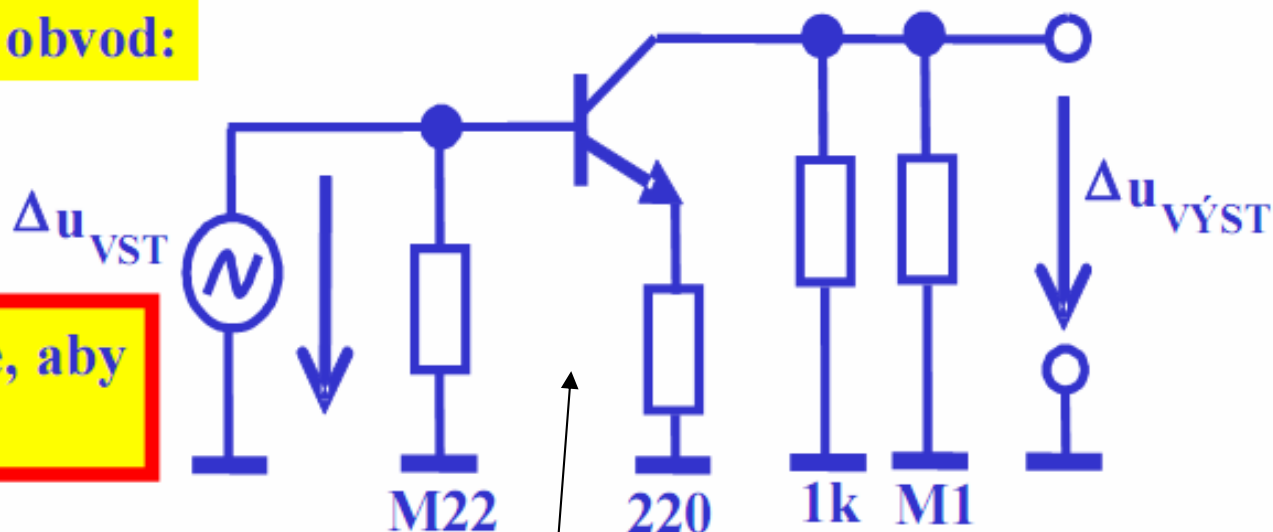
Bipolární tranzistor – zesilovač malého signálu



Jak to vidí střídavý signál na vstupu?

kapacitor zatím neuvažujeme

Náhradní obvod:



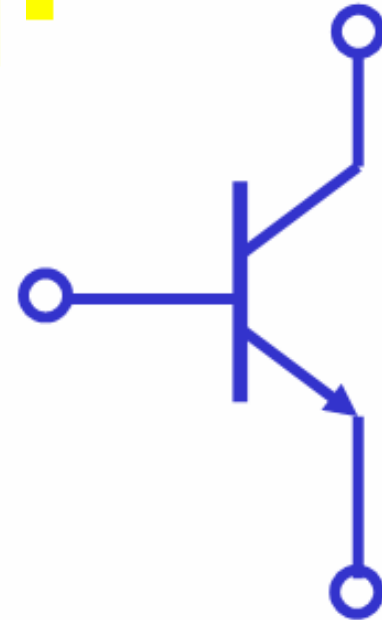
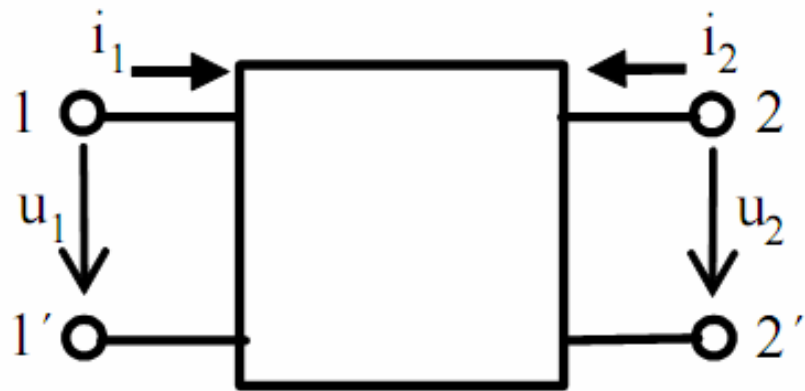
Potřebujeme, aby byl lineární!

Tranzistor je nutné nahradit lineárním obvodem, tzv. náhradním lineárním obvodem (NLO).

Hybridní charakteristické rovnice

$$\Delta u_1 = h_{11} \Delta i_1 + h_{12} \Delta u_2 \quad (1)$$

$$\Delta i_2 = h_{21} \Delta i_1 + h_{22} \Delta u_2 \quad (2)$$



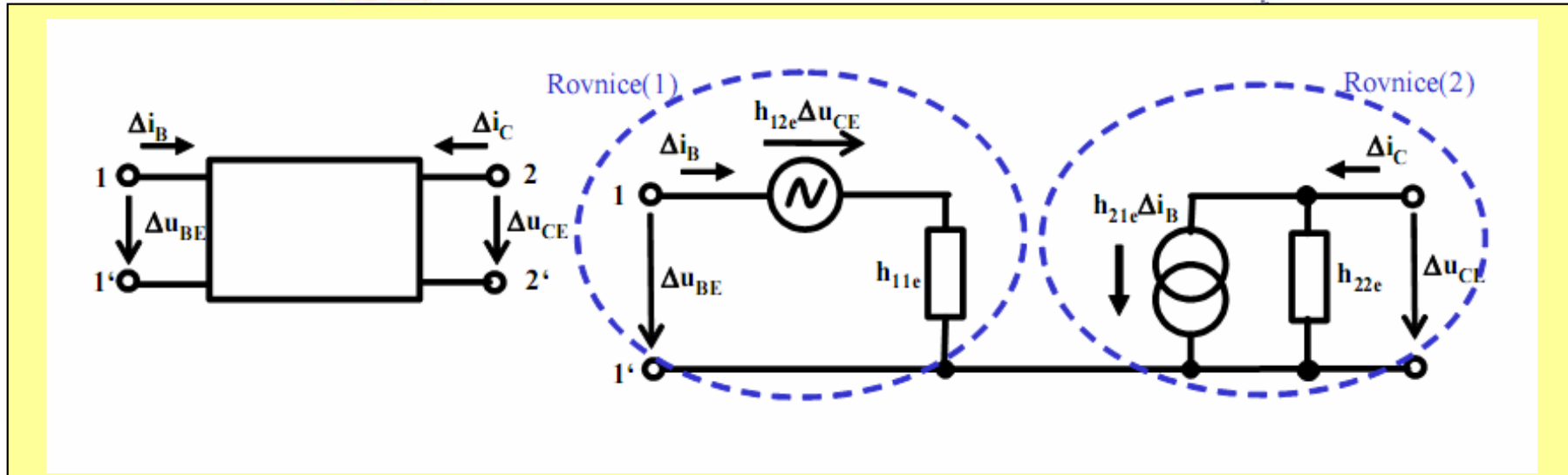
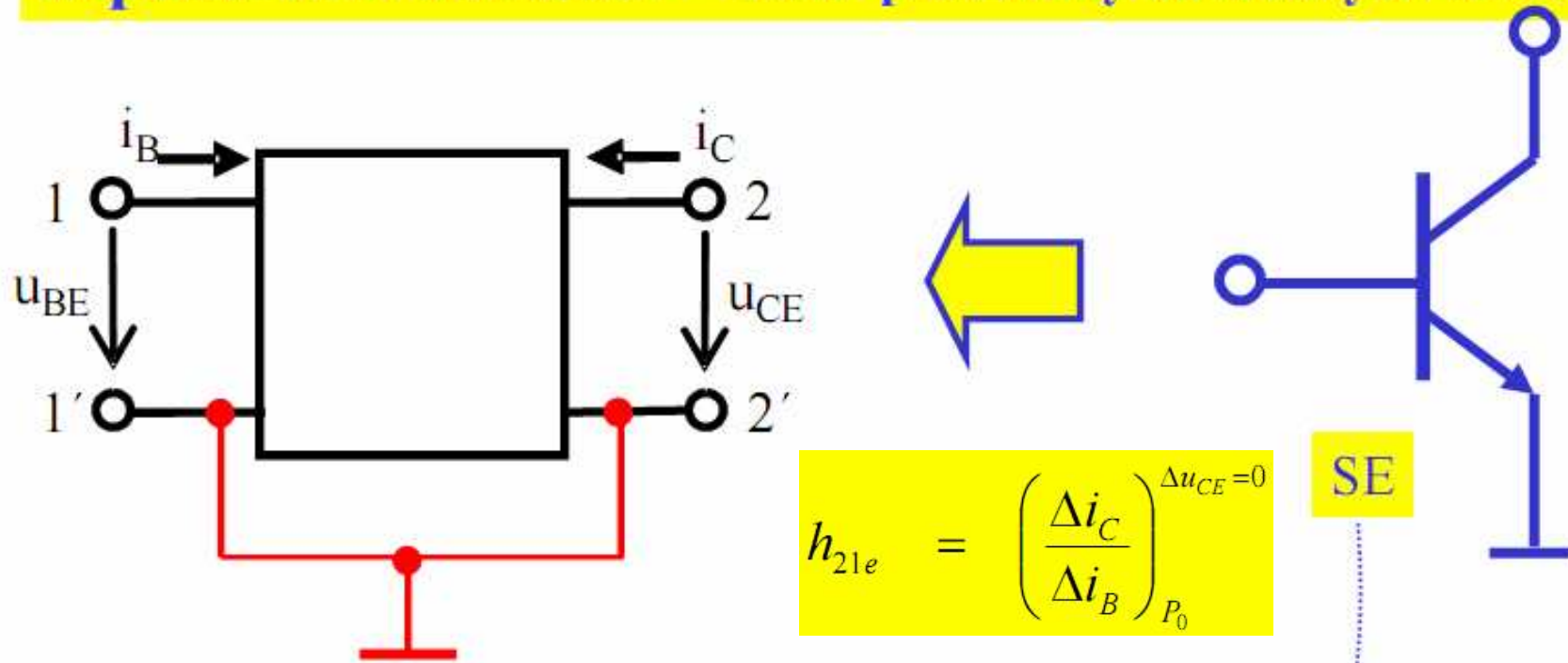
$$u_1 = h_1(i_1, u_2)$$

$$i_2 = h_2(i_1, u_2)$$

Hybridní (smíšené) parametry \underline{h}
výhodné pro popis BJT v nf oblasti

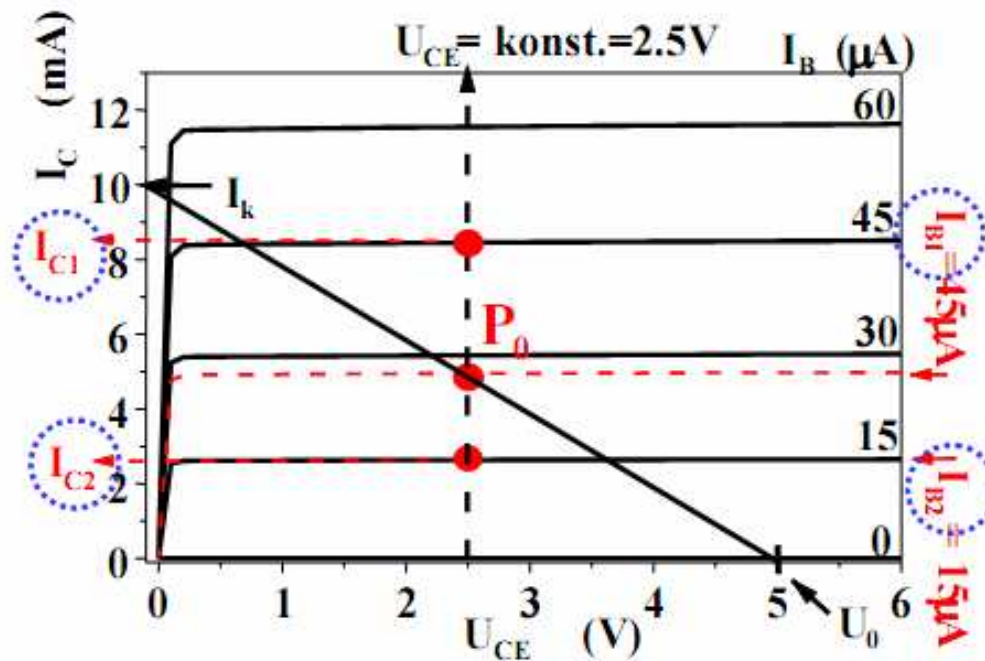
- vstup BJT pracuje obvykle naprázdno
- výstup BJT pracuje obvykle nakrátko
- dobře měřitelné na nízkých kmitočtech

Bipolární tranzistor – NLO pro změny obvodových veličin



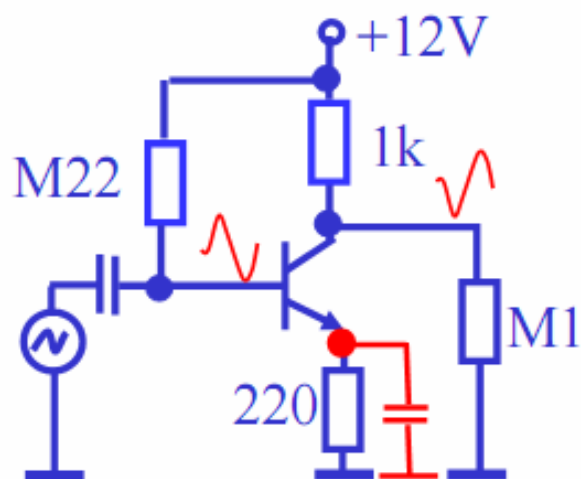
Bipolární tranzistor – parametry NLO

Proudový diferenciální přenos při výstupu nakrátko (konst. výst. napětí). Obvykle se nazývá **proudový zesilovací činitel**. Bezrozměrný.



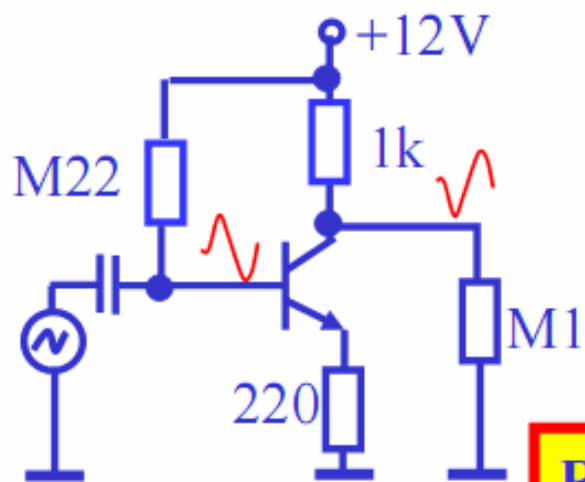
$$h_{21e} = \left(\frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right)_{P_0}^{\Delta u_{CE}=0} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{B1} - I_{B2}} = \frac{(8,5 - 2,6) \cdot 10^{-3}}{(45 - 15) \cdot 10^{-6}} = 197.$$

Bipolární tranzistor – zesilovač malého signálu



$$A_u = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{h_{11e}} = -y_{21e} \cdot R_C$$

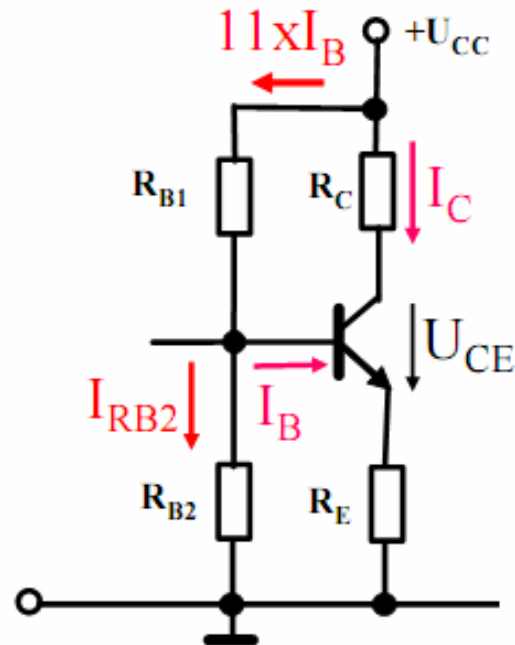
$$R_{VST} = \Delta u_{VST} / \Delta i_B = h_{11e} // R_B$$



$$A_u = -\frac{R_C}{R_E}$$

$$R_{VST} = \Delta u_{VST} / \Delta i_B = [h_{11e} + R_E (1 + h_{21e})] // R_B$$

Bipolární tranzistor – nastavení pracovního bodu



Příklad: zesilovač malého signálu ve třídě A
 $U_{CC} = 12V$, $R_C = 1k$, $R_E = 220$, $h_{21e} = 100$

$$U_{CE} = U_{CC} / 2 = 6V$$

$$I_C = (U_{CC} - U_{CE}) / (R_C + R_E) = 6 / 1220 \approx 5 \text{ mA}$$

$$I_B = I_C / h_{21e} = 0.005 / 100 = 50 \mu A$$

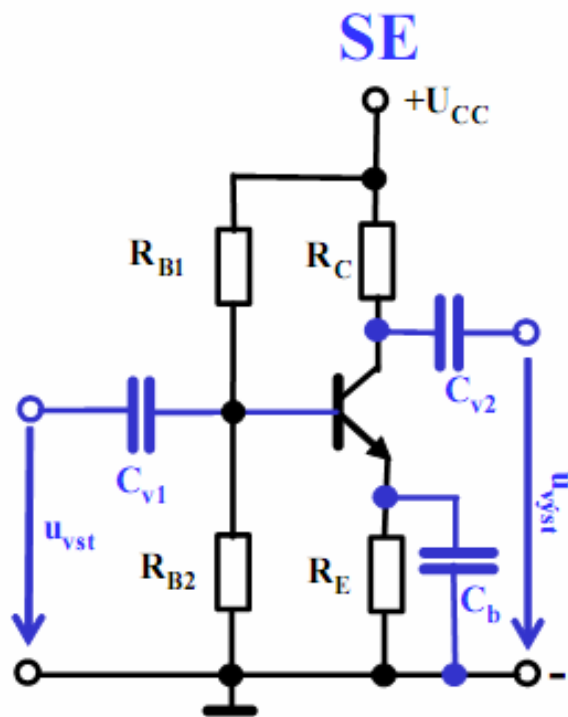
$$U_{BE} = 0.7V$$

Napětový dělič R_{B1} - R_{B2} musí být tvrdý \Rightarrow stabilní pracovní bod:

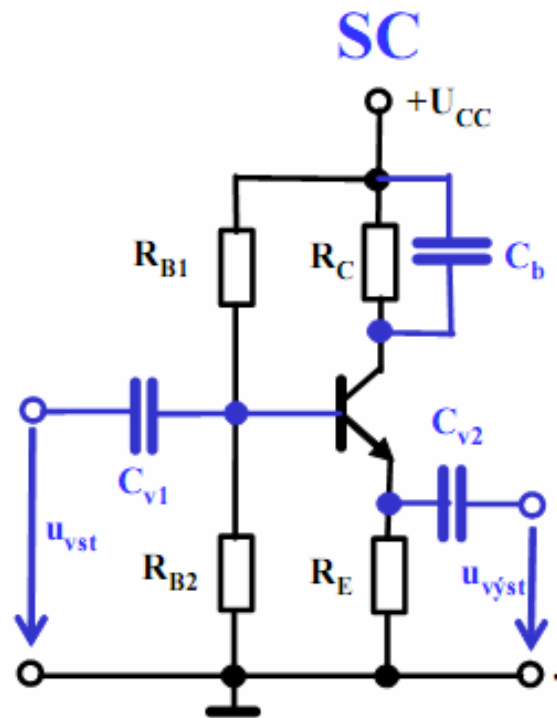
Podmínka: $I_{RB2} \gg I_B \Leftrightarrow I_{RB2} \geq 10 I_B$, volíme $I_{RB2} = 500 \mu A$

$$R_{B2} = U_{RB2} / I_{RB2} = (U_{BE} + R_E \cdot I_E) / I_{RB2} = (0.7 + 220 \times 0.005) / 5 \cdot 10^{-5} = 36 \text{ k}\Omega$$

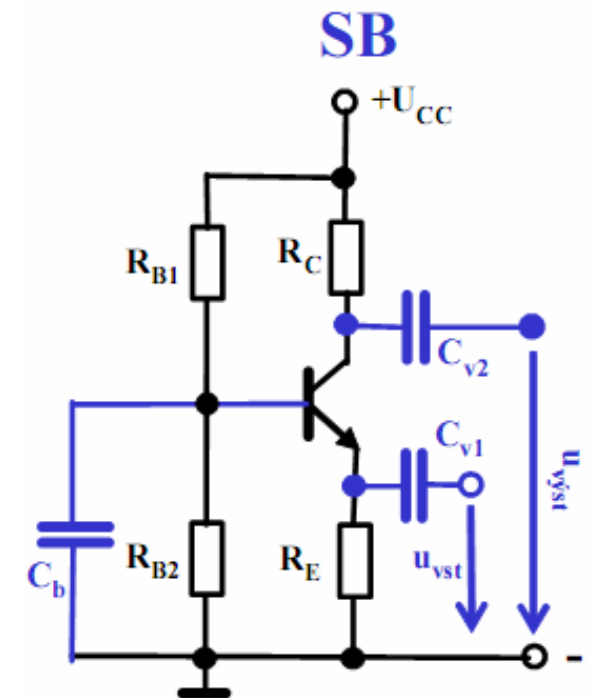
$$R_{B1} = U_{RB1} / (11 \cdot I_B) = (U_{CC} - U_{BE} - R_E \cdot I_E) / 11 \cdot I_B = (12 - 0.7 - 1.1) / 550 \cdot 10^{-6} \approx 19 \text{ k}\Omega$$



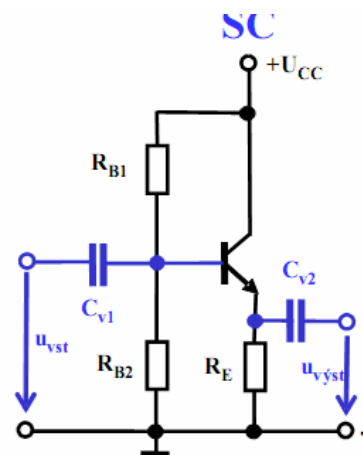
Vstup do báze, výstup z kolektoru
 ⇒ zapojení se společným emitorem



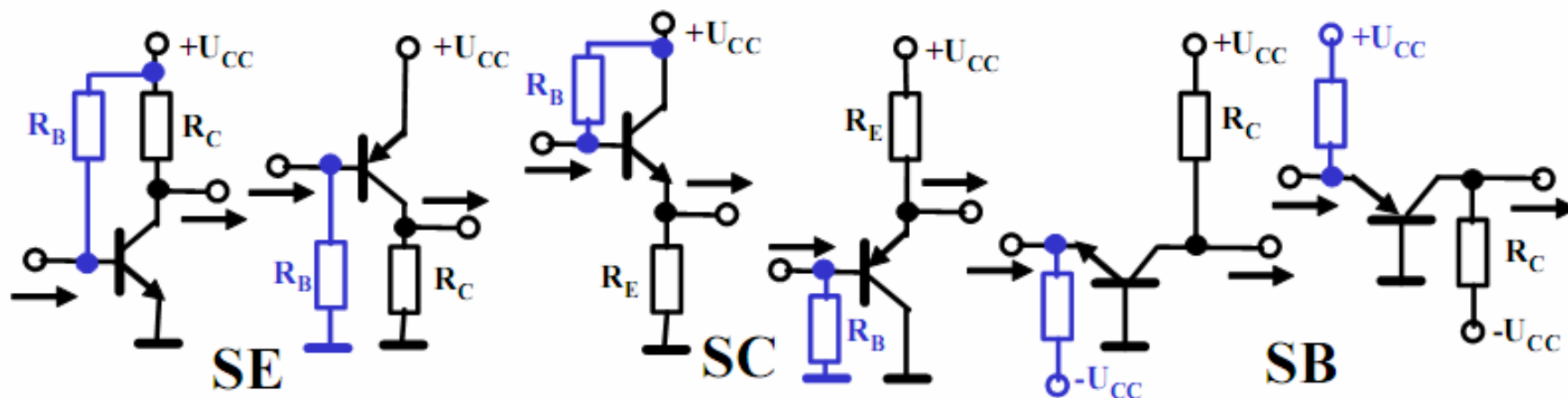
Vstup do báze, výstup z emitoru
 ⇒ zapojení se společným kolektorem



Vstup do emitoru, výstup z kolektoru
 ⇒ zapojení se společnou bází



Bipolární tranzistor



Invertor

Sledovač

Zesilovač

Velké A_u



Velké A_u



Velké A_i



Velké A_i



Střední R_{VST}

Velký R_{VST}



Malý R_{VST}



Střední R_{VYST}

Malý R_{VYST}



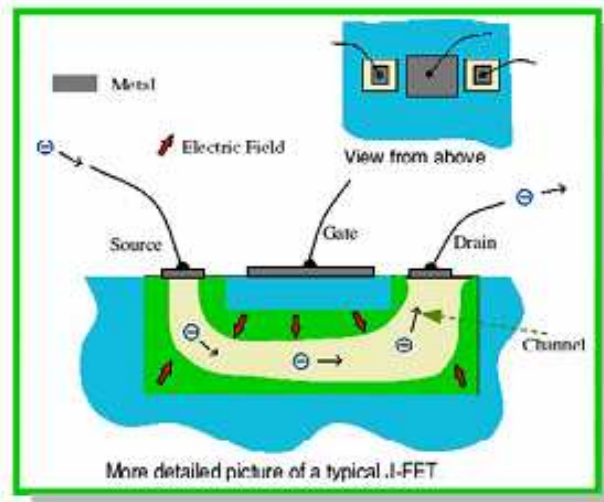
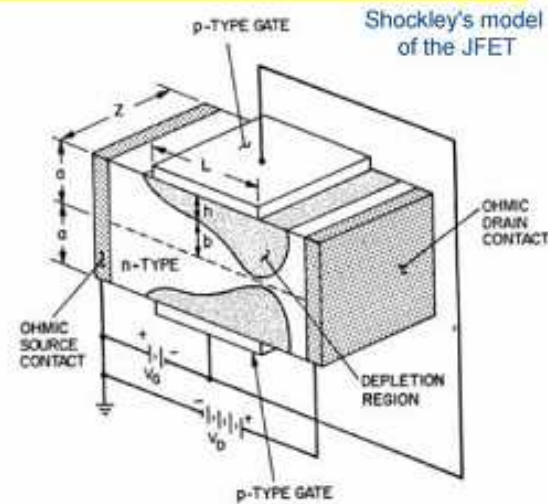
Velký R_{VYST}



JFET

Junction Field Effect Transistor

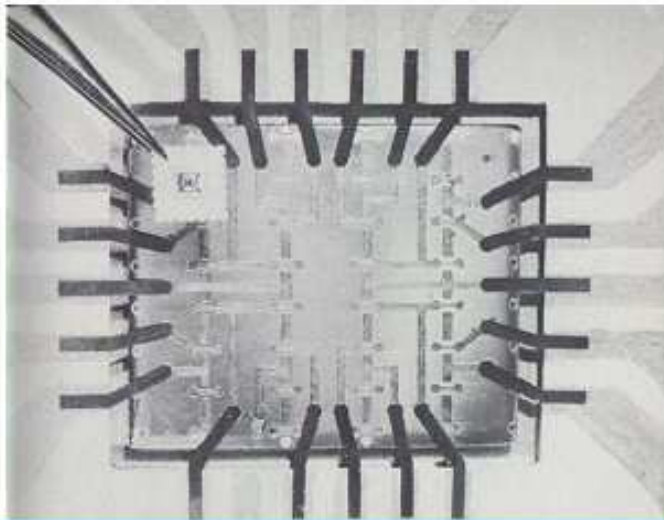
1952 – návrh: W. Shockley



1953 – realizace:
G. C. Dacey, I. M. Ross

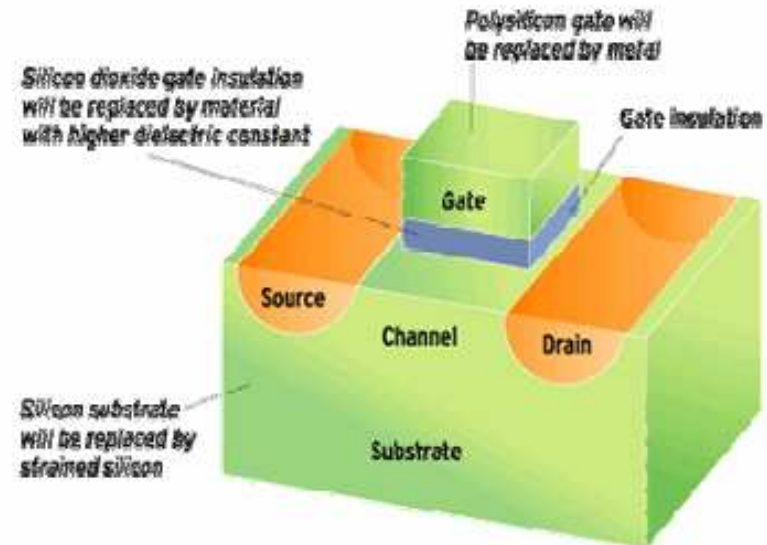
MOSFET

1962: RCA, Fairchild - první MOSFET



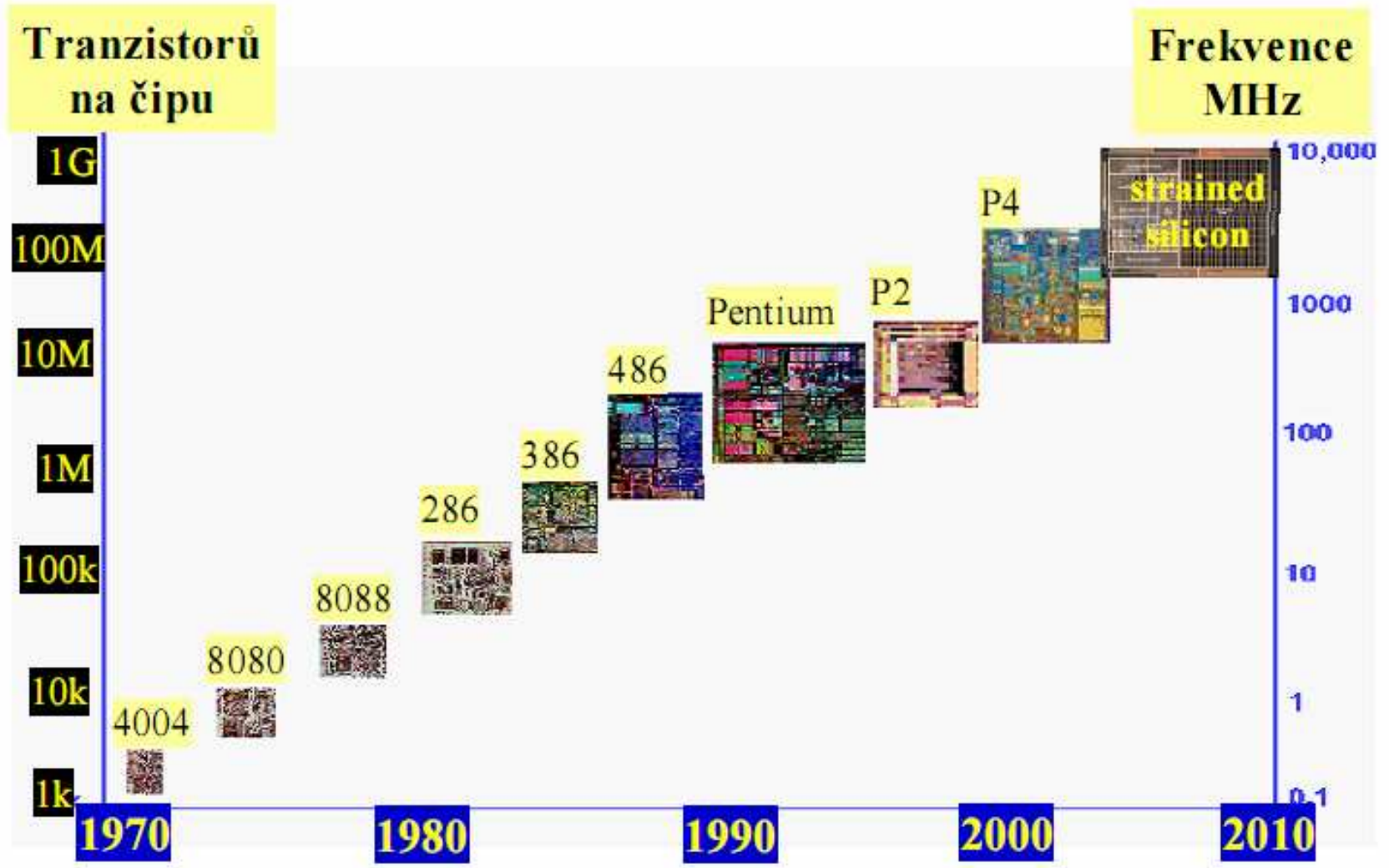
RCA: 16-tranzistorový MOSFET I0

Steve Hofstein, Fred Heiman (H⁺,... Na⁺)

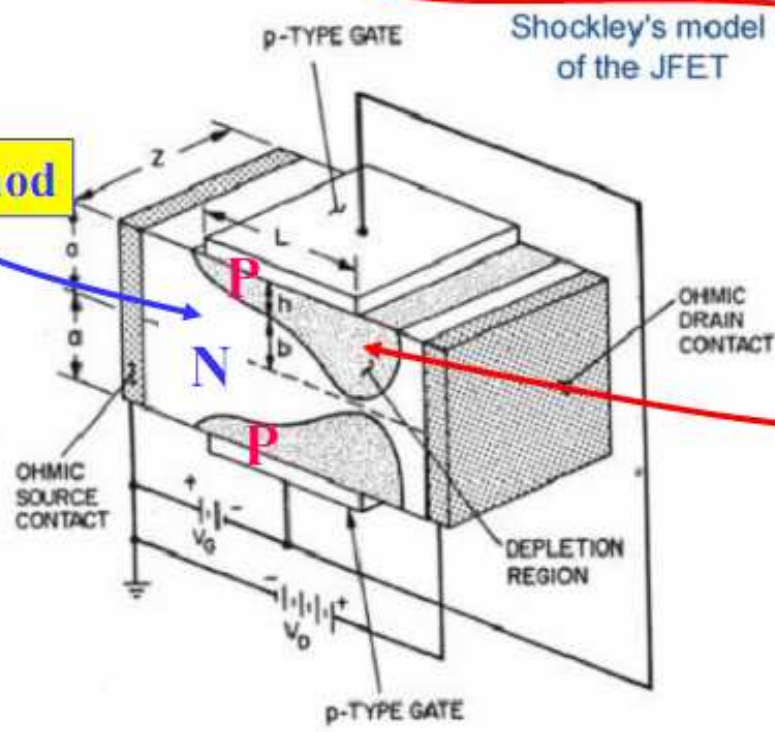


1964: CMOS - RCA

Tranzistory unipolární

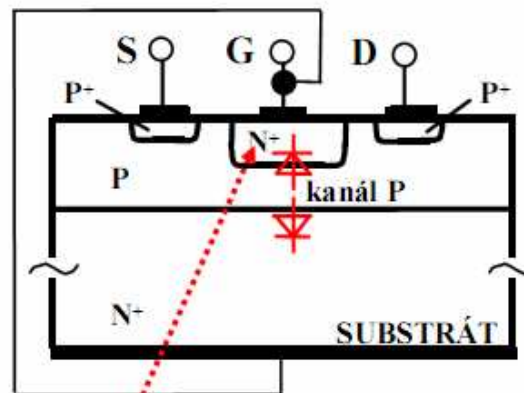
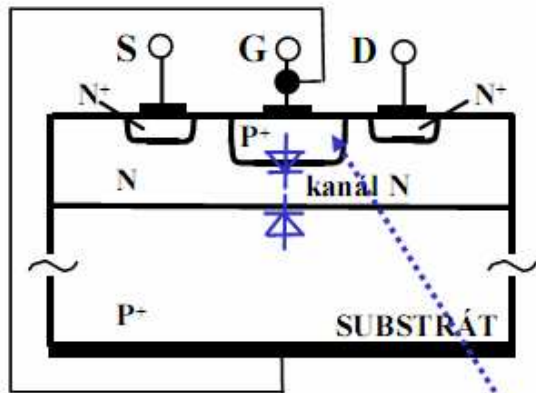


2x p-n přechod



Elektrické pole OPN

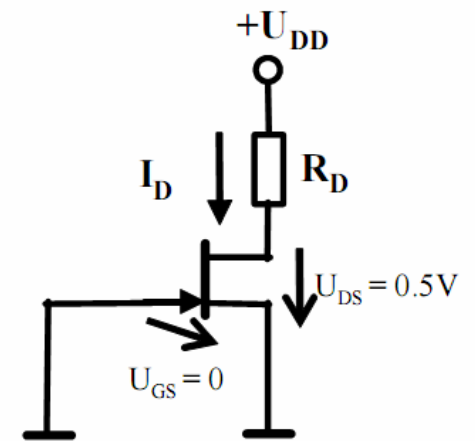
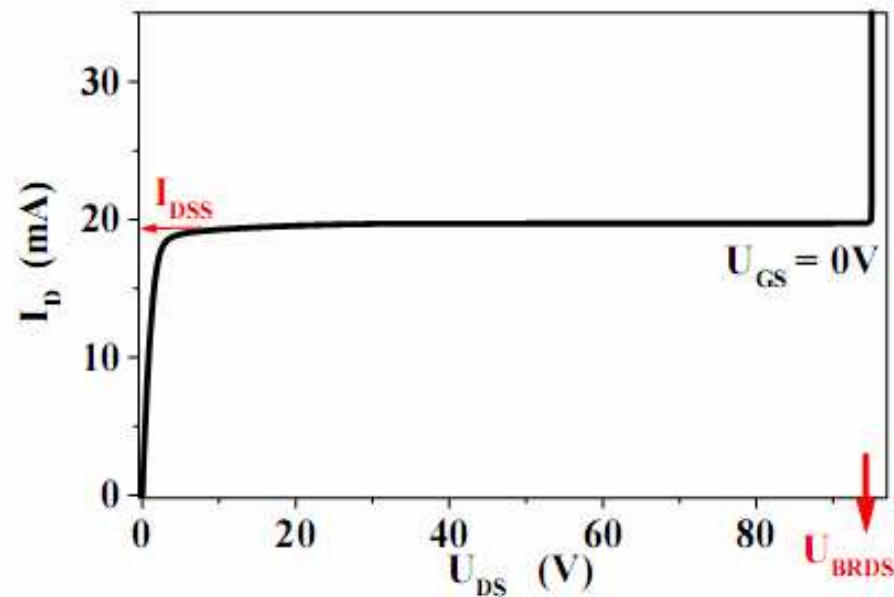
<u>P</u> ůvodně	-	„norma“	zvyk
<u>G</u> ate	-	hradlo	hradlo
<u>S</u> ource	-	zdroj	emitor
<u>D</u> rain	-	nora	kolektor
<u>B</u> ody	-	substrát	substrát



Ovládání záporným napětím U_{GS} znamená závěrnou polarizaci p-n přechodu G-S \Rightarrow DO VSTUPU NETEČE PROUD!!!

= TYPICKÁ VÝHODA UNIPOLÁRNÍCH TRANZISTORU

JFET – výstupní charakteristika



Elektrony přitahovány
+ potenciálem drainu,
odpor kanálu je malý
⇒ teče proud.

D → S

Působící el. pole je podélné a nepředstavuje energetickou bariéru.

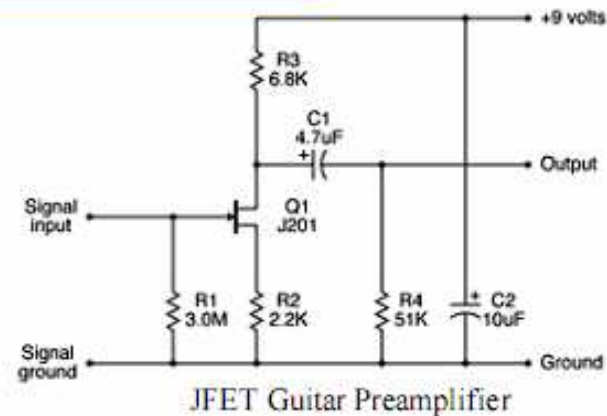
OPN nepředstavuje energetickou bariéru, ale jen oblast velkého odporu a velké intenzity elektrického pole, proto protéká proud.

Proud je tvořen pouze elektrony ⇒ tranzistor je **UNIPOLÁRNÍ**.

MESFET (Metal Semiconductor FET)

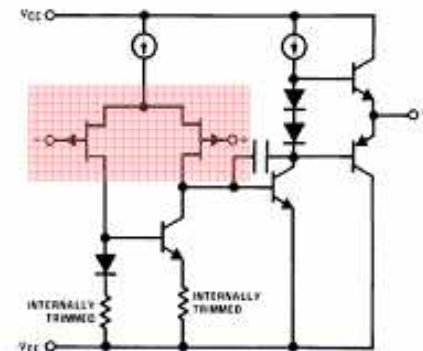
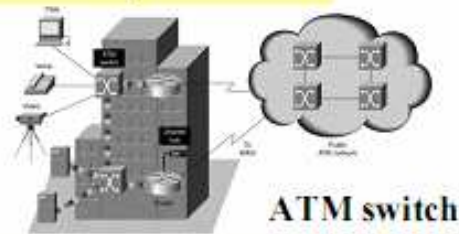
JFET & MESFET - aplikace

- **Zesilovač malého signálu**
(malý šum, zejména na nf)



- **vf zesilovač malého signálu**
(velký mezní kmitočet)

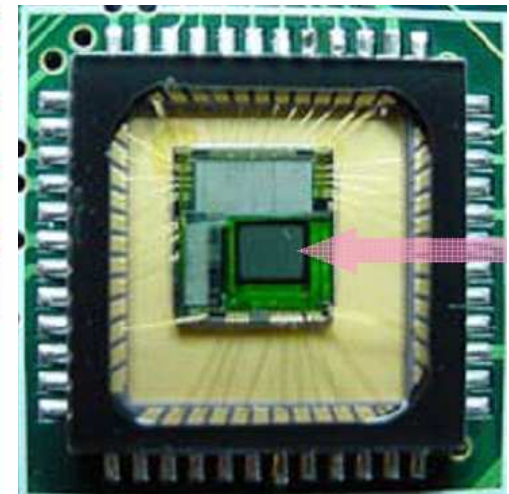
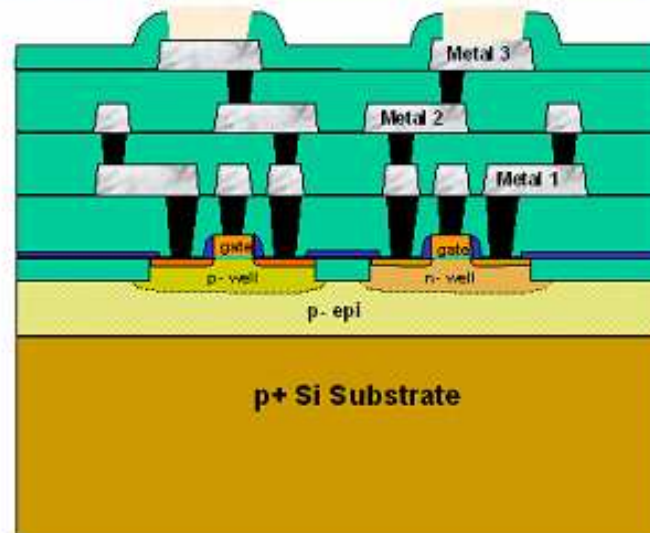
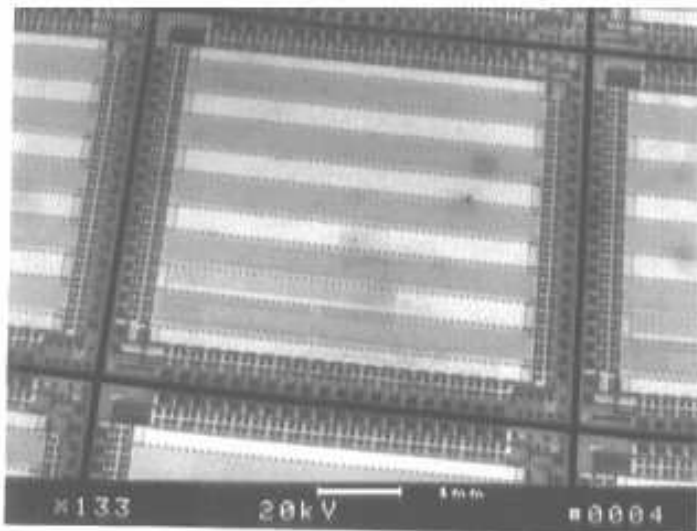
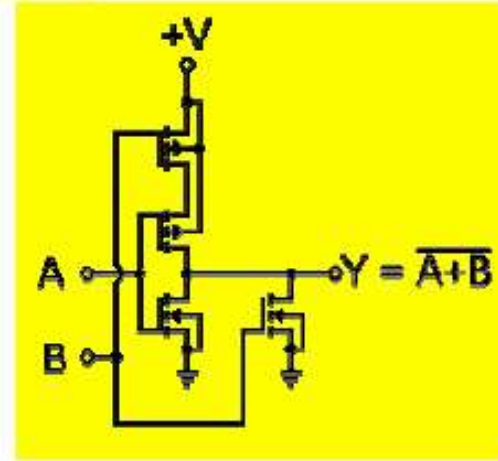
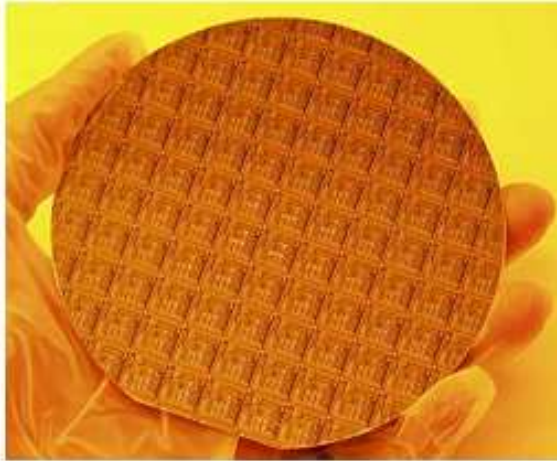
- **vf spínač**
(velký mezní kmitočet)



- **Operační zesilovače (zejména vstupní tranzistory)**
(velký vstupní odpor)

APLIKACE CMOS

Číslicové obvody



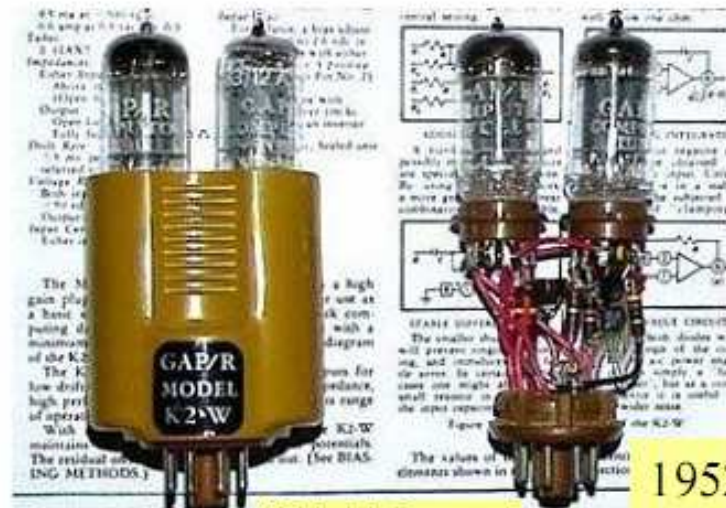
Číslicové obvody + matice fotodiod (kamera)

VÝKONOVÝ MOSFET

Operační zesilovače

1943

koncept OZ
s elektronkami



Philbrick Research

1952

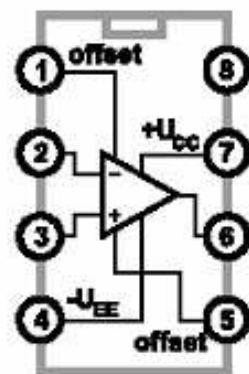


Bob Widlar



μA702

1963



μA709 μA741



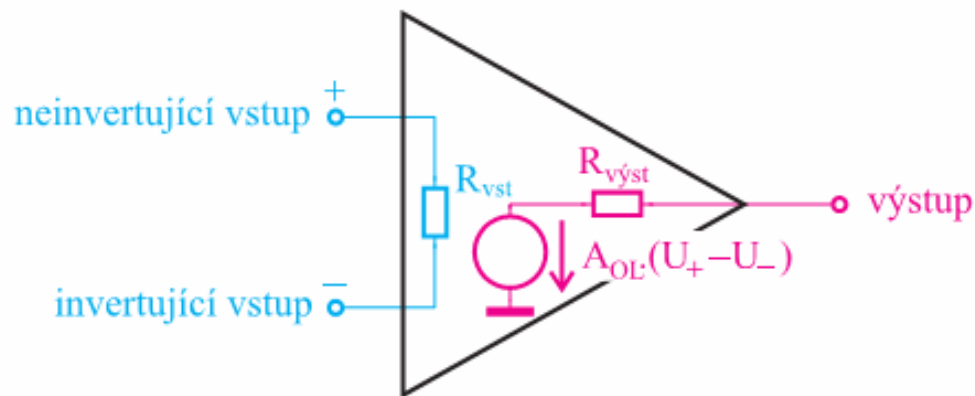
1980



1990

100V - 100W DMOS AUDIO AMPLIFIER
Wideband Video Op Amp

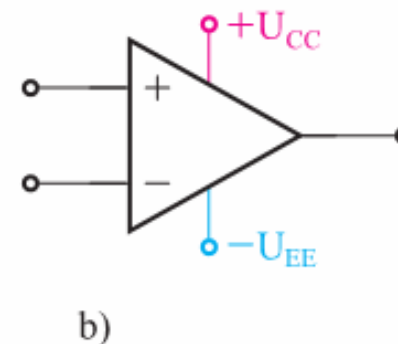
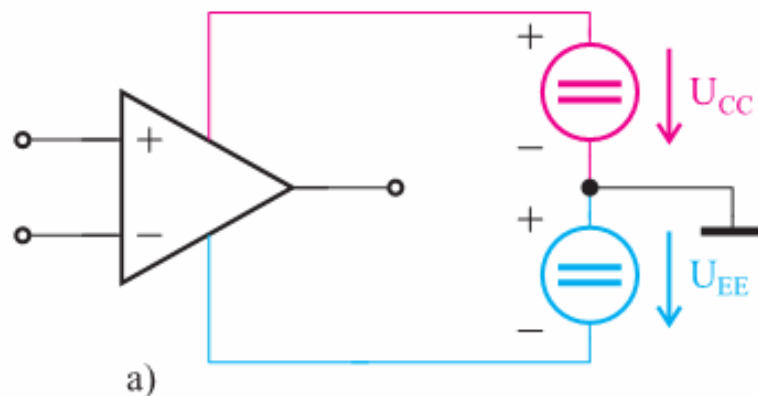
2005

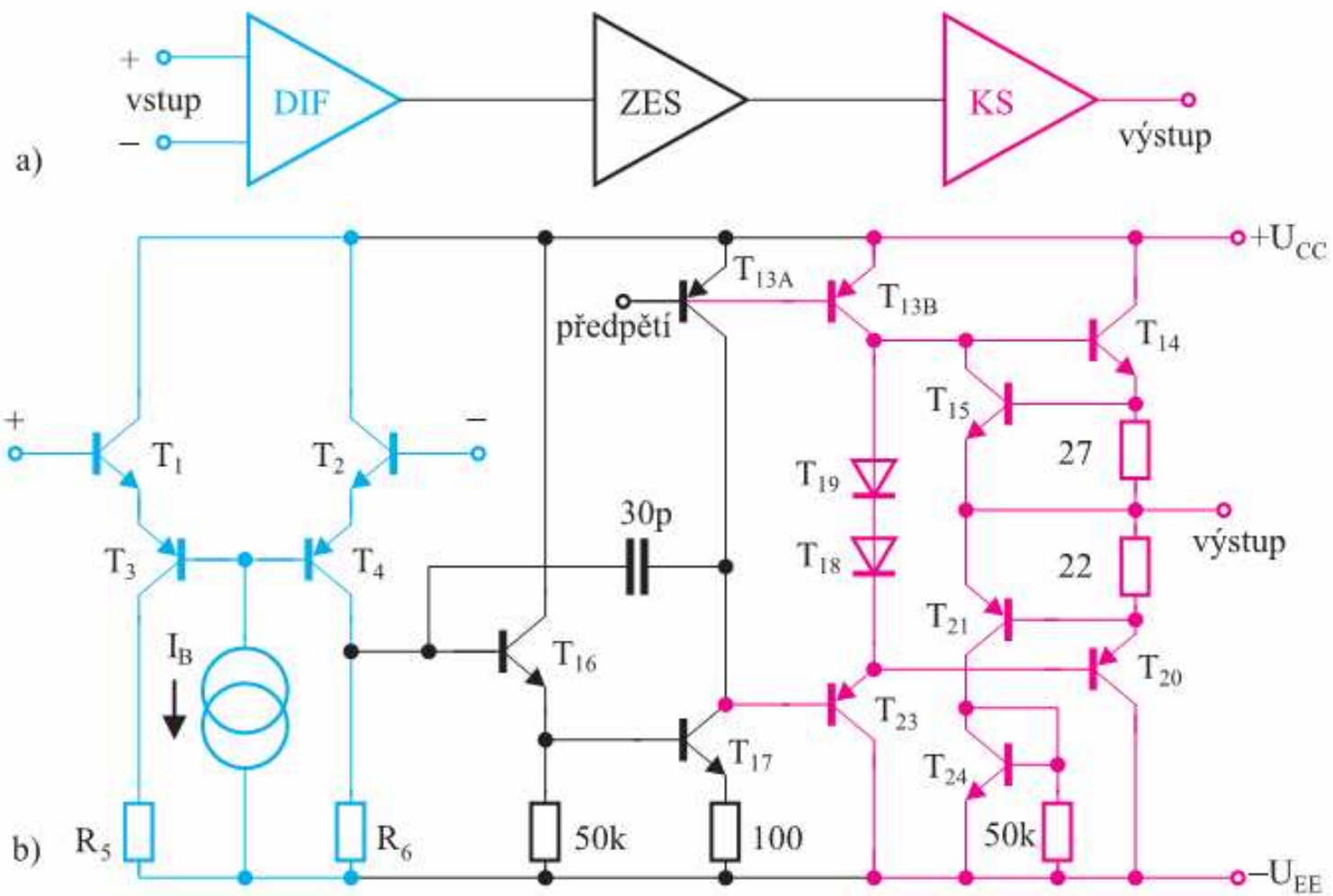


- $R_{vst} \rightarrow \infty$
- $R_{výst} \rightarrow 0$
- $A_{OL} \rightarrow \infty$
- $BW \rightarrow \infty$
- $SR \rightarrow \infty$

Parametr	Ideální OZ	Reálný OZ
A_{OL} (-)	∞	$5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6$
R_{vst} (Ω)	∞	$1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$
$R_{výst}$ (Ω)	0	1 - 100
BW (Hz)	∞	$5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9$
SR (V/ μ s)	∞	0,1 - 5000

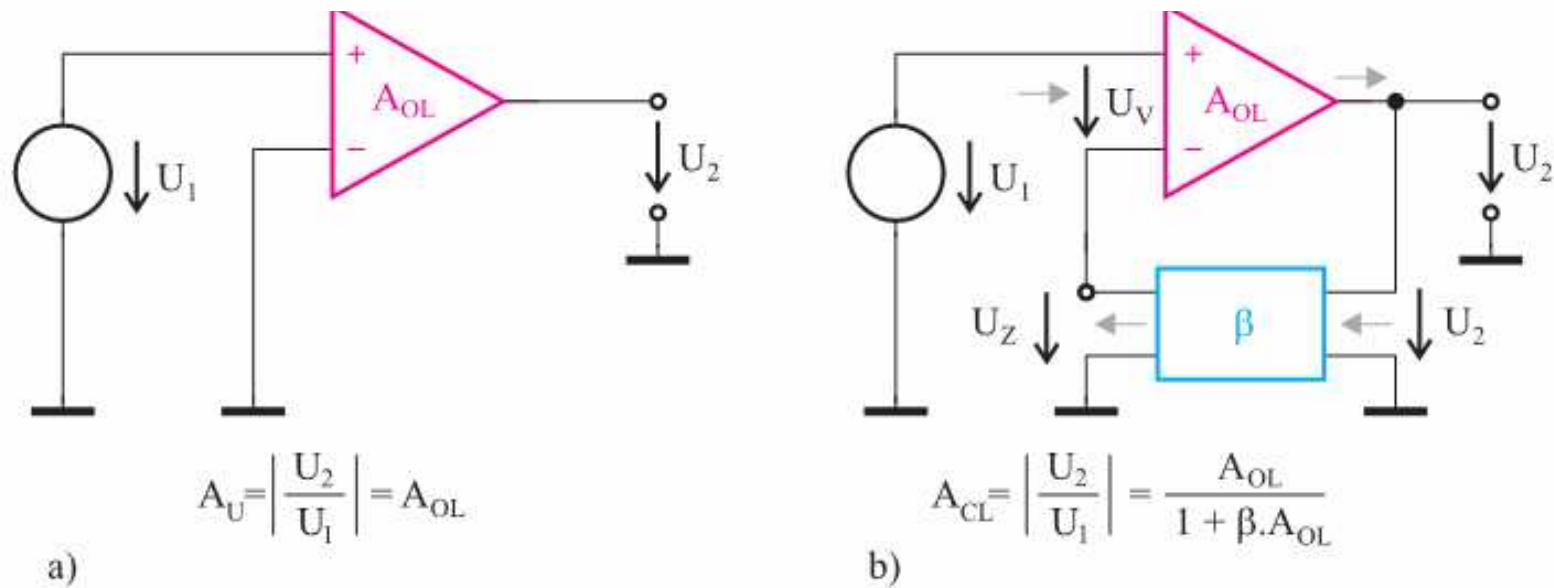
Napájení operačního zesilovače



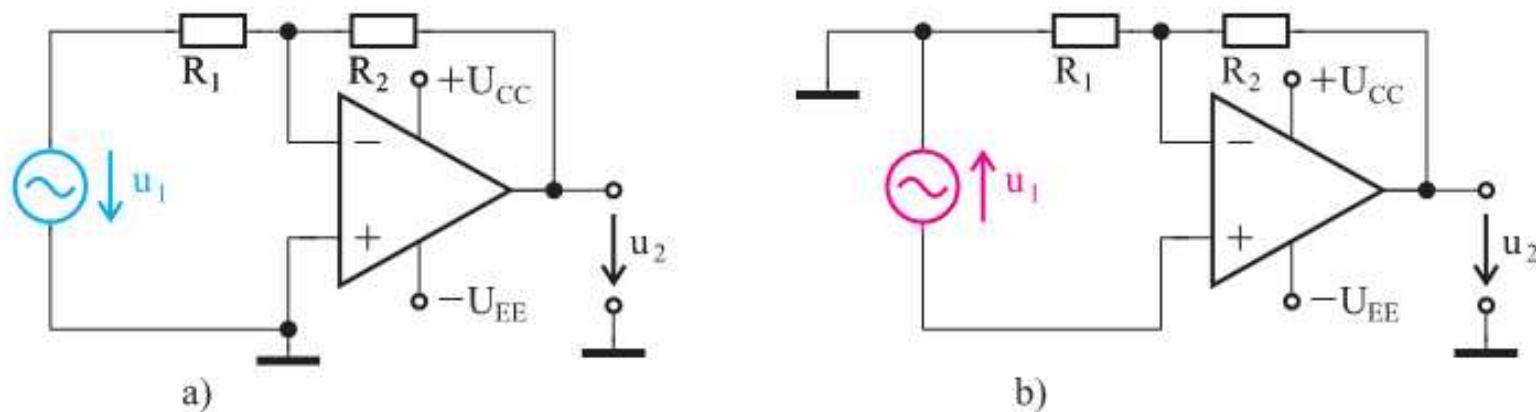


br. 8.2 a) Blokové schéma klasického OZ. b) Zjednodušené schéma zapojení OZ typu 741.

Operační zesilovač a zpětná vazba



Obr. 8.4 a) Zesílení zesilovače bez zpětné vazby a se zpětnou vazbou (b).

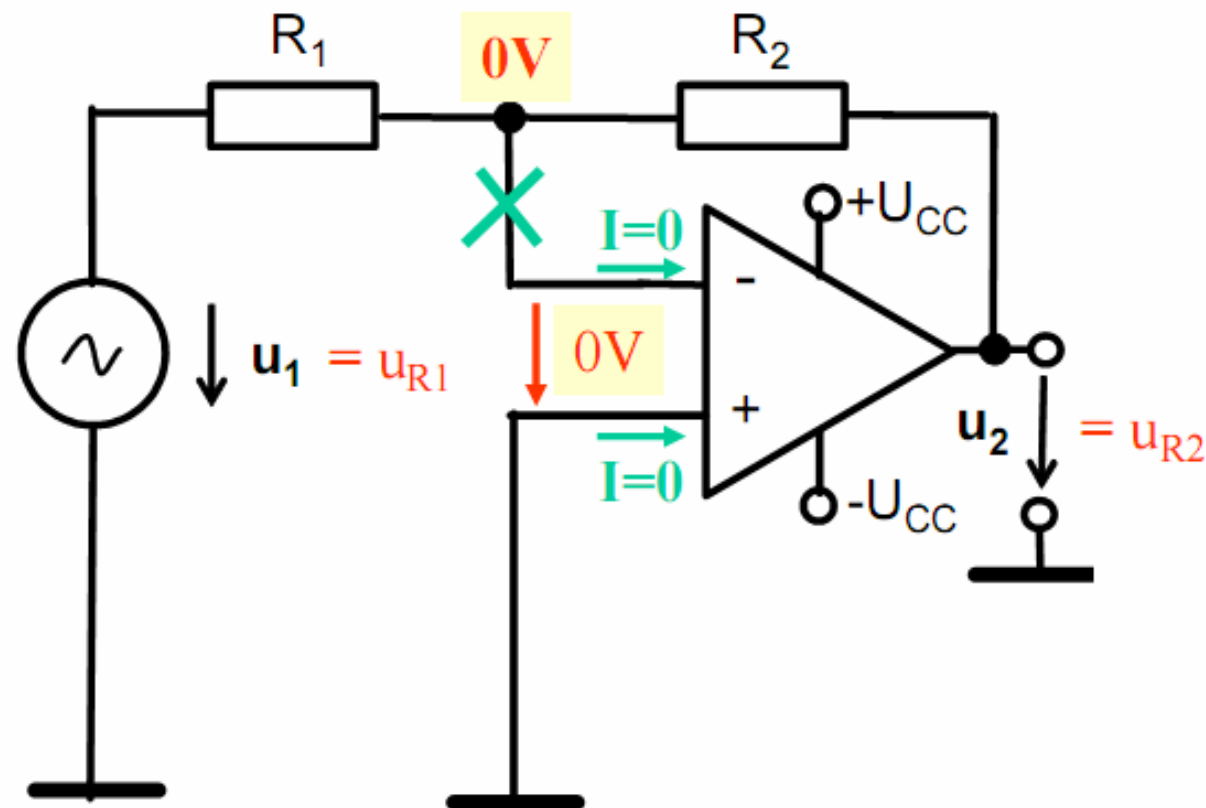


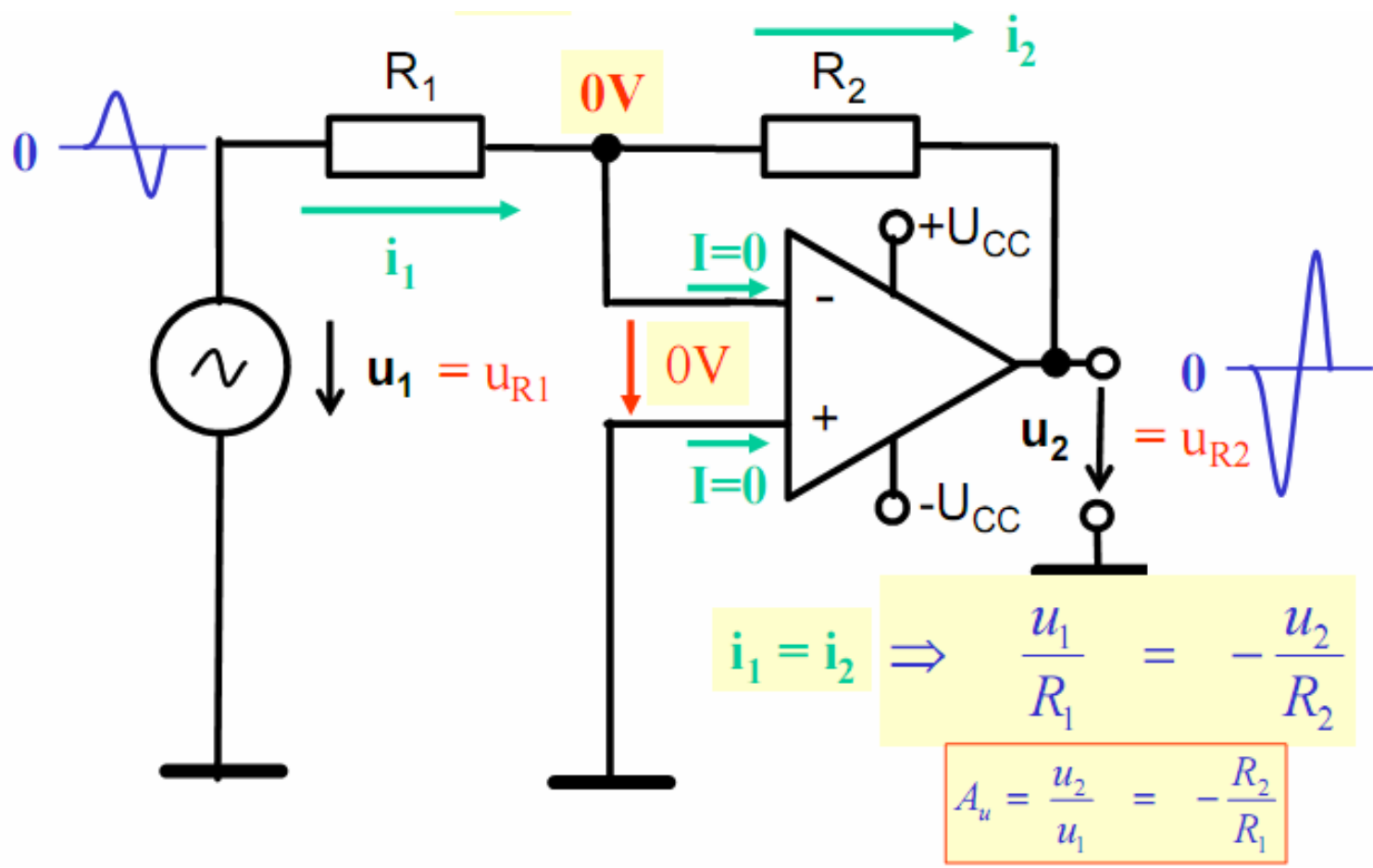
Obr. 8.5 Invertující zesilovač s OZ (a). Neinvertující zesilovač s OZ (b). Pozor na polohu společného vodiče (země) a fázi vstupního střídavého napětí u_1 vyznačenou šipkou.

Invertující zesilovač s OZ

1. OZ se pokouší na svém výstupu nastavit takové napětí, aby přes zápornou zpětnou vazbu došlo k nastavení nulového vstupního rozdílového napětí.

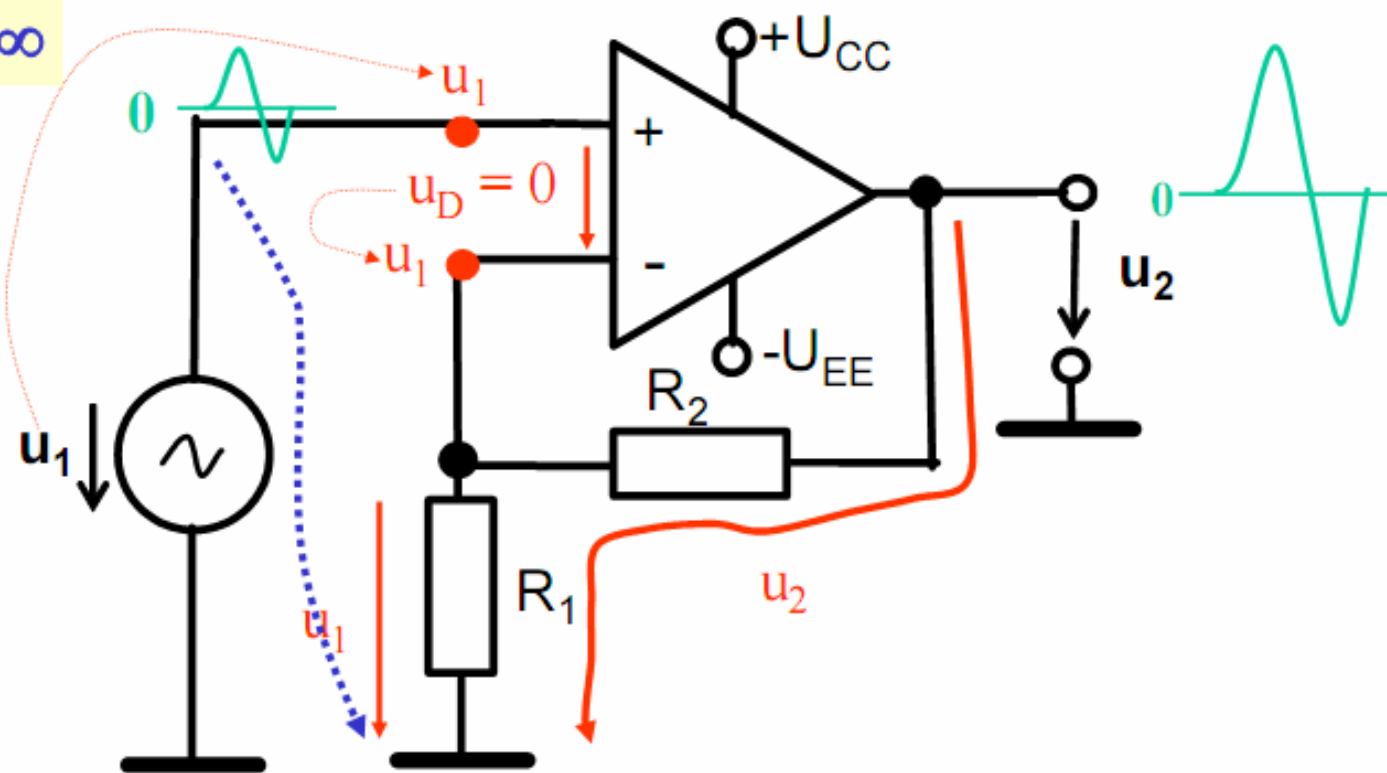
2. Do vstupů OZ neteče proud. $I=0$





Neinvertující zesilovač s OZ

$$R_{vst} = \infty$$

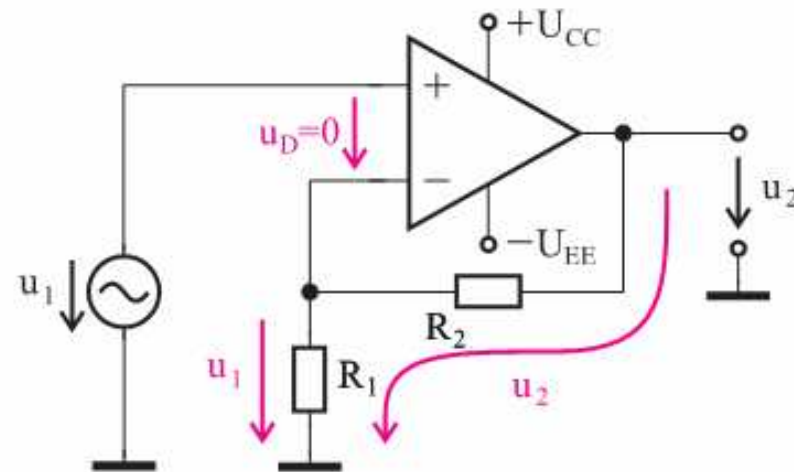


$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (8.6)$$

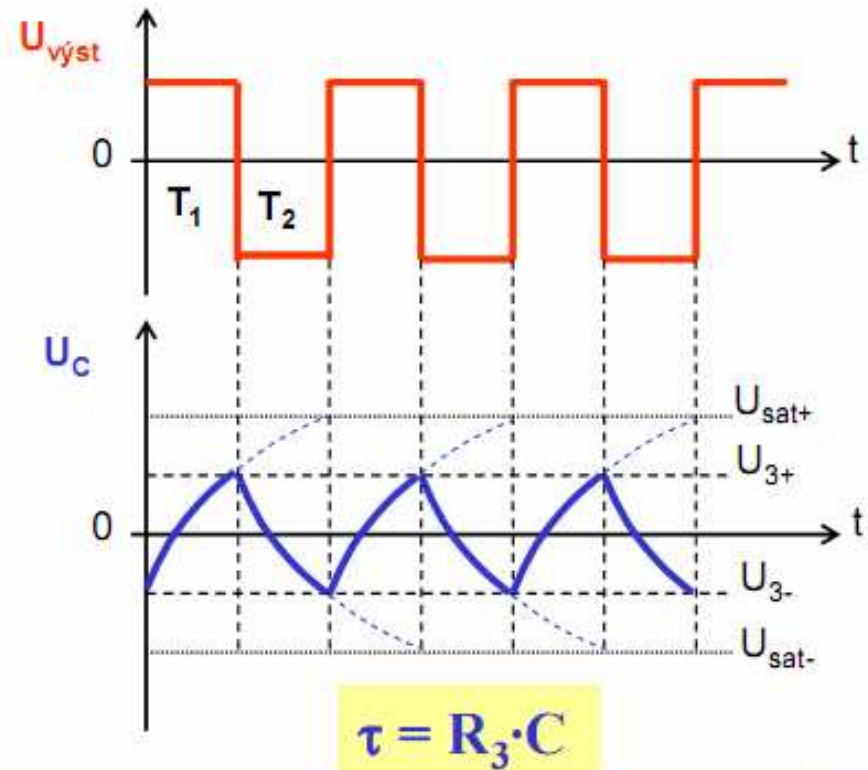
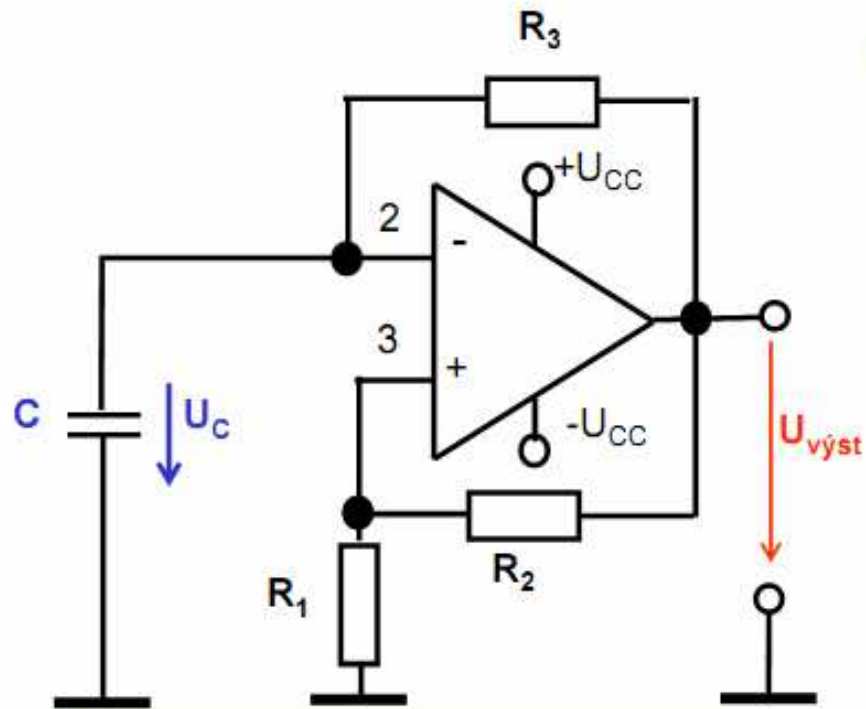
Protože je vstupní napětí přivedeno na neinvertující (+) vstup, je fáze vstupního a výstupního napětí shodná a zesilovač “neinvertuje”. Vstupní odpor (impedance) je dán vstupním odporem OZ mezi neinvertujícím (+) a invertujícím (-) vstupem (obr. 8.1), a je proto v případě ideálního OZ nekonečný (Pravidlo 2.).

Výstupní odpor zesilovače je i v tomto případě velmi malý, typicky v řádu jednotek až desítek Ω .



Obr. 8.7 Neinvertující zesilovač s ideálním OZ má na neinvertujícím i invertujícím vstupu vstupní napětí u_1 .

Astabilní klopný obvod - AKO (= multivibrátor)



Nabíjení kapacitoru ze zdroje U_{SAT+} :

$$U_C(t) = U_{3-} + (U_{SAT+} - U_{3-}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = U_{SAT-} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_{SAT+} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

Vybíjení kapacitoru ze zdroje U_{SAT-} :

$$U_C(t) = U_{3+} + (U_{SAT-} - U_{3+}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) = -U_{SAT+} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_{SAT-} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$