

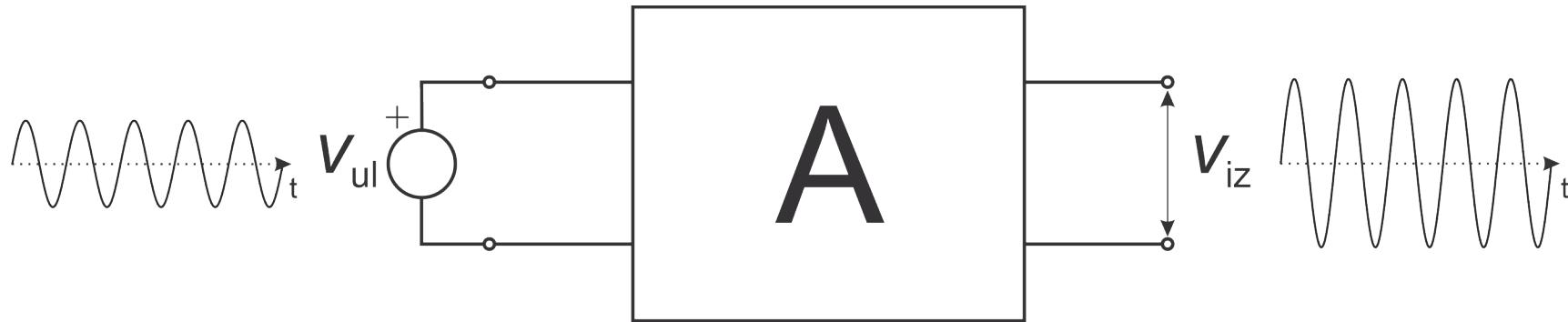


# Bipolarni tranzistor

**Marko Dimitrijević**

# Koncept pojačavača

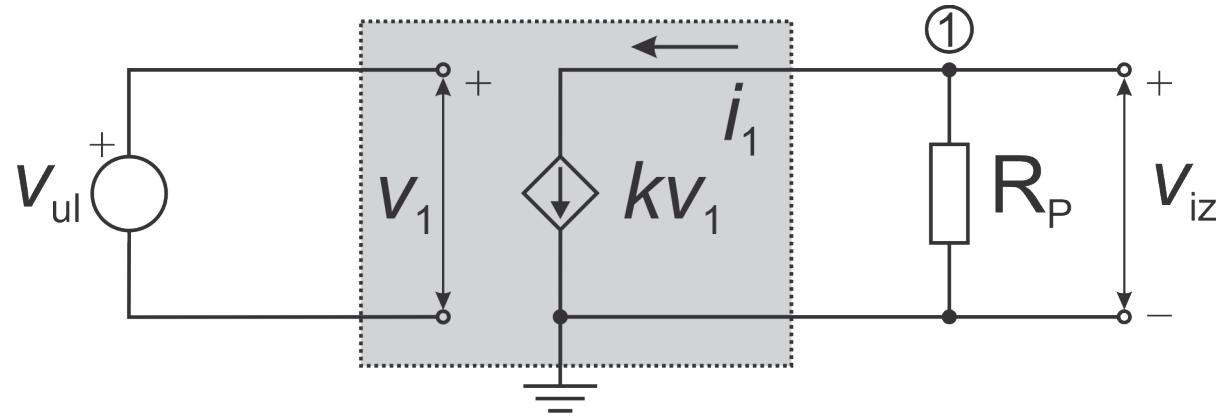
- Pojačavač je četvoropol koji pojačava snagu signala (napon, struju).



$$v_{iz}(t) = A \cdot v_{ul}(t)$$

# Koncept pojačavača

- Pojačavač se može realizovati pomoću kontrolisanog izvora.

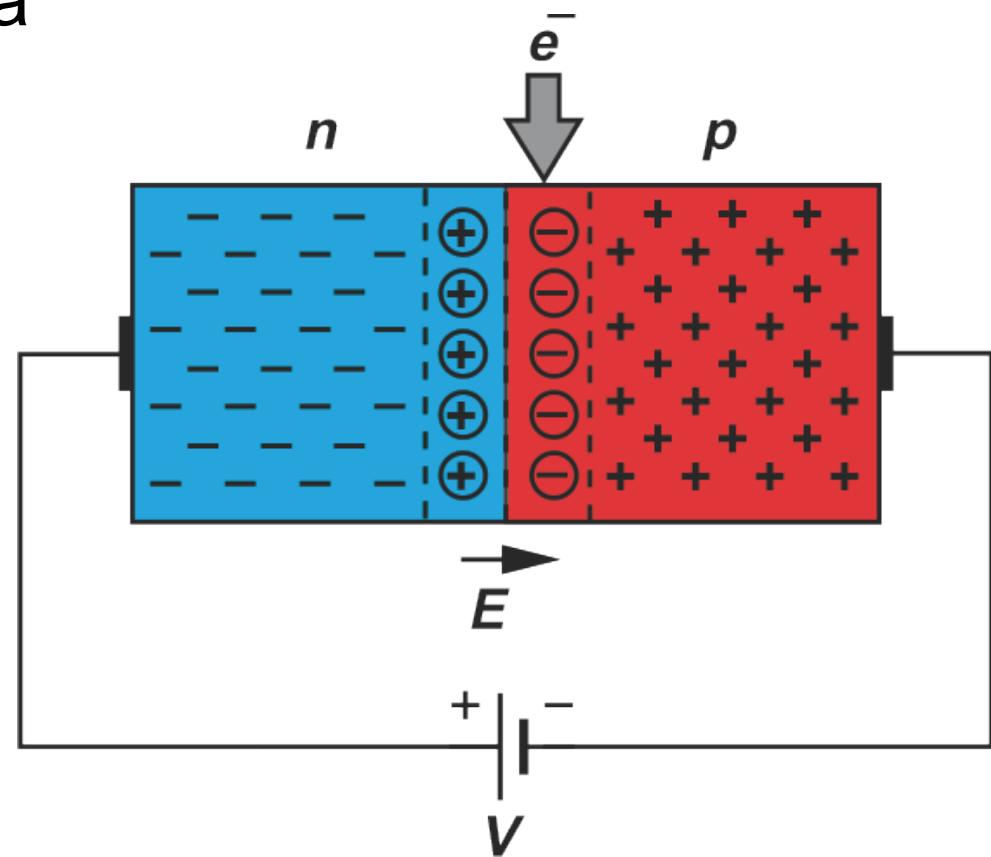


$$\frac{V_{iz}}{R_P} + kV_1 = 0, \quad V_1 = V_{ul}$$
$$V_{iz} = -k \cdot V_{ul} \cdot R_P$$

# Bipolarni tranzistor - principi

## 1. Injekcija slobodnih naelektrisanja

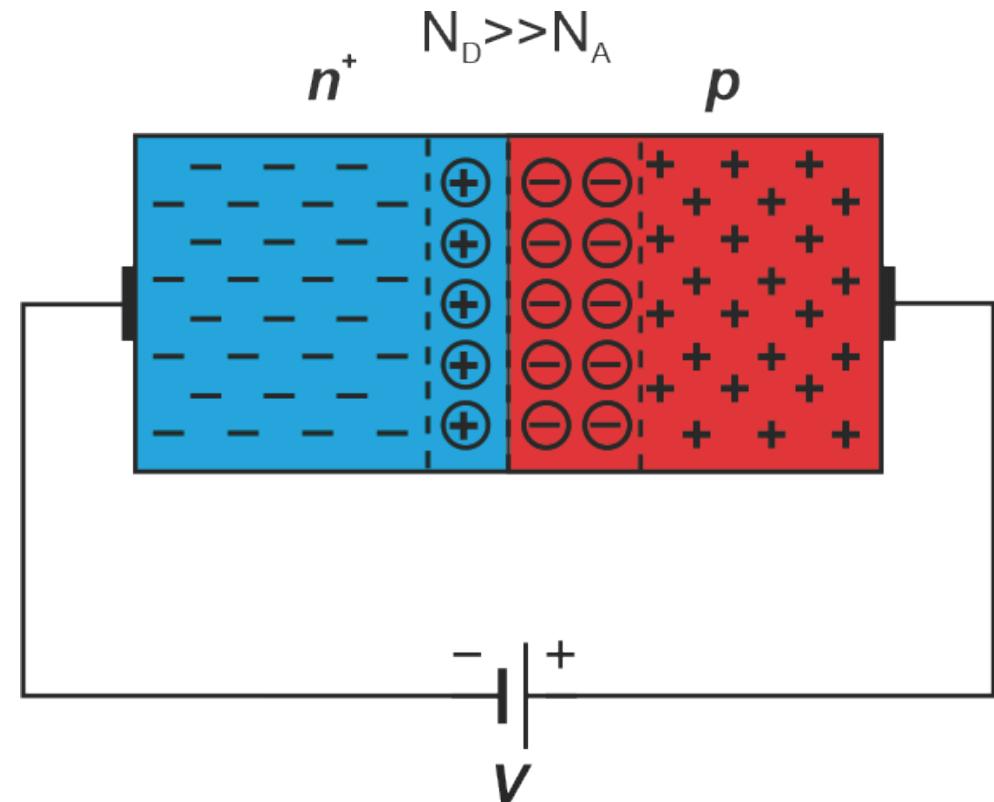
- Inverzno polarisani PN spoj se ponaša kao prekid u kolu, zbog rekonbinacije broj slobodnih naelektrisanja je mal.
- Slobodna naelektrisanja koja su ubaćena u osiromašenu oblast se mogu kretati pod uticajem električnog polja i čine struju drifta.



# Bipolarni tranzistor - principi

## 2. Asimetrično dopiranje

- Ukoliko je koncentracija dopanata različita u P i N oblasti, PN spoj je **asimetrično dopiran**. Koncentracije elektrona i šupljina će biti različite.
- Kod direktno polarisanog asimetričnog PN spoja, **većinski nosioci oblasti koja je dopirana većom koncentracijom** (na datom primeru, **elektroni**) će imati veći doprinos struji drifta.



# Bipolarni tranzistor

- Tranzistor je poluprovodnička komponenta koja može da radi u nekoliko režima, koji se mogu kontrolisati naponima između njegovih priključaka. U zavisnosti od režima rada, tranzistor može **pojačavati** signal ili se ponašati kao prekidač.
- Bipolarni tranzistor je tip tranzistora kod koga električnu struju čine oba nosioca nanelektrisanja – elektroni i šupljine.
- Bipolarni tranzistor su 1947. konstruisali **John Bardeen, Walter Brattain i William Shockley** iz Bell laboratorije.
- Otkriće tranzistora je omogućilo složenije elektronske uređaje i trasirao put ka razvoju integrisanih kola.

# Bipolarni tranzistor - istorija

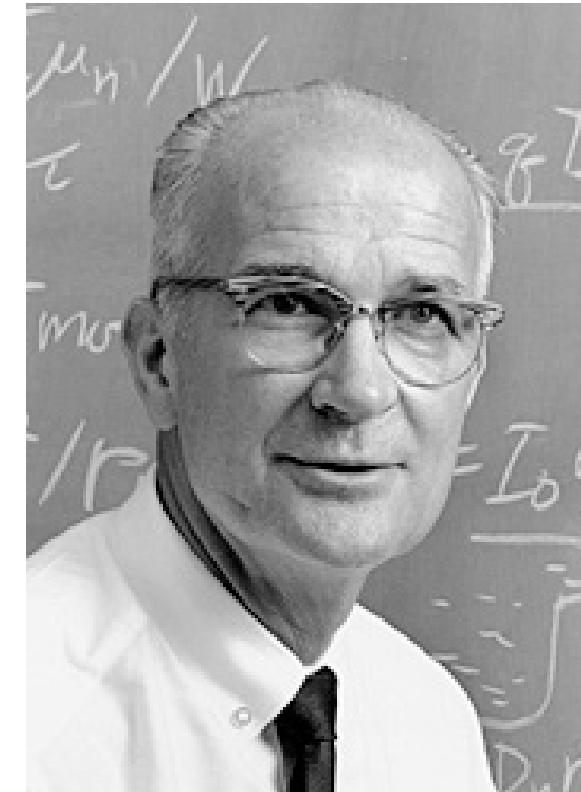
- Nobelova nagrada za fiziku 1956. godine (fotografije: wikipedia.org).



John Bardeen

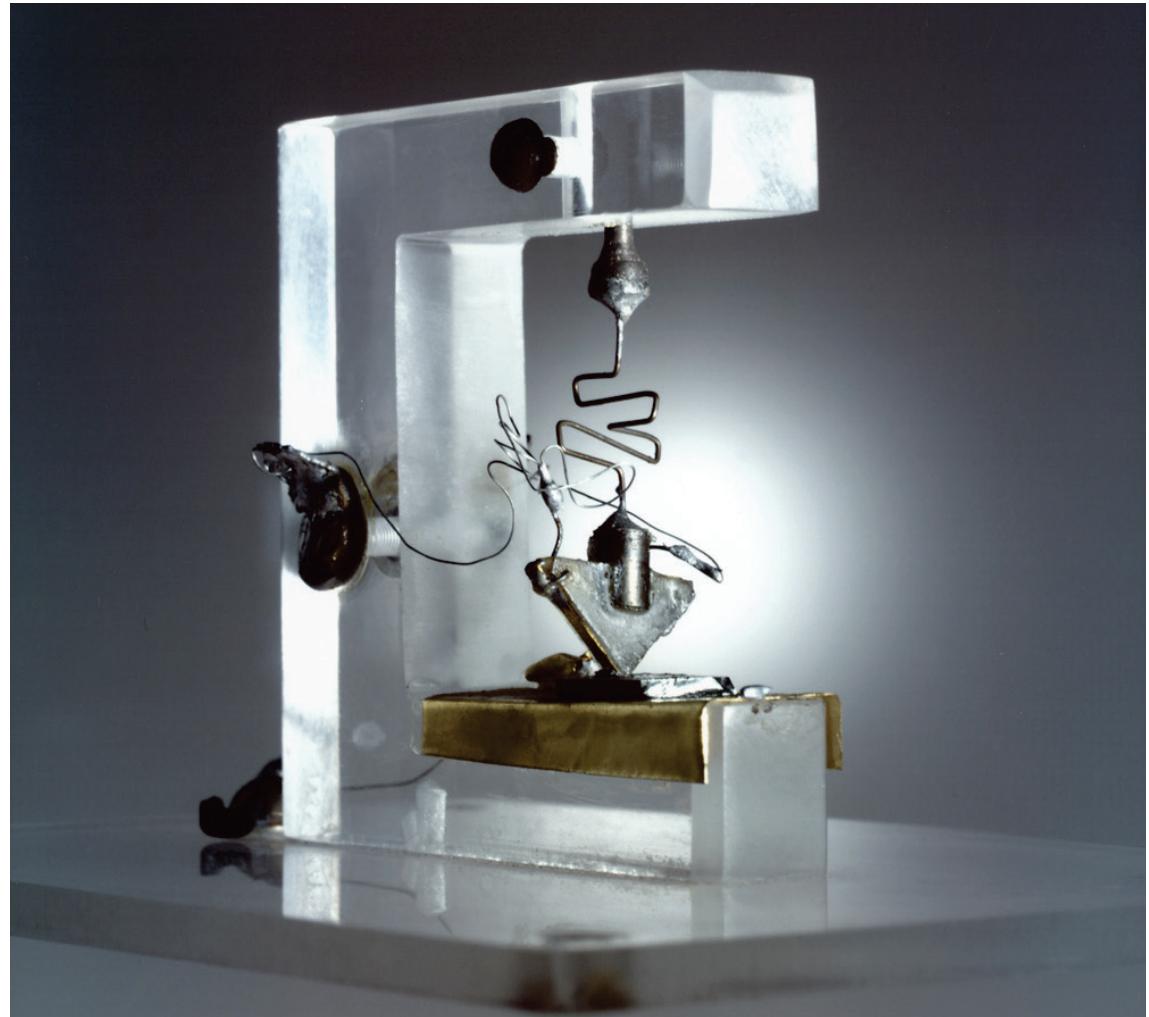
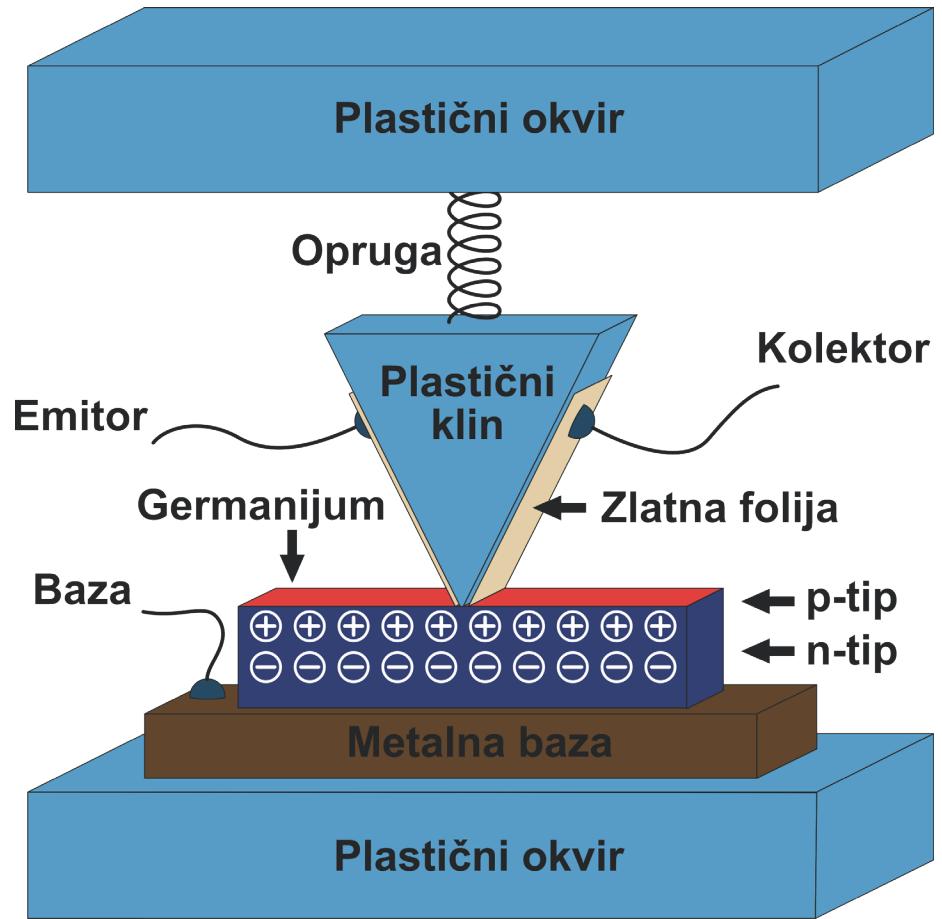


Walter Brattain

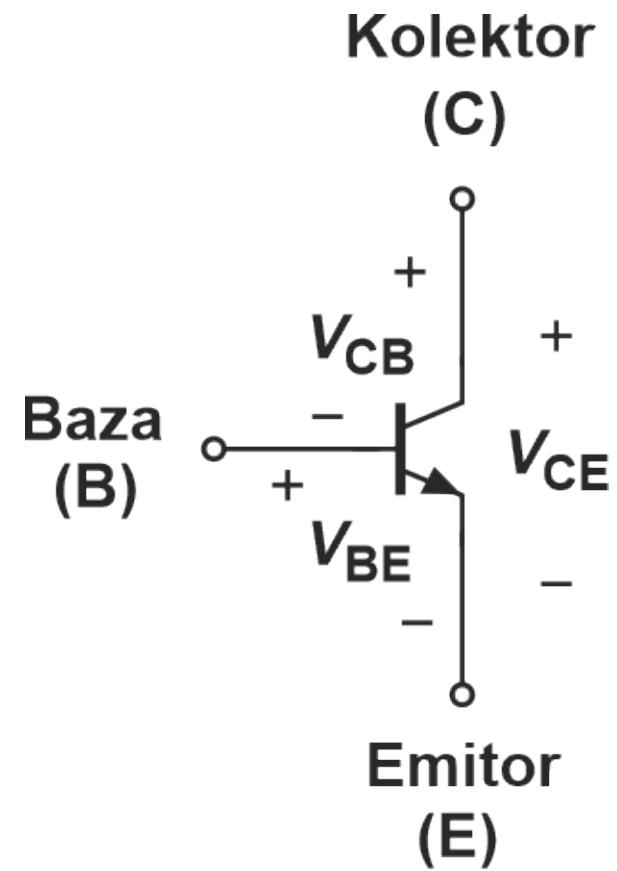
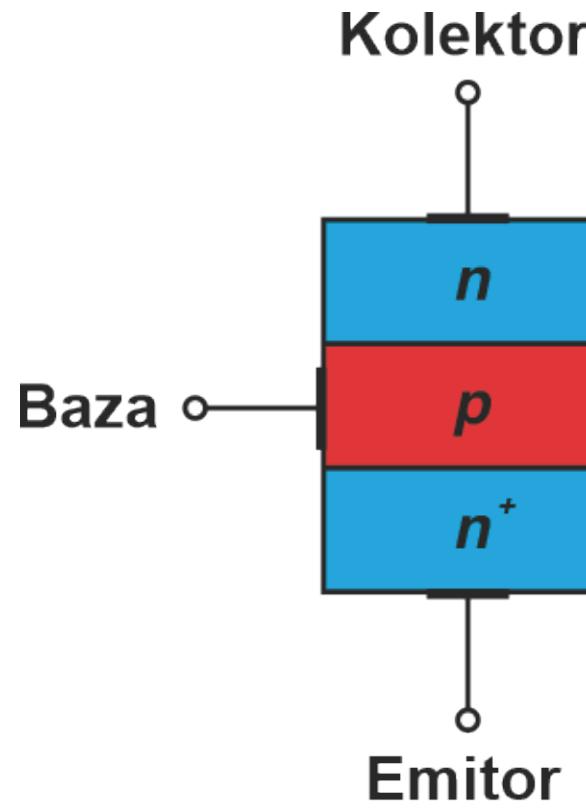


William Shockley

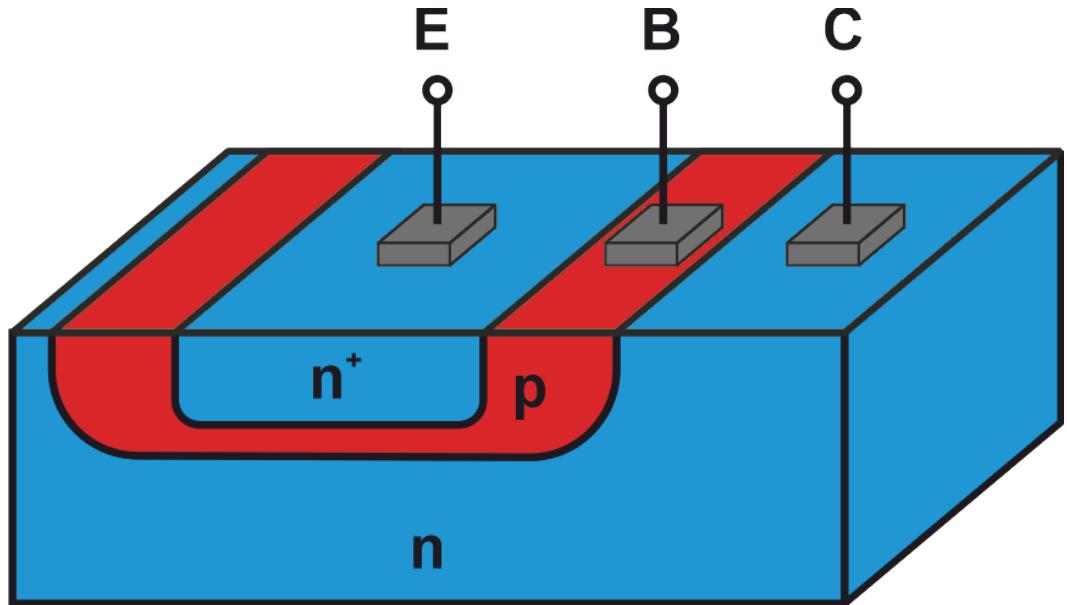
# Bipolarni tranzistor - istorija



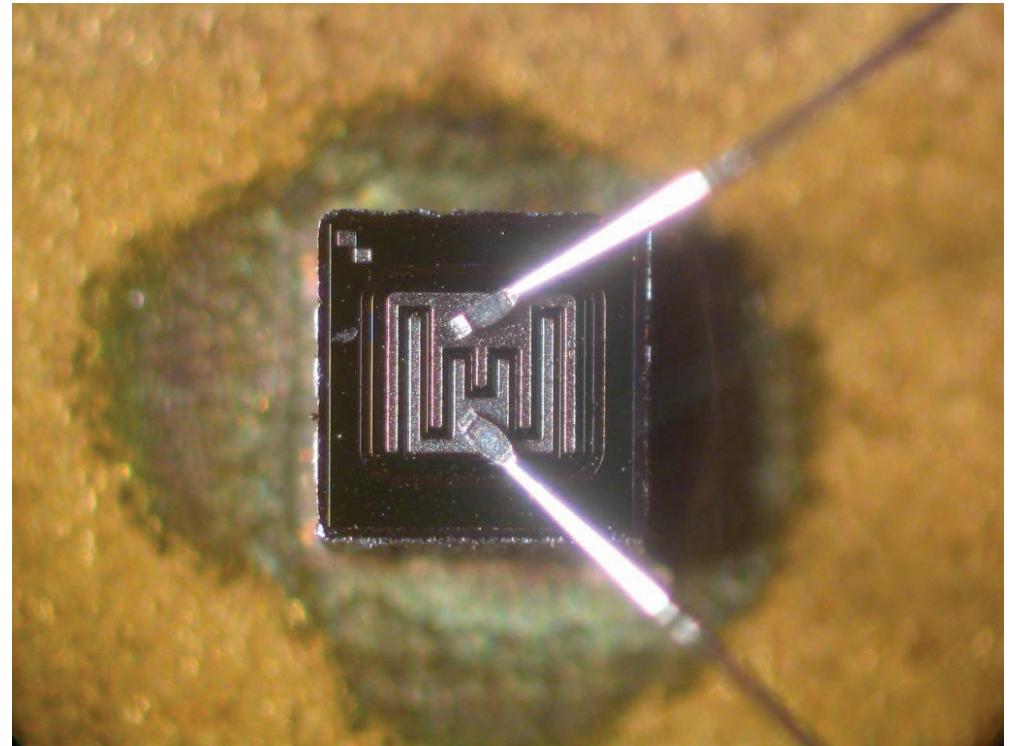
# Struktura bipolarnog tranzistora (NPN)



# Struktura bipolarnog tranzistora



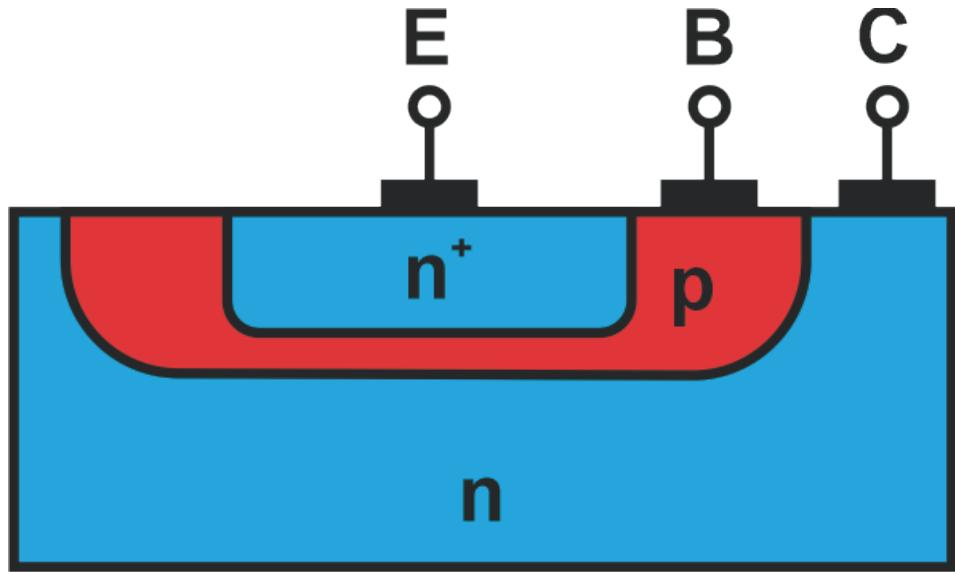
Poprečni presek NPN tranzistora (PNP tranzistor ima analognu strukturu, oblasti kolektora i emitora su p tipa, oblast baze n tipa)



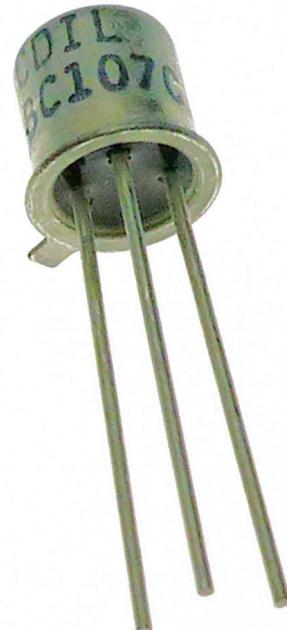
NPN tranzistor KSI34. Žice (*bonds*) su povezane sa bazom i emitorom. Kolektor je kratkospojen sa metalnim kućištem inkapsulacije.

(fotografija: wikipedia.org)

# Struktura bipolarnog tranzistora



Poprečni presek

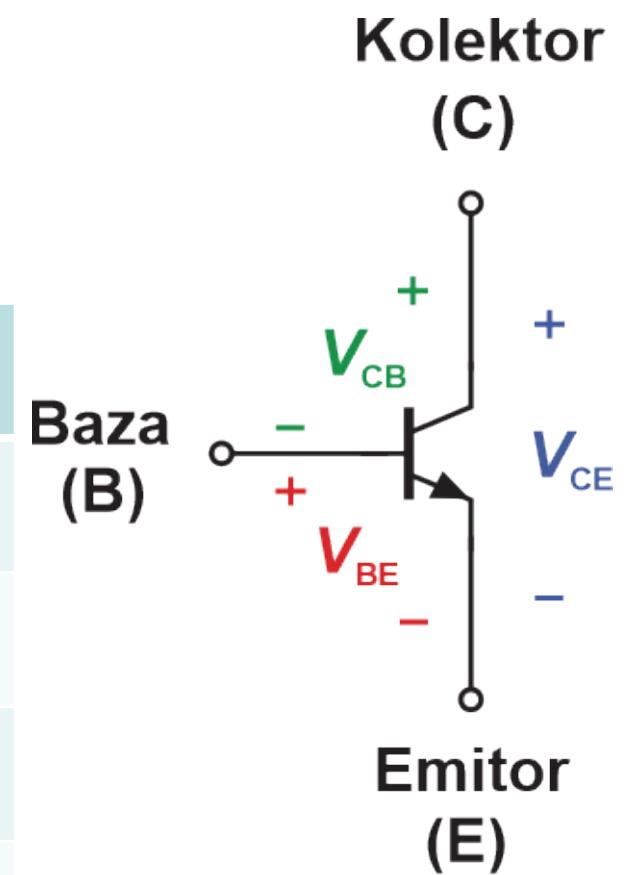


BC107

# Režimi rada (NPN tip tranzistora)

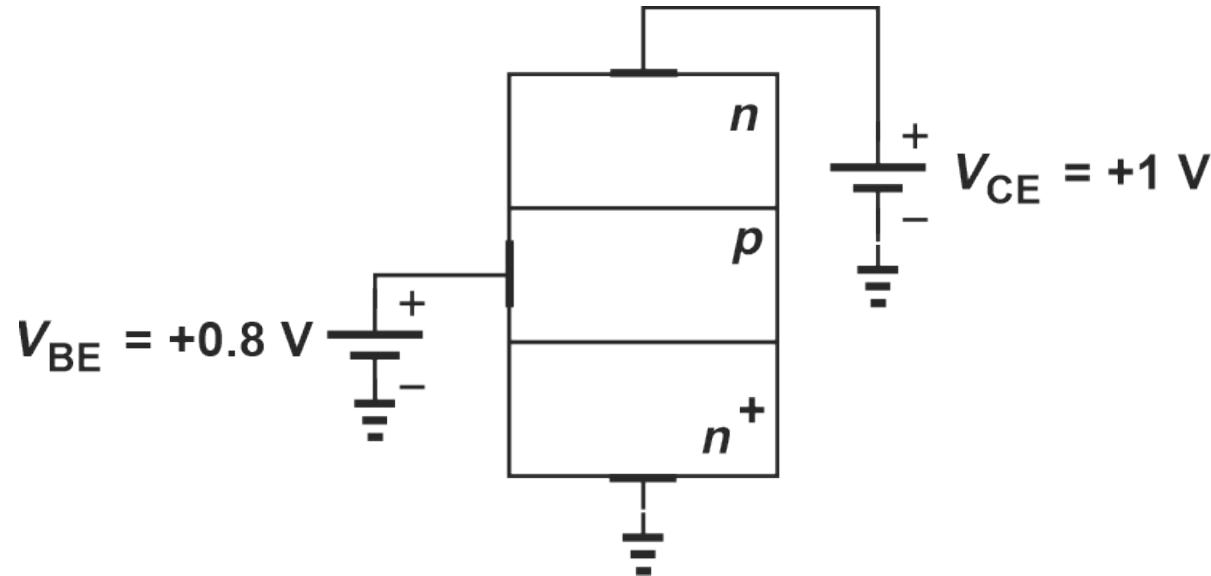
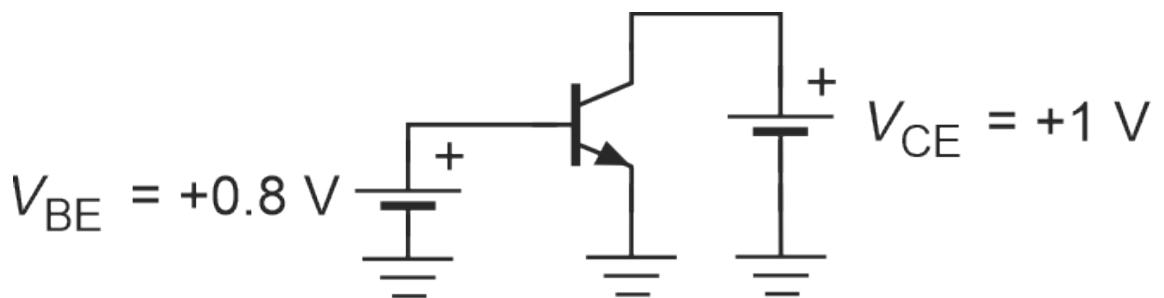
- Režim rada bipolarnog tranzistora zavisi od polarizacija spojeva, odnosno napona između priključaka:

Naponi	Emitorski spoј	Kolektorski spoј	Režim rada	Ponašanje
$V_{BE} > 0$ , $V_{CB} > 0$	direktno	inverzno	aktivna oblast	Kontrolisani strujni izvor
$V_{BE} > 0$ , $V_{CB} < 0$	direktno	direktno	zasićenje	Zatvoreni prekidač
$V_{BE} < 0$ , $V_{CB} > 0$	inverzno	inverzno	zakočenje	Otvoreni prekidač
$V_{BE} < 0$ , $V_{CB} < 0$	inverzno	direktno	inverzna aktivna oblast	



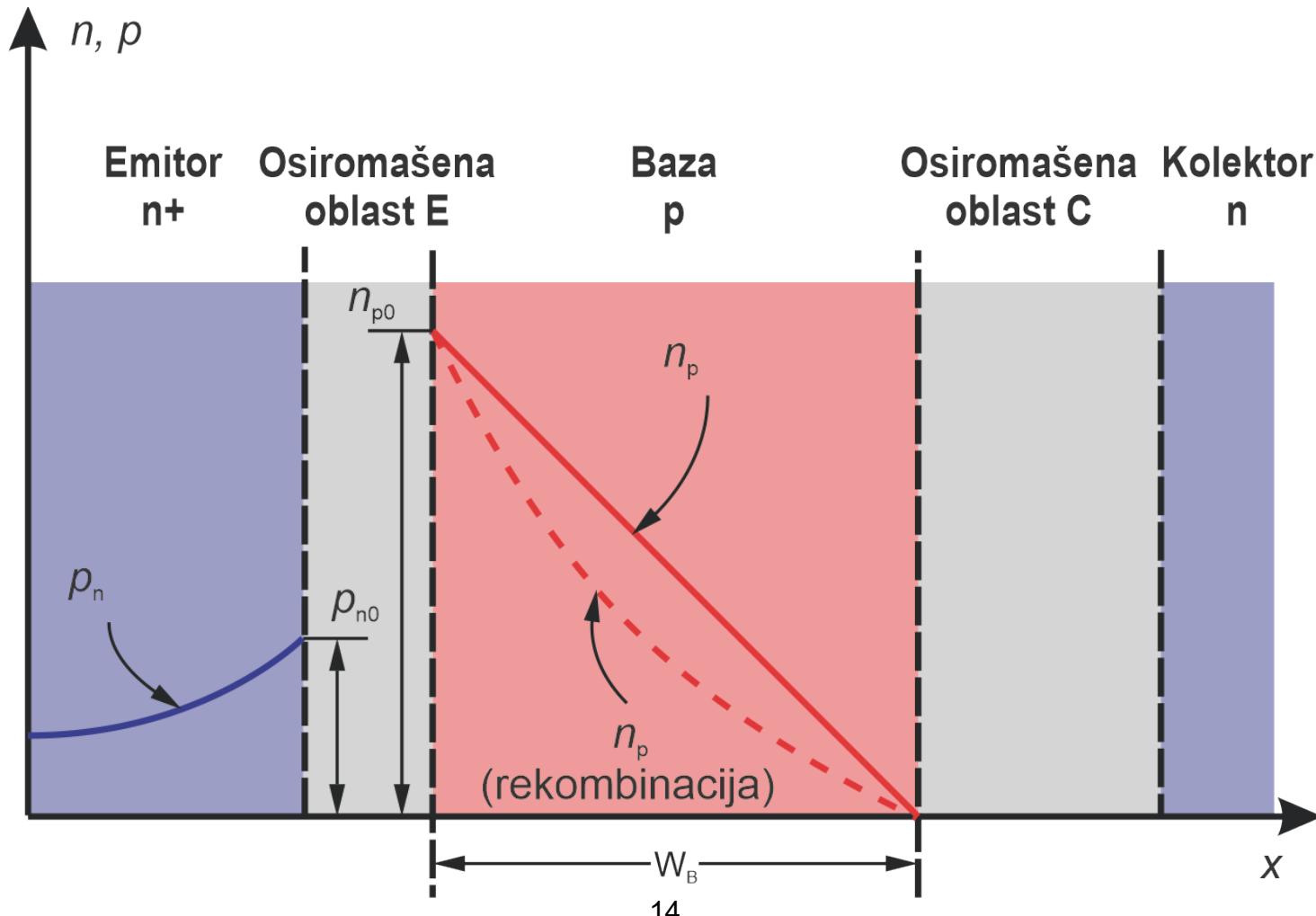
# Tranzistorski efekat – aktivni režim

- Aktivan režim tranzistora se postiže **direktnom polarizacijom emitorskog i inverznom polarizacijom kolektorskog spoja.**

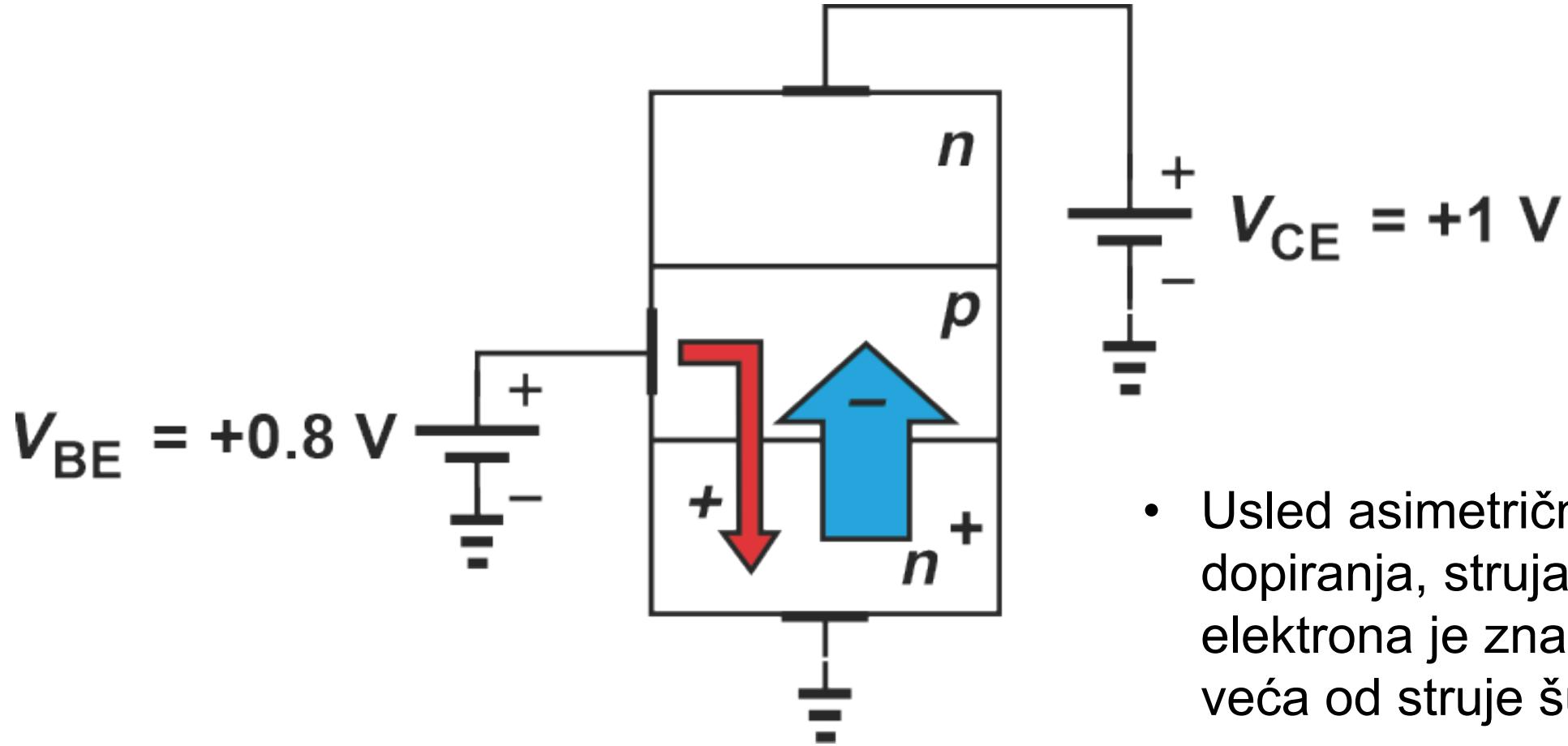


$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} \geq 0$$

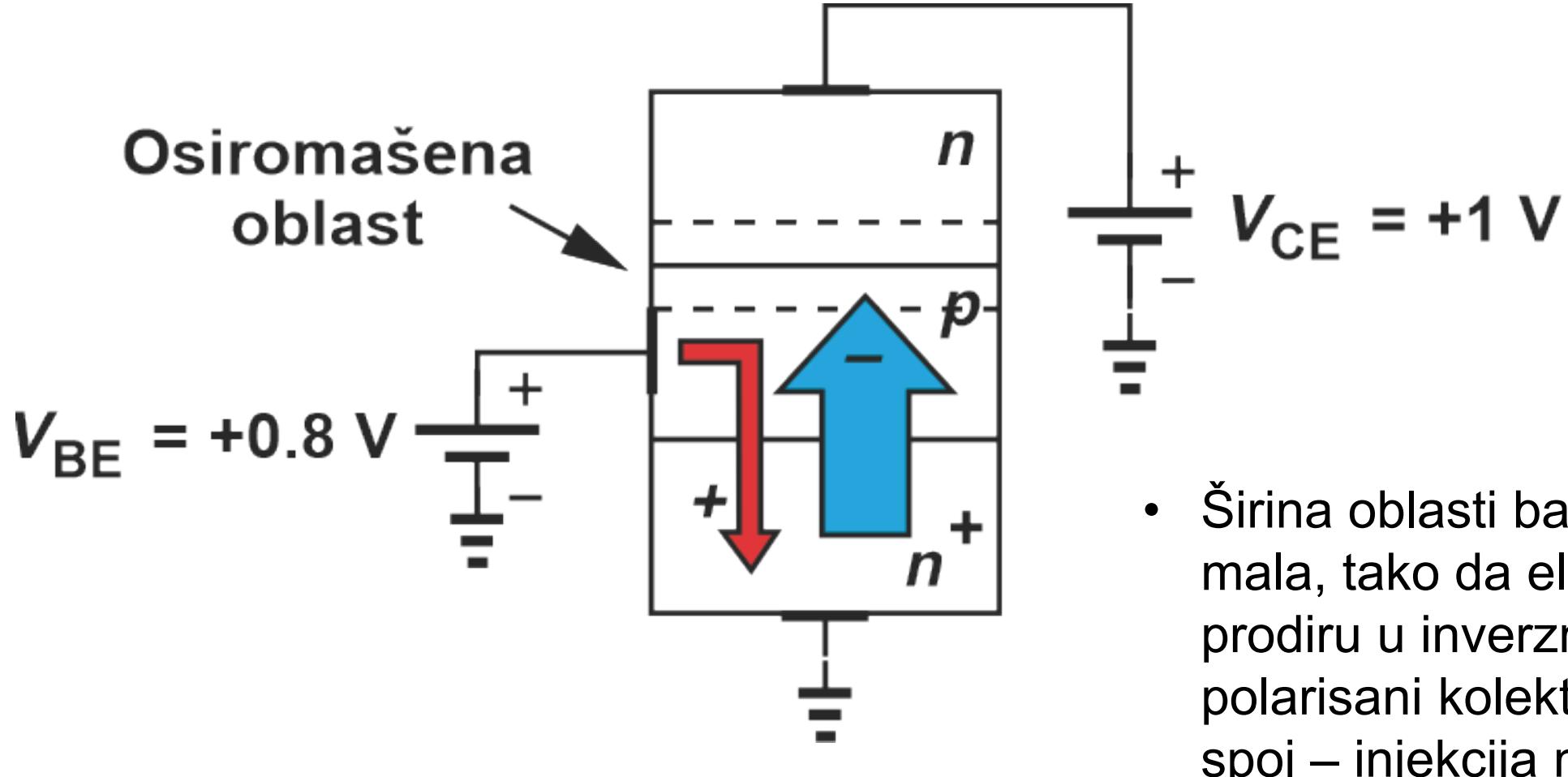
# Tranzistorski efekat – koncentracija nosilaca



# Tranzistorski efekat – asimetrično dopiranje

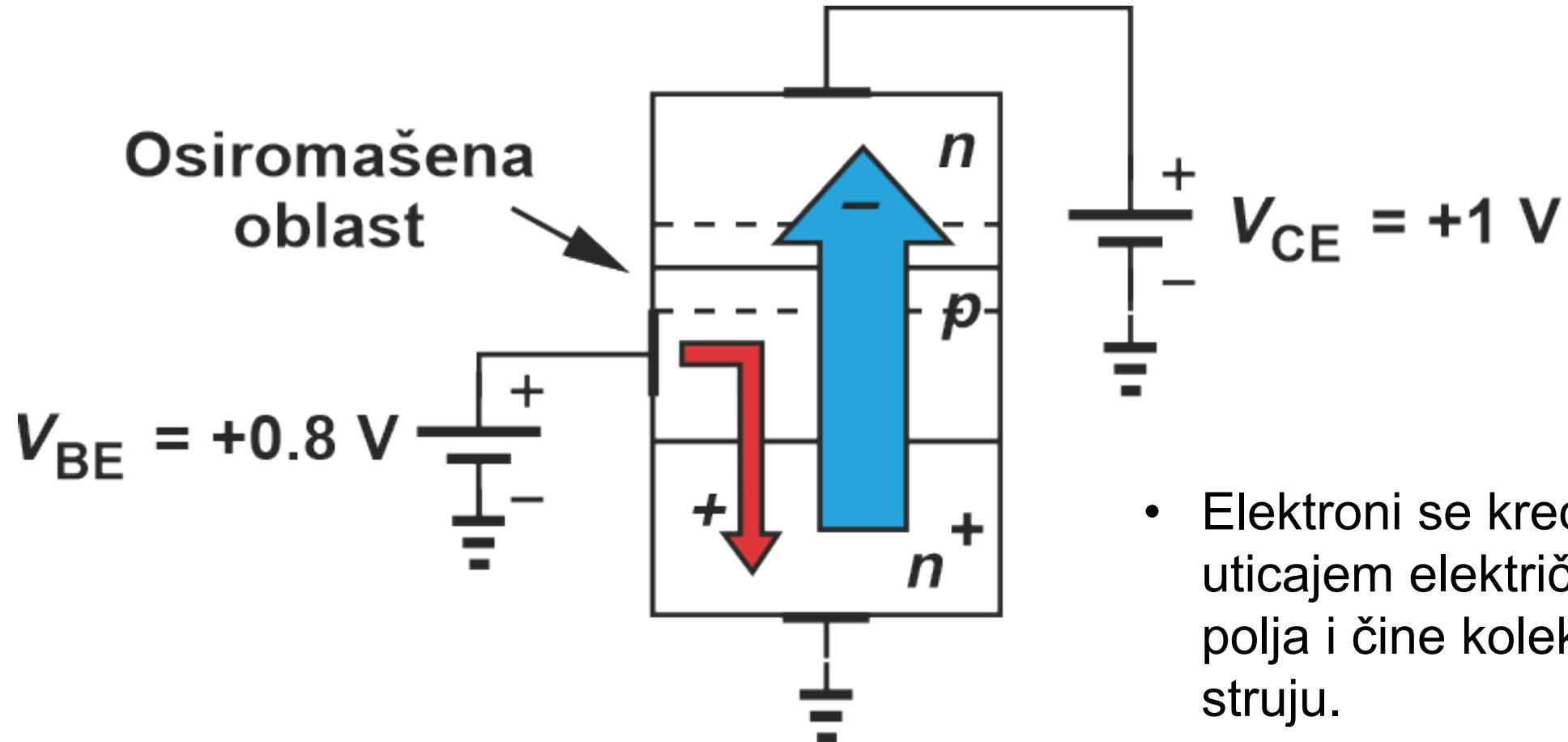


# Tranzistorski efekat – injekcija nosilaca

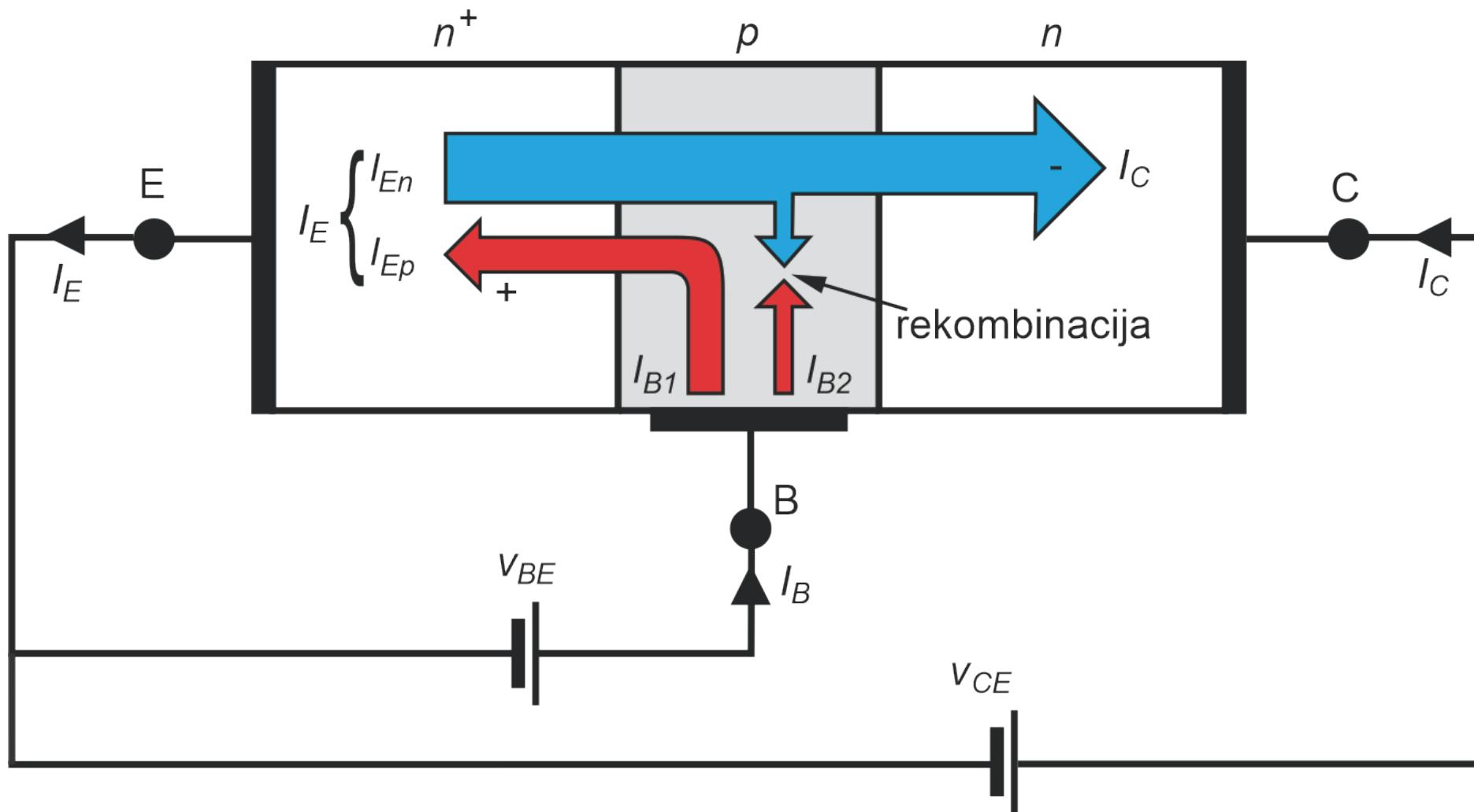


- Širina oblasti baze  $W_B$  je mala, tako da elektroni prodiru u inverzno polarisani kolektorski spoj – injekcija nosilaca.

# Tranzistorski efekat – injekcija nosilaca



# Struje bipolarnog tranzistora



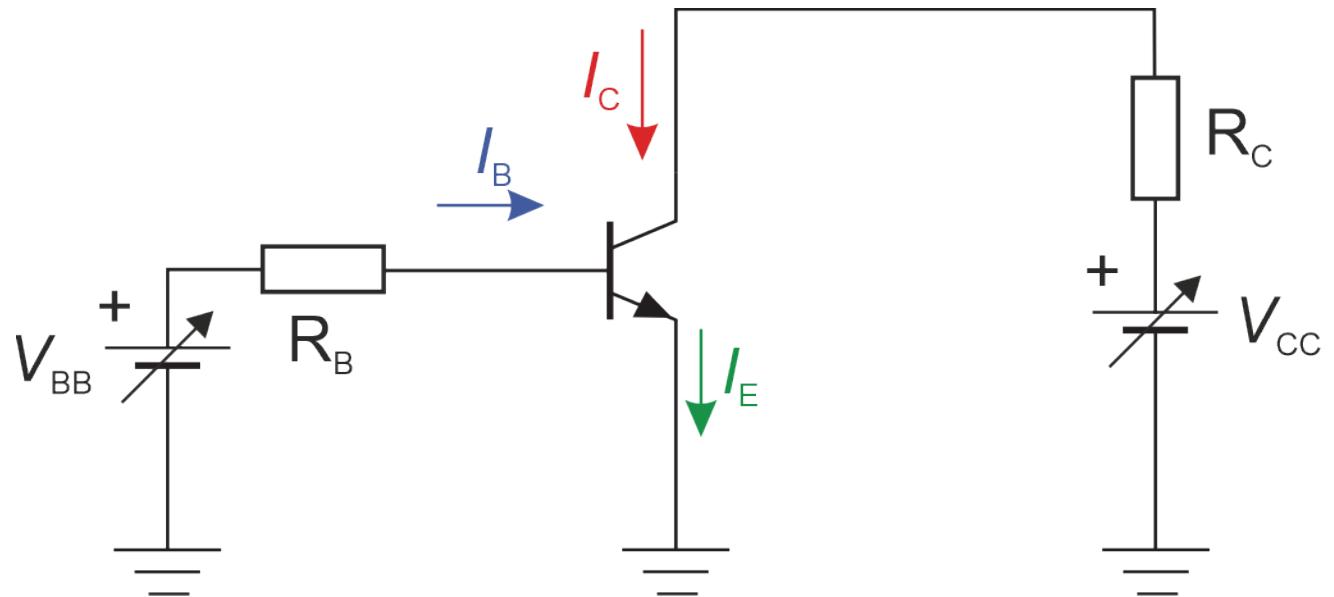
# Zavisnost struje kolektora $I_C$ od struje baze $I_B$

- Struja koju čine većinski nosioci – elektroni (**struja kolektora**) je proporcionalna struji koju čine manjinski nosioci – šupljine (**struja baze**), zavisnost je linearна:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

- $\beta$  je koeficijent strujnog pojačanja ( $\beta \approx 100$ ).**

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B$$

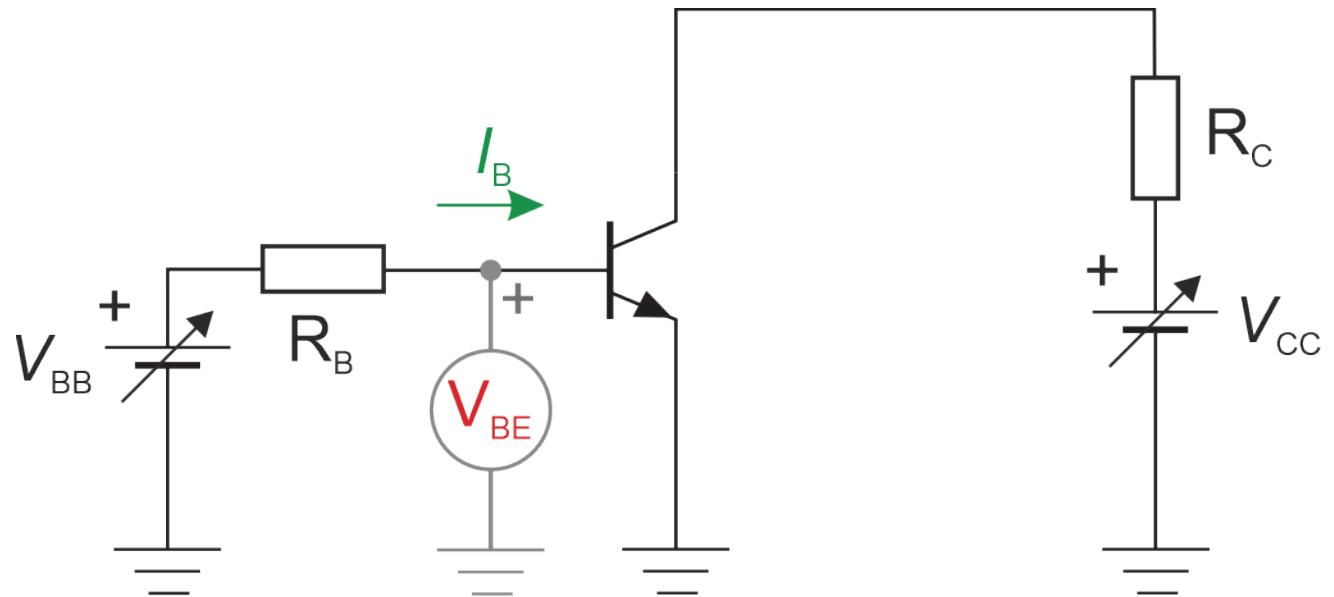


# Struja baze

- Struja baze  $I_B$  je struja direktno polarisanog PN spoja:

$$I_B = I_{BS} \left( \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_B \approx I_{BS} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$



$I_{BS}$  – struja zasićenja emitorskog spoja, konstanta

# Struja kolektora

$$I_C = I_S \left( \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

$$I_S = \frac{A_E \cdot q_e \cdot n_i^2 \cdot D_n}{W_B \cdot N_B}$$

$A_E$  – površina emitorskog spoja

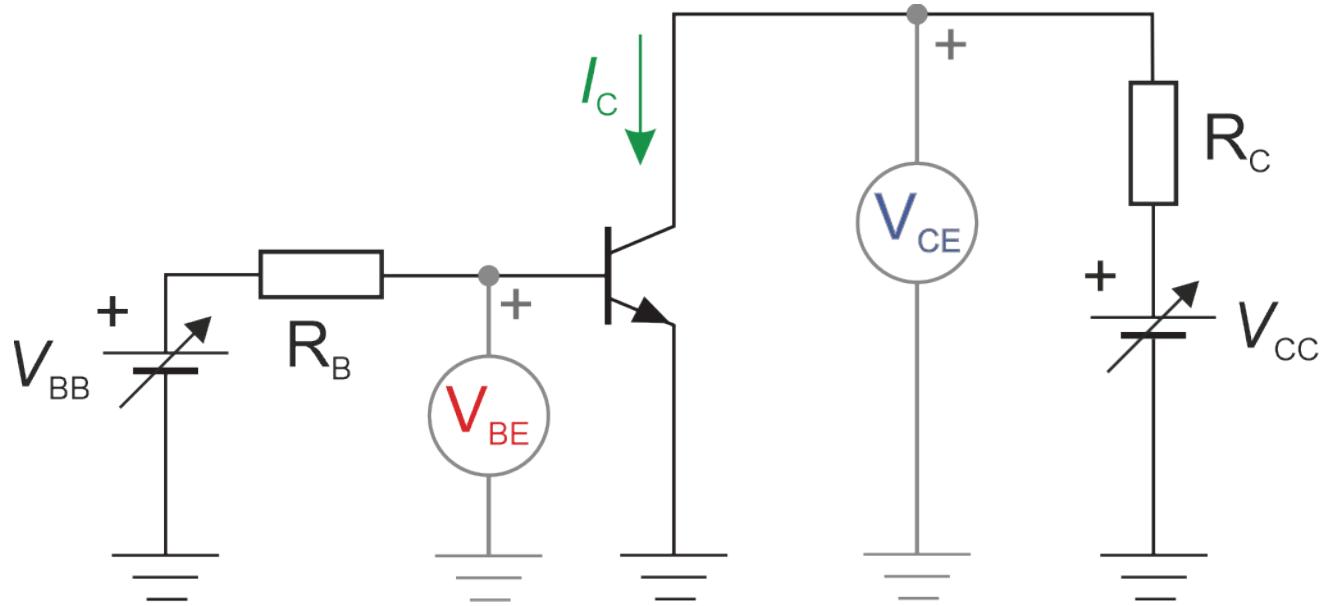
$W_B$  – širina oblasti baze

$N_B$  – koncentracija dopanata u bazi

$n_i$  – sopstvena koncentracija nosilaca

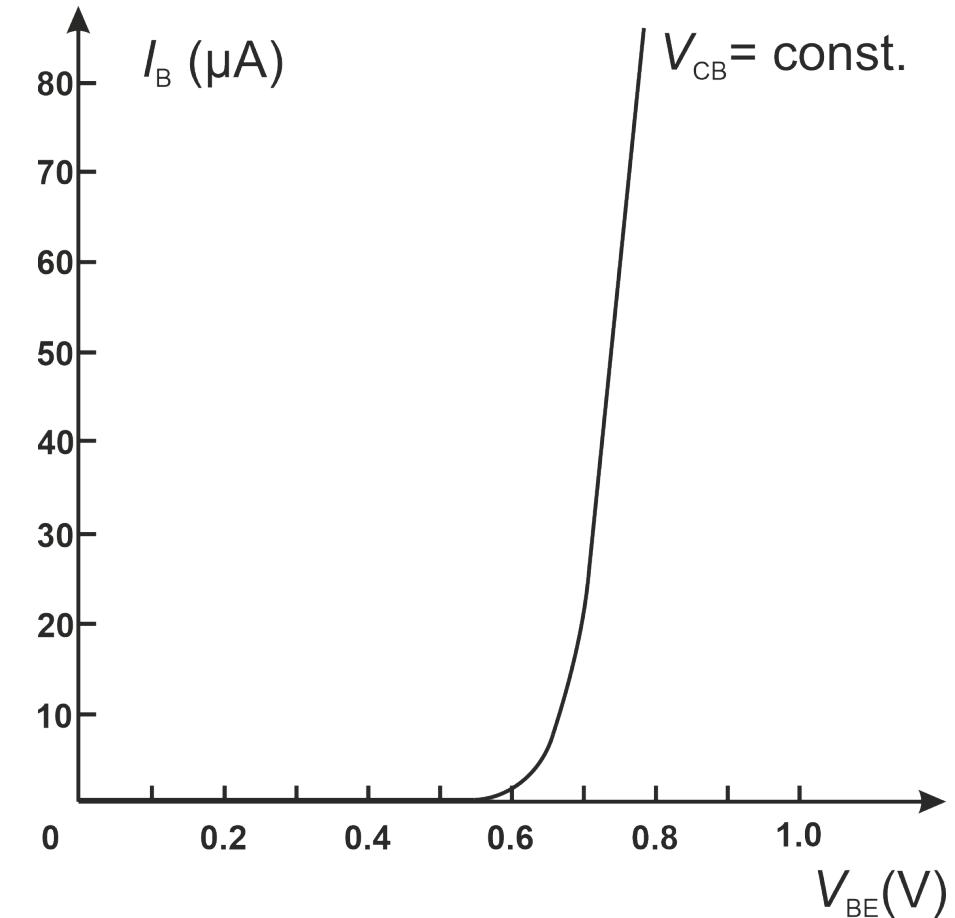
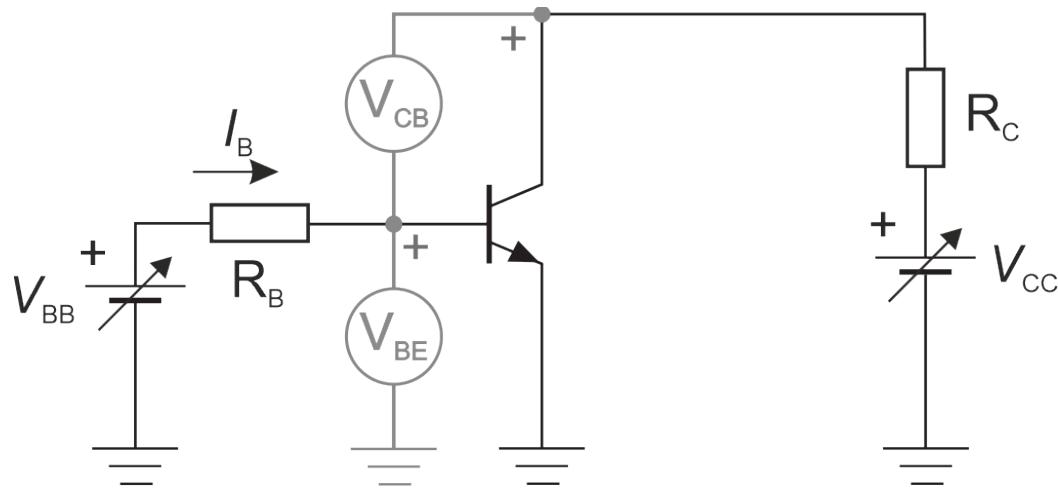
$D_n$  – difuzibilnost elektrona

$V_T$  – termalni napon (26mV na 300K)



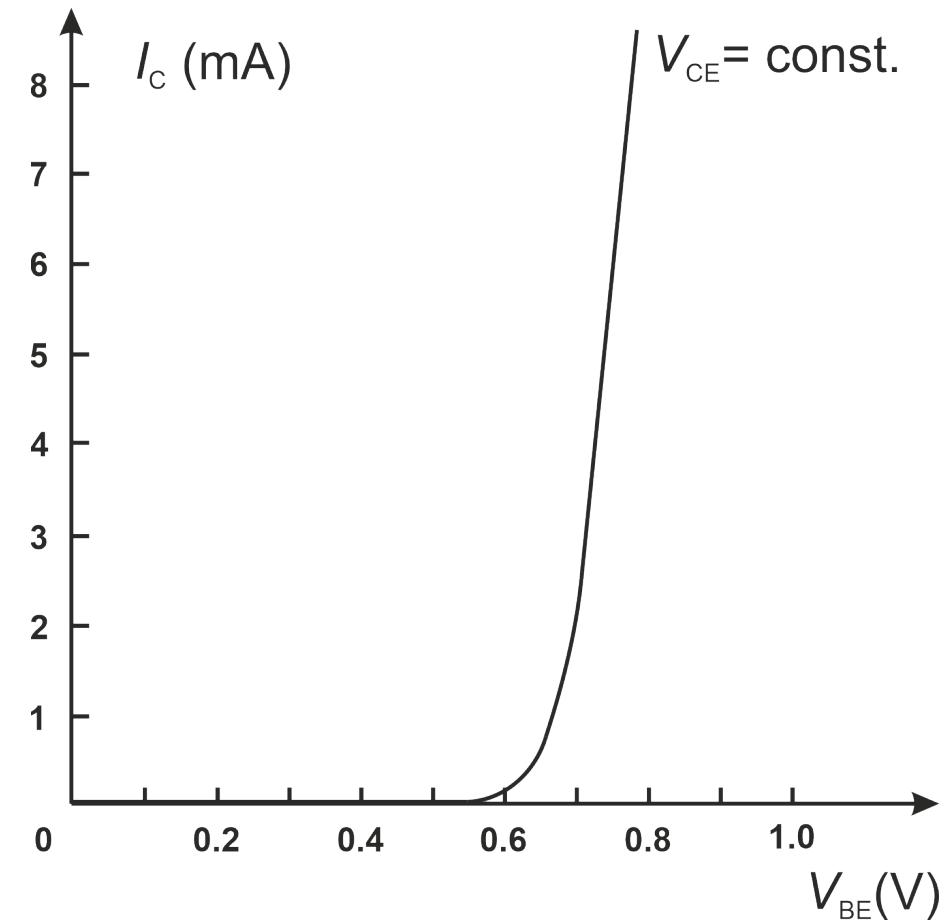
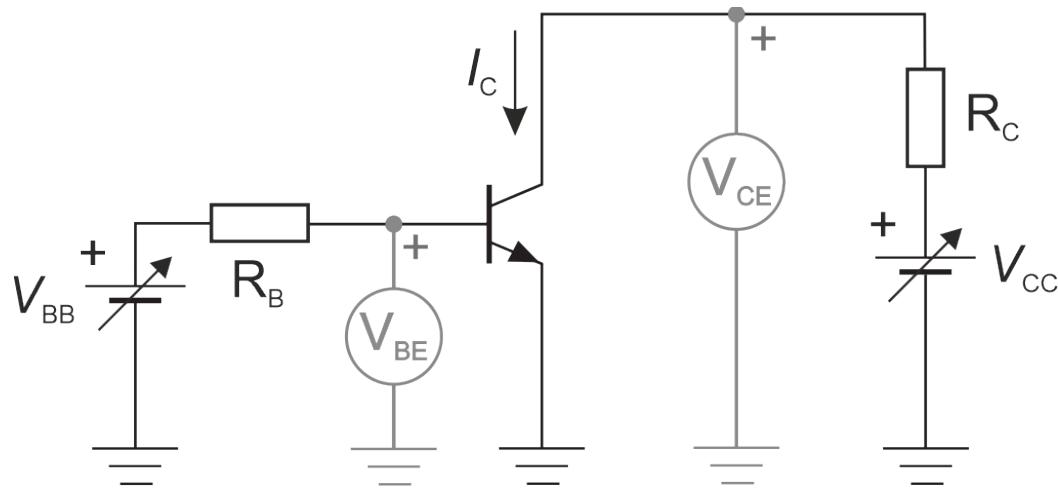
# Zavisnost struje baze $I_B$ od napona $V_{BE}$

- Ulazna karakteristika
- $V_{CB}$  konstantno
- Familija karakteristika za različite vrednosti  $V_{CB}$



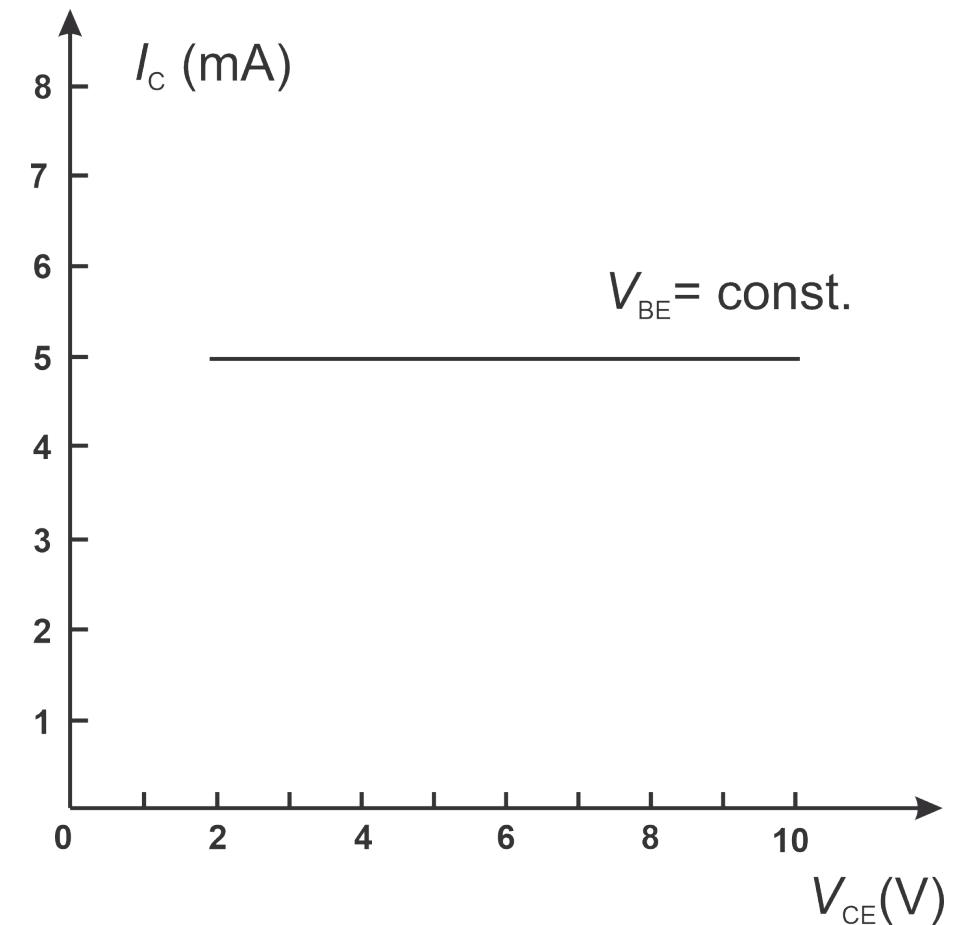
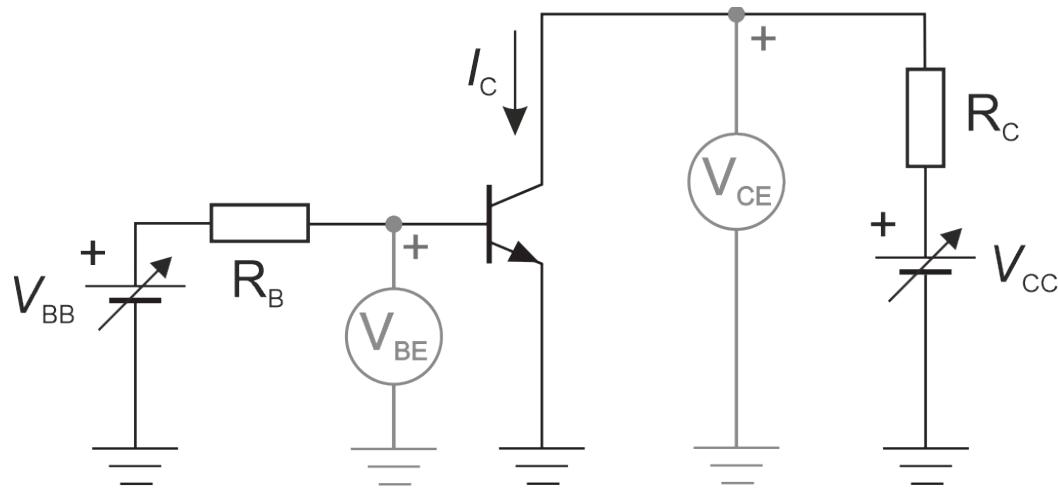
# Zavisnost struje kolektora $I_C$ od napona $V_{BE}$

- Prenosna karakteristika
- $V_{CE}$  konstantno
- Familija karakteristika za različite vrednosti  $V_{CE}$

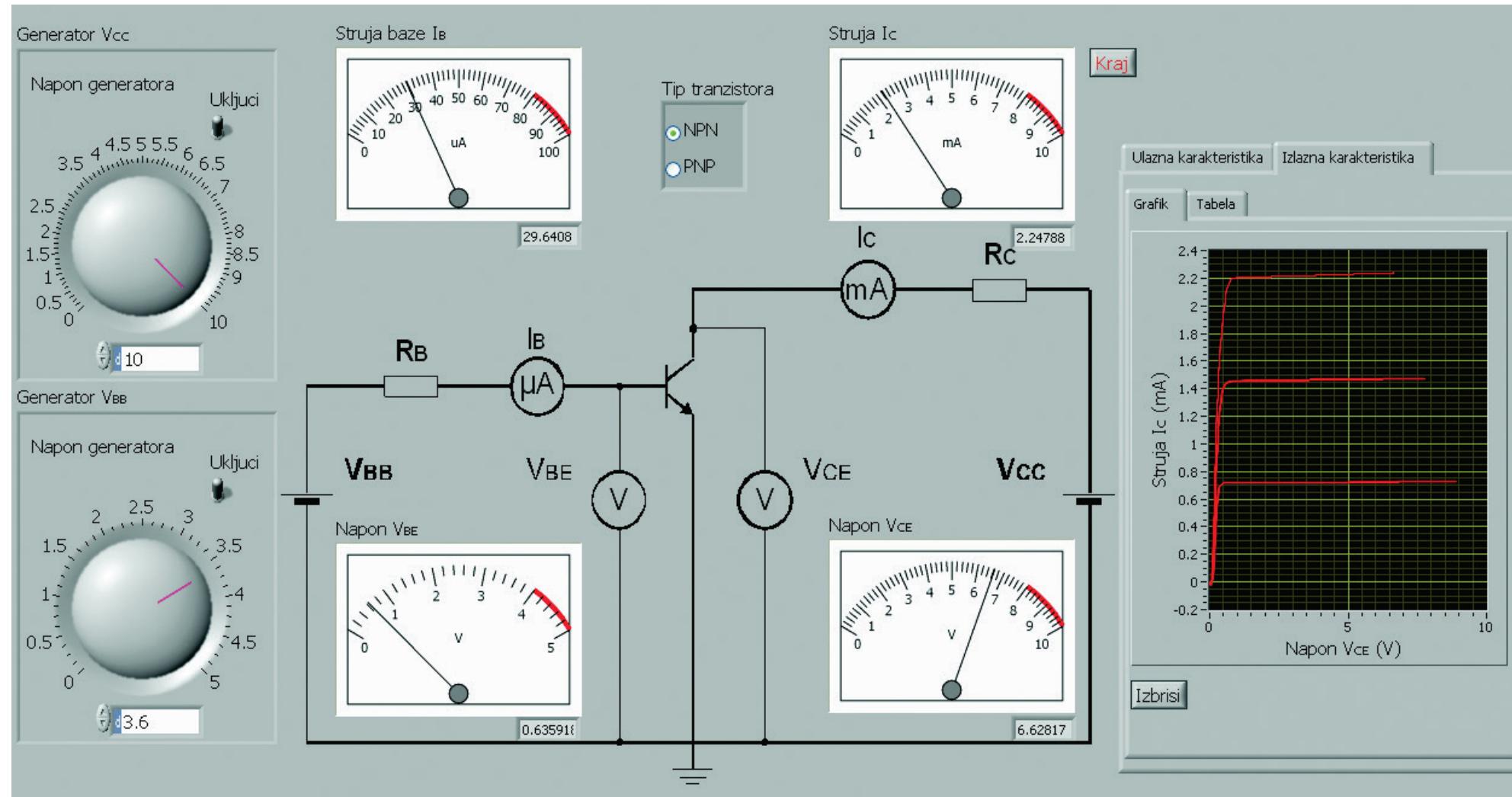


# Zavisnost struje kolektora $I_C$ od napona $V_{CE}$

- Izlazna karakteristika
- $V_{BE}$  konstantno
- Familija karakteristika za različite vrednosti  $V_{BE}$



# Merene karakteristike



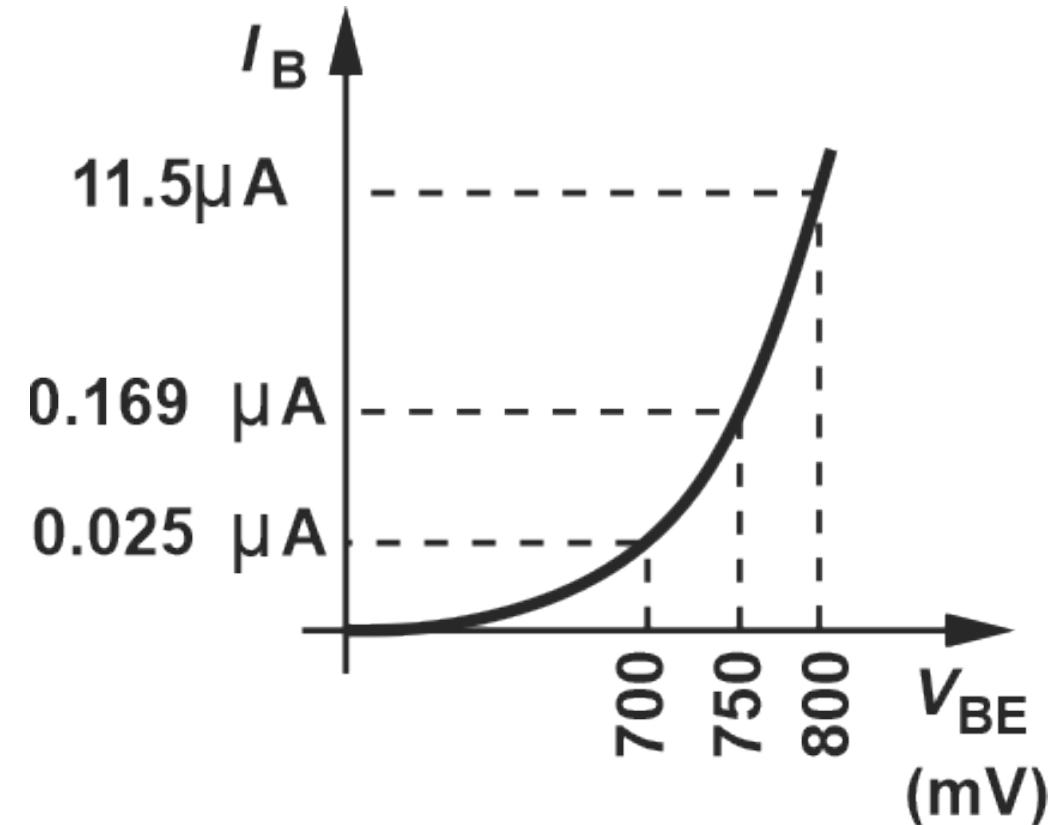
# Primer, struja baze

Parametri tranzistora:  $I_S = 5 \cdot 10^{-17} A$ ,  $\beta = 100$ :

$$V_{BE1} = 700 \text{ mV} \Rightarrow I_{B1} = 0.025 \mu\text{A}$$

$$V_{BE2} = 750 \text{ mV} \Rightarrow I_{B2} = 0.169 \mu\text{A}$$

$$V_{BE3} = 800 \text{ mV} \Rightarrow I_{B3} = 11.5 \mu\text{A}$$



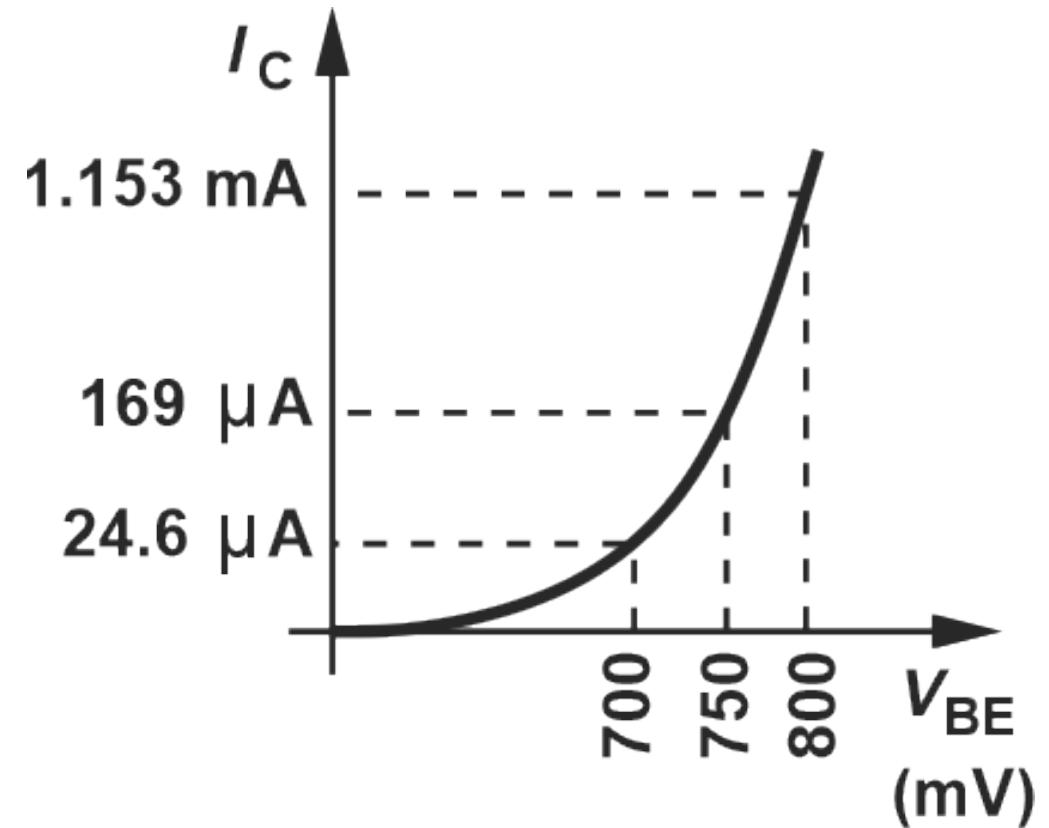
# Primer

Parametri tranzistora:  $I_S = 5 \cdot 10^{-17} A$ ,  $\beta = 100$ :

$$V_{BE1} = 700 \text{ mV} \Rightarrow I_{C1} = 24.6 \mu\text{A}$$

$$V_{BE2} = 750 \text{ mV} \Rightarrow I_{C2} = 169 \mu\text{A}$$

$$V_{BE3} = 800 \text{ mV} \Rightarrow I_{C3} = 1.153 \text{ mA}$$



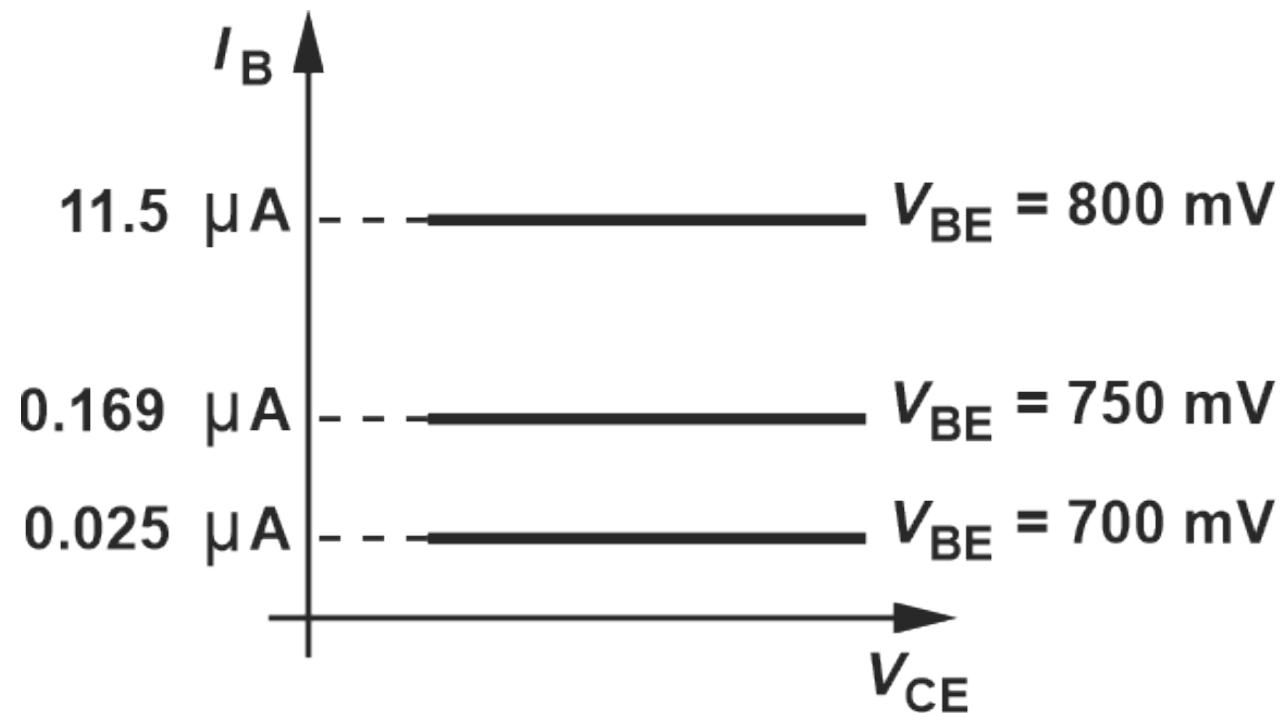
# Primer

Parametri tranzistora:  $I_S = 5 \cdot 10^{-17} A$ ,  $\beta = 100$ :

$$V_{BE1} = 700 \text{ mV} \Rightarrow I_{B1} = 0.025 \mu\text{A}$$

$$V_{BE2} = 750 \text{ mV} \Rightarrow I_{B2} = 0.169 \mu\text{A}$$

$$V_{BE3} = 800 \text{ mV} \Rightarrow I_{B3} = 11.5 \mu\text{A}$$



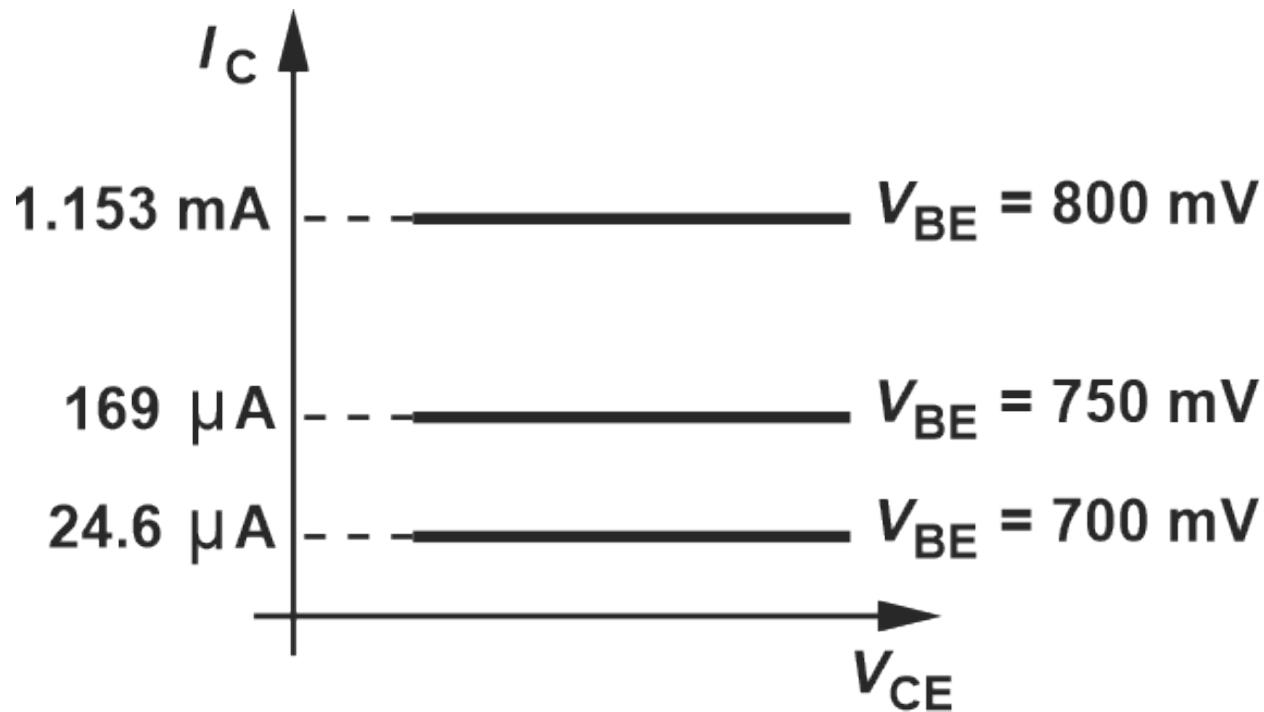
# Primer

Parametri tranzistora:  $I_S = 5 \cdot 10^{-17} A$ ,  $\beta = 100$ :

$$V_{BE1} = 700 \text{ mV} \Rightarrow I_{C1} = 24.6 \mu\text{A}$$

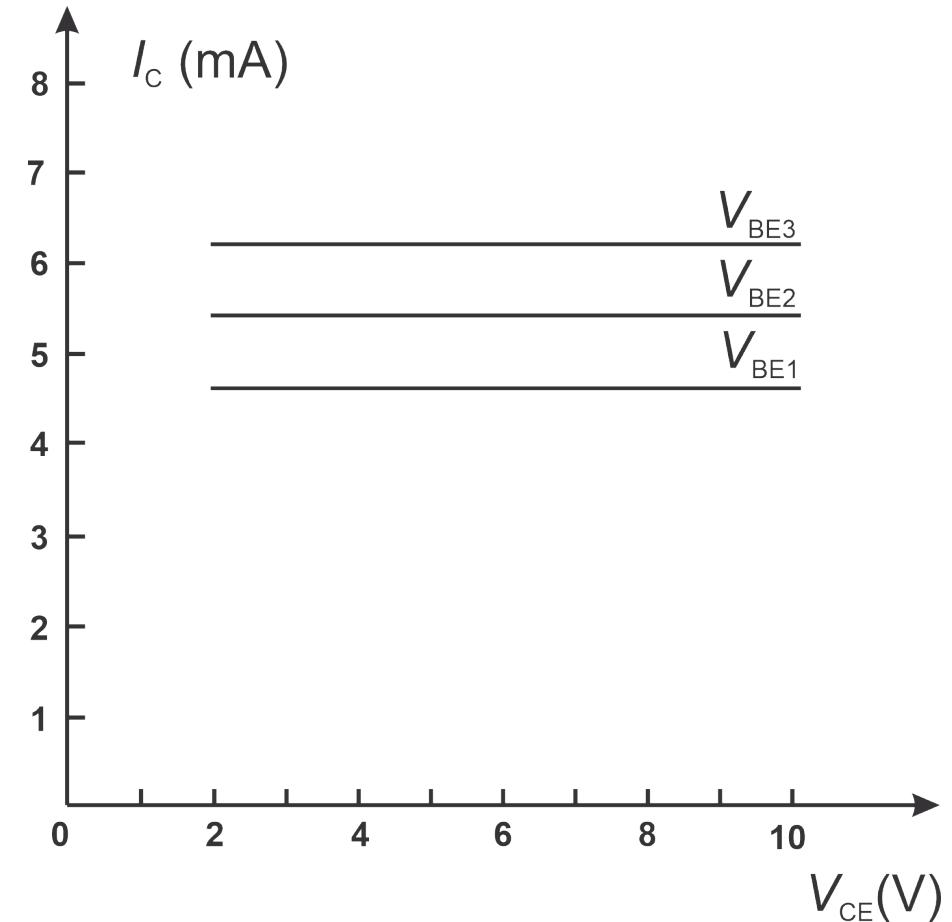
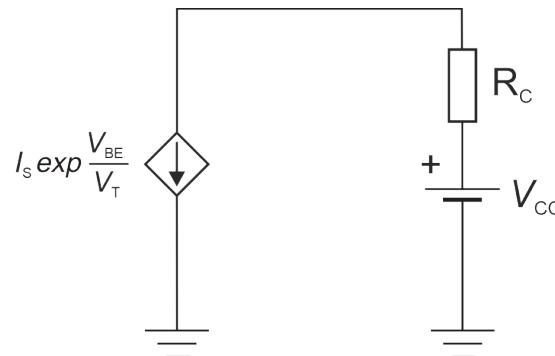
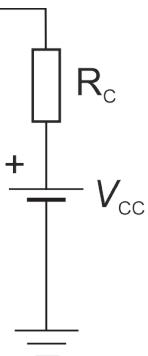
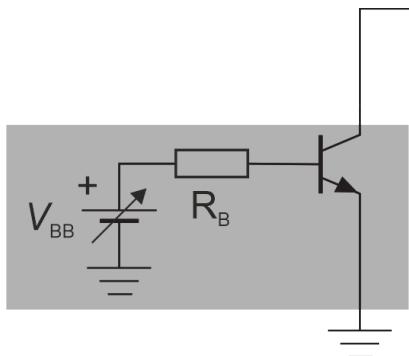
$$V_{BE2} = 750 \text{ mV} \Rightarrow I_{C2} = 169 \mu\text{A}$$

$$V_{BE3} = 800 \text{ mV} \Rightarrow I_{C3} = 1.153 \text{ mA}$$



# Zavisnost struje kolektora od napona $V_{CE}$

- Bipolarni tranzistor u aktivnom režimu se ponaša kao strujni izvor kontrolisan naponom  $V_{BE}$ .
- Pojačavač signalu.



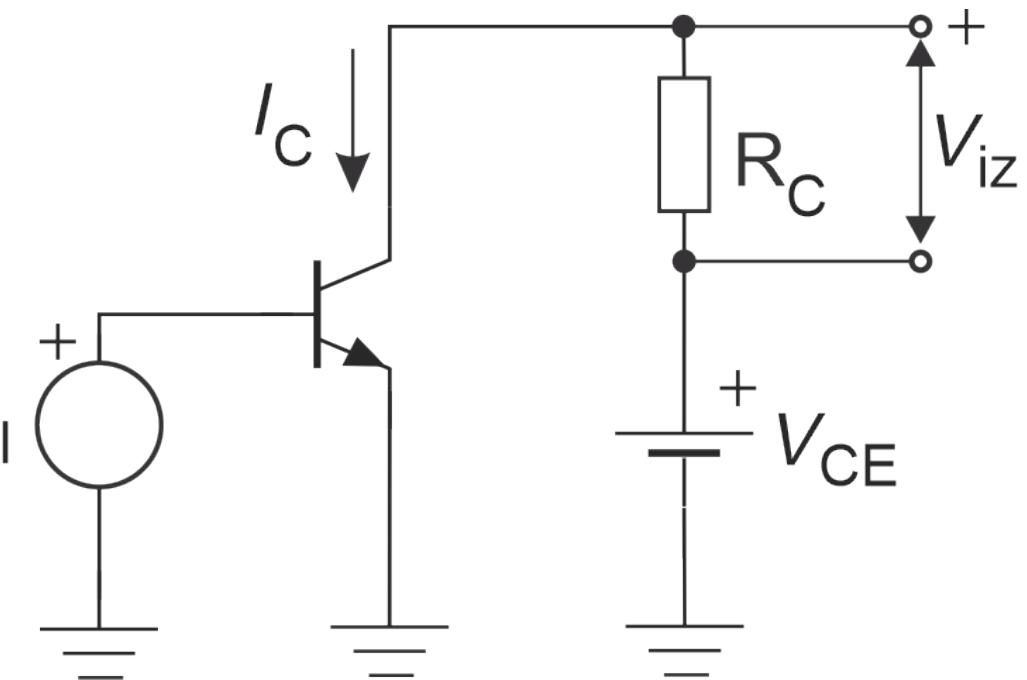
# Polarizacija

- Parametri tranzistora:  $I_S = 5 \cdot 10^{-16} A$
- $\Delta V_{ul} = 10 mV$

$$\Delta I_C = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{\Delta V_{ul}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$\Delta V_{iz} = -R_C \cdot \Delta I_C = -R_C \cdot I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{\Delta V_{ul}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

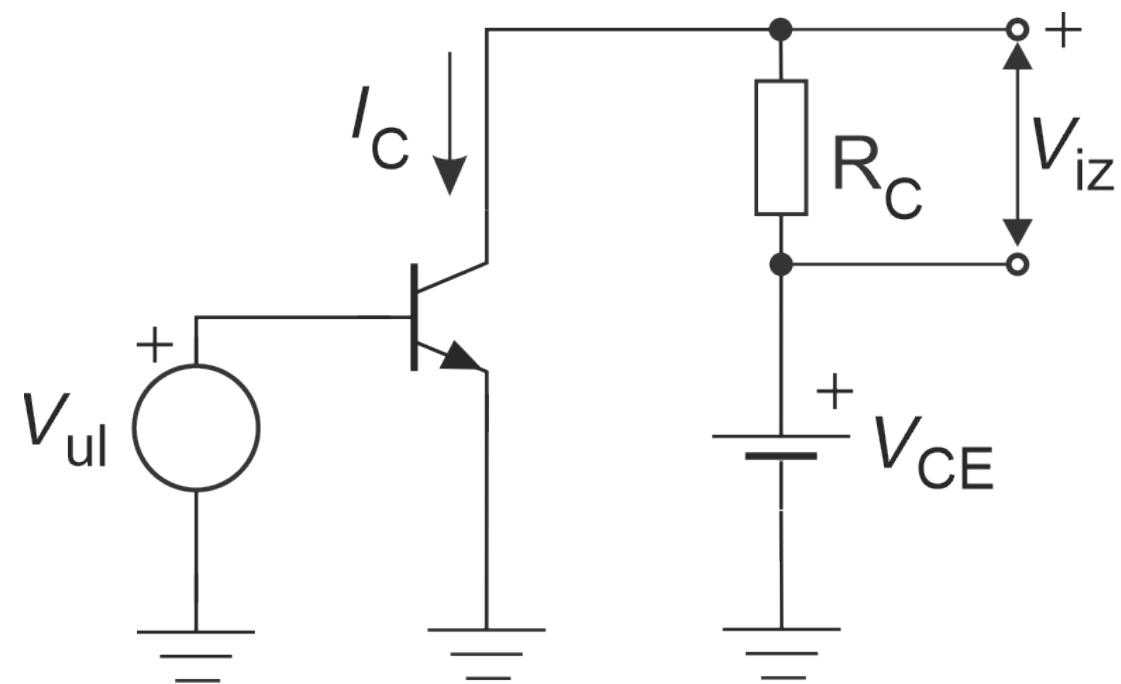
$$\Delta V_{iz} = -R_C \cdot \Delta I_C = -R_C \cdot 2.34 \times 10^{-16} A$$



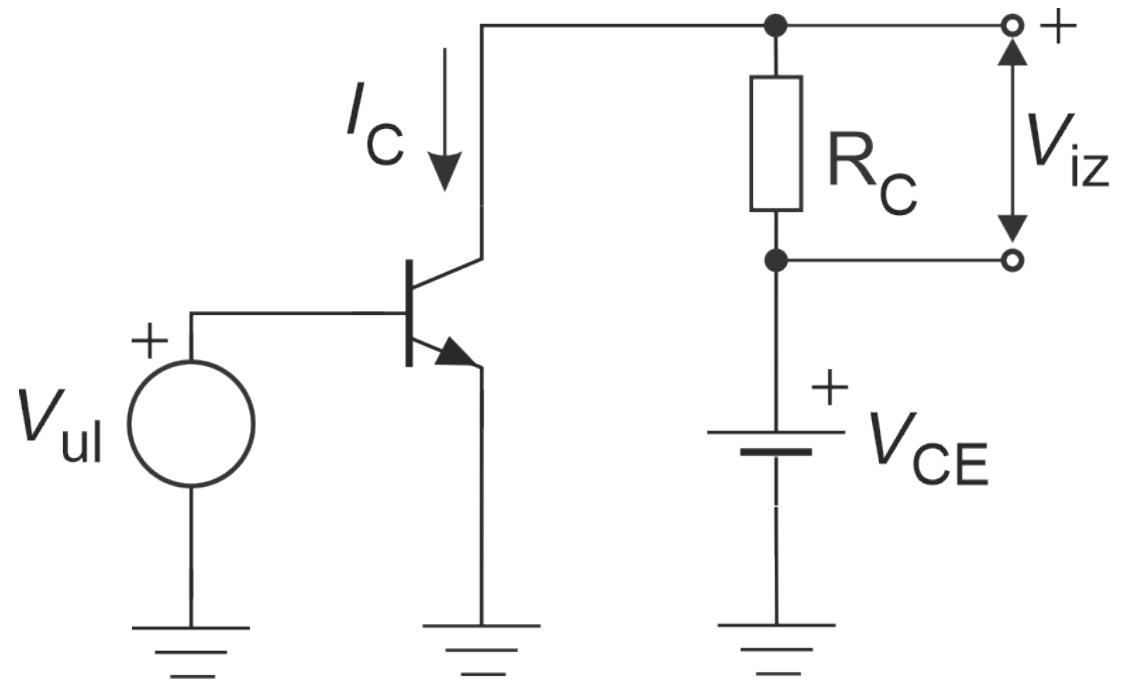
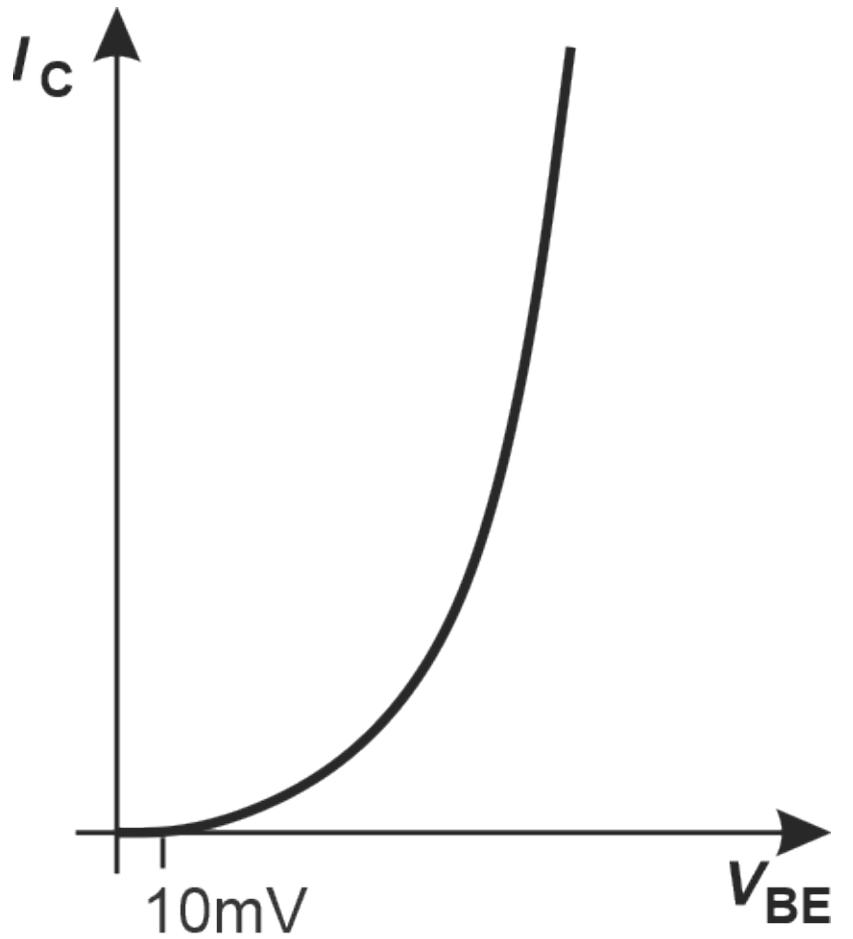
# Polarizacija

- Za pojačanje 10, izlazni napon je  $\Delta V_{iz} = 100\text{mV}$ , dobija se:

$$R_C = \frac{\Delta V_{iz}}{\Delta I_C} = 4,25 \times 10^{16} \Omega$$



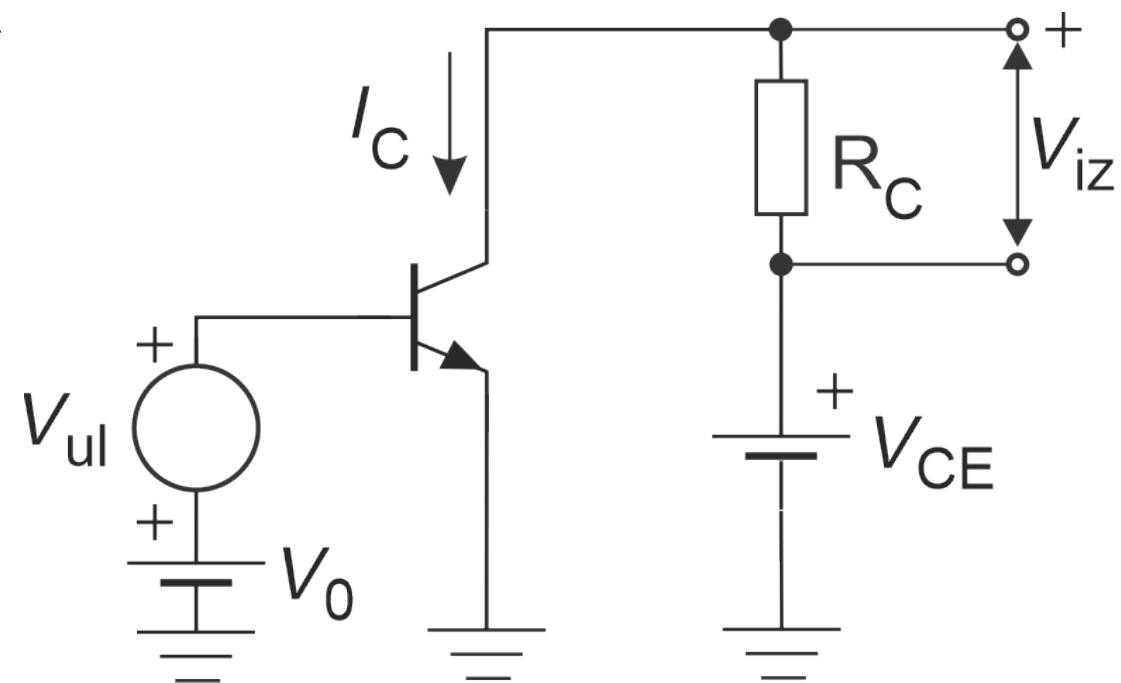
# Polarizacija



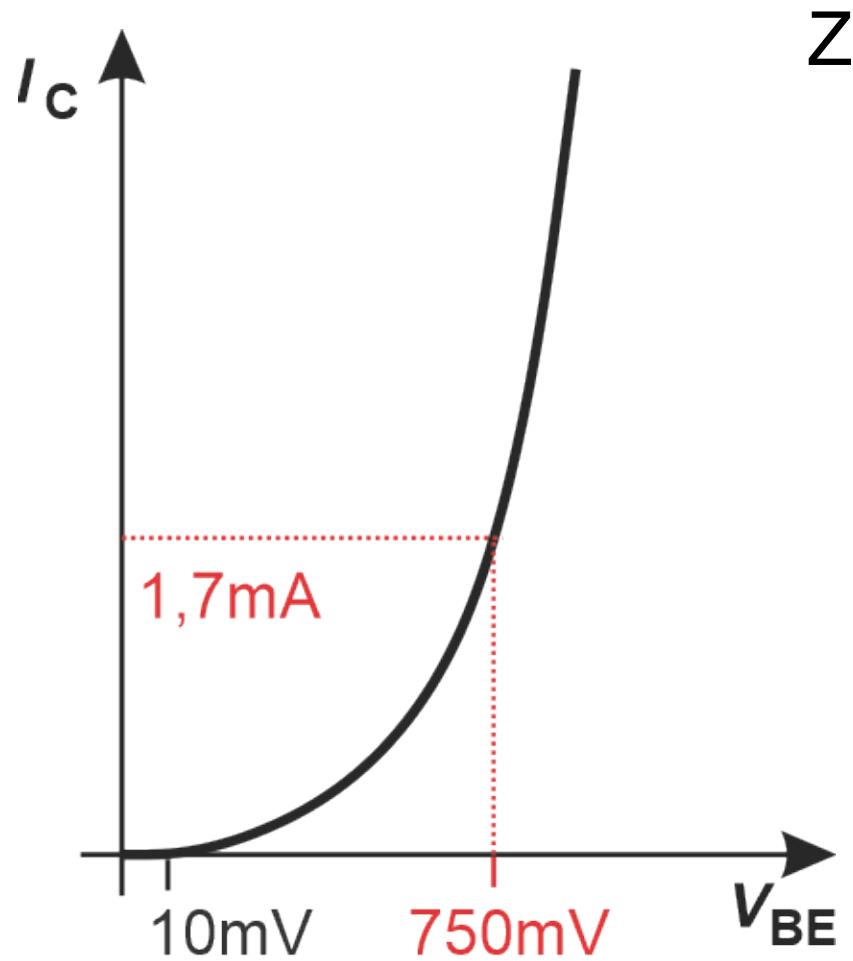
# Polarizacija

- Parametri tranzistora:  $I_S = 5 \cdot 10^{-16} \text{ A}$
- $\Delta V_{ul} = 10 \text{ mV}$ ,  $V_0 = 750 \text{ mV}$ .

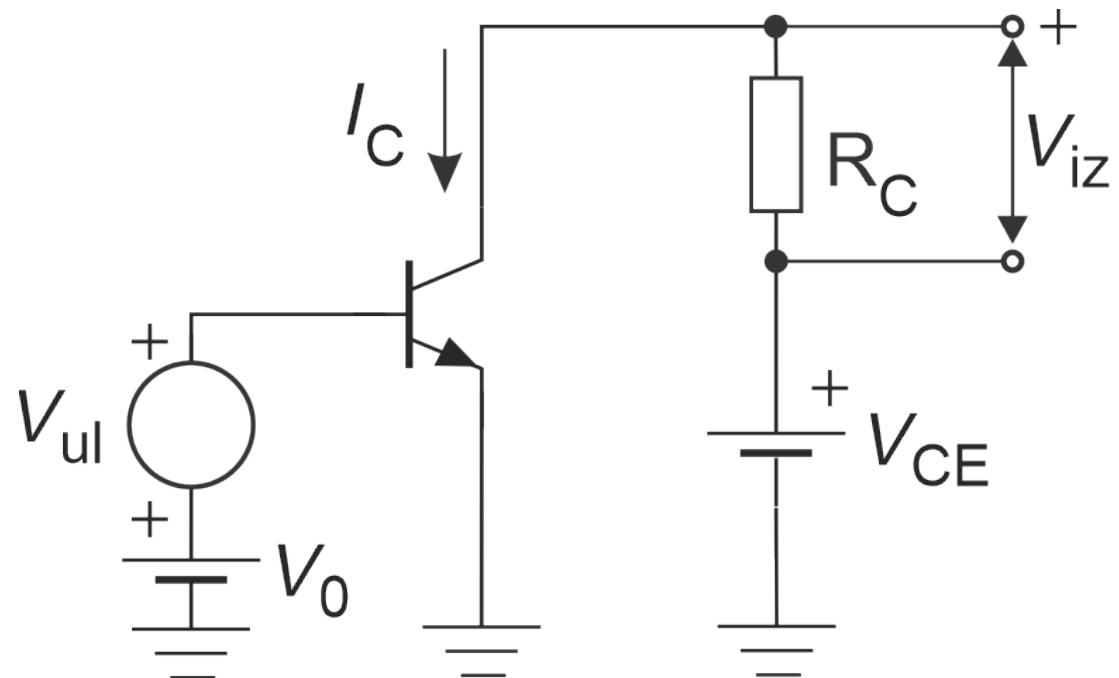
$$I_C = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{\Delta V_{ul} + V_0}{V_T}\right) - 1 \right)$$



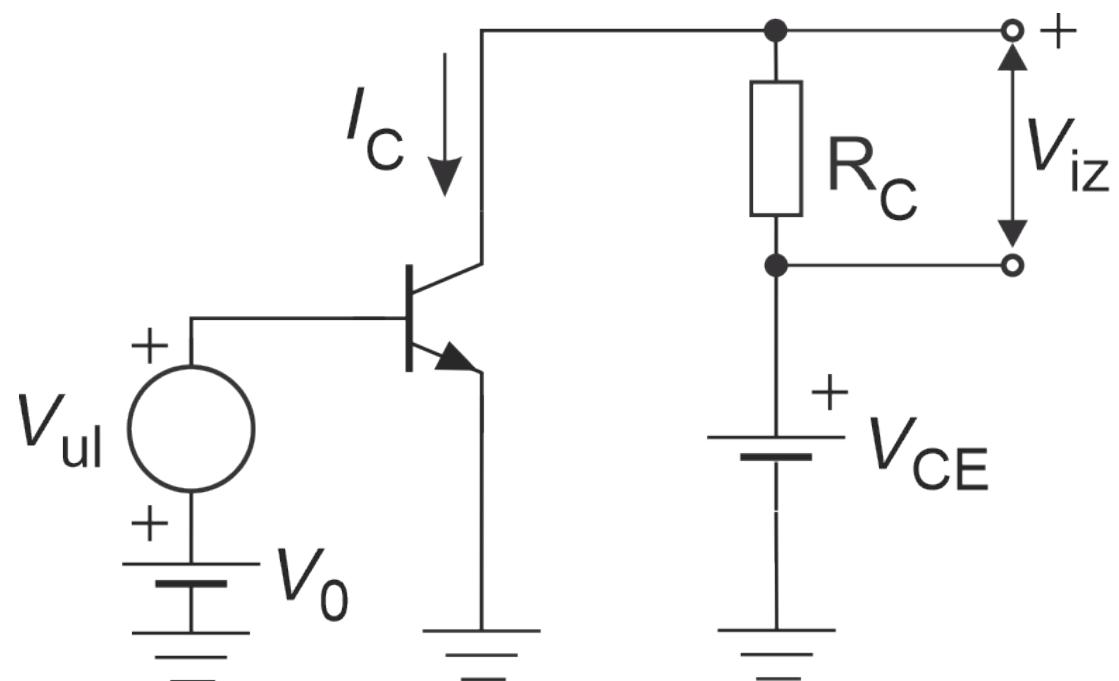
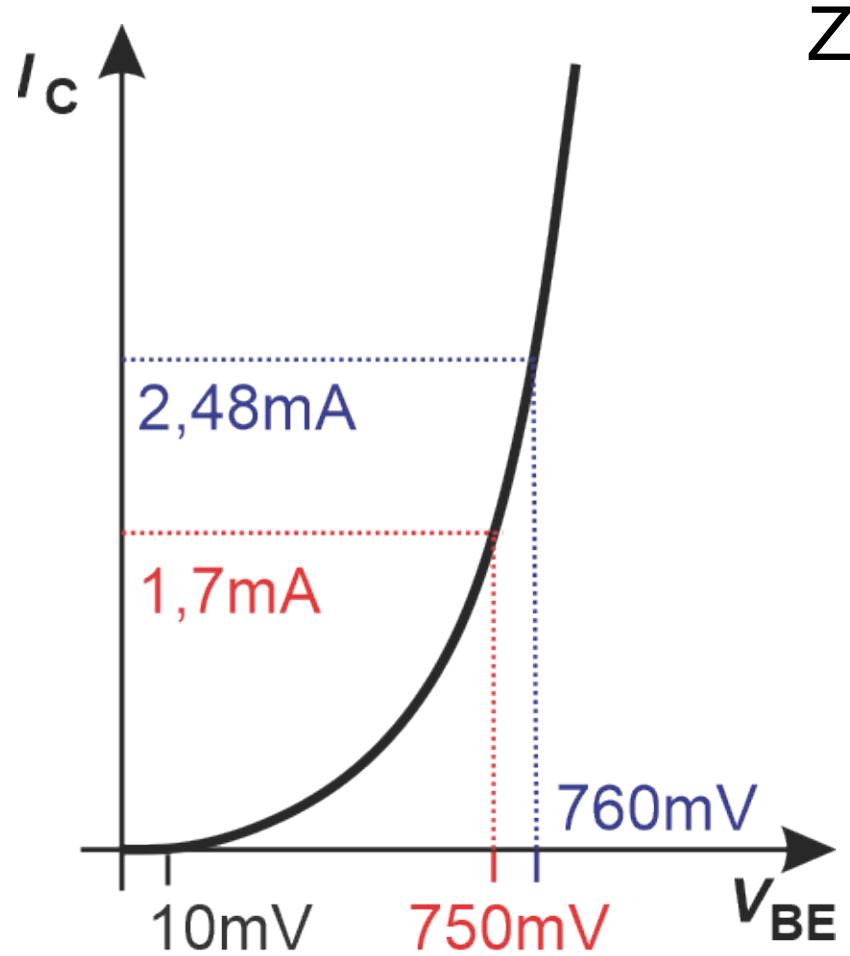
# Polarizacija



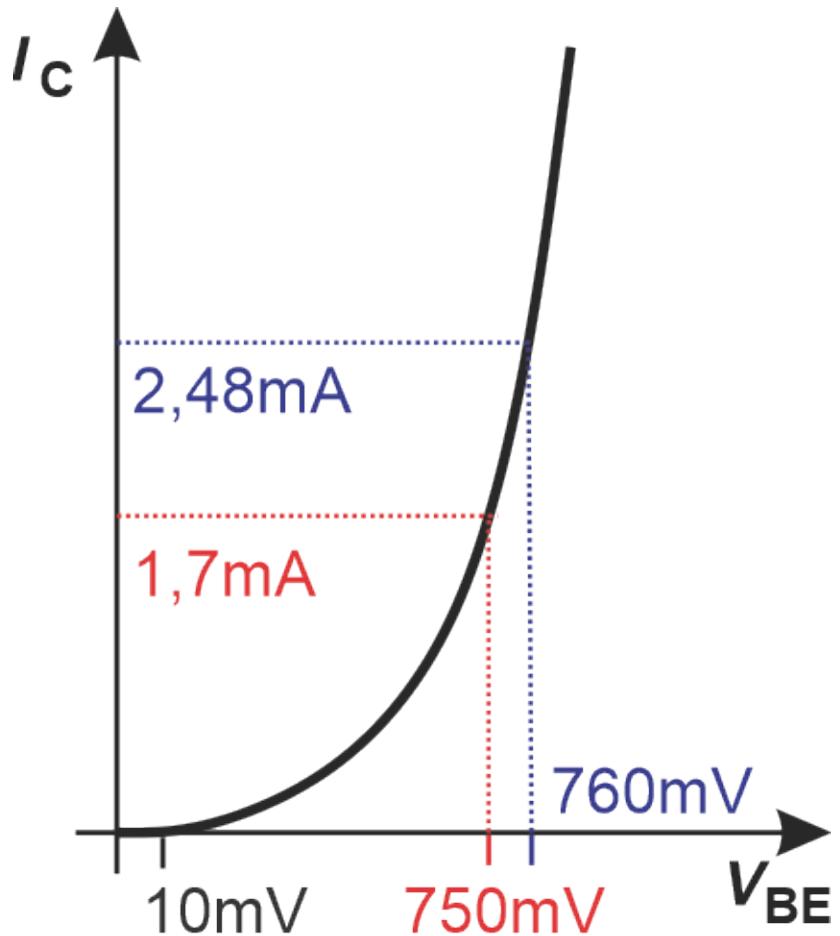
Za  $V_{ul}=0$



# Polarizacija



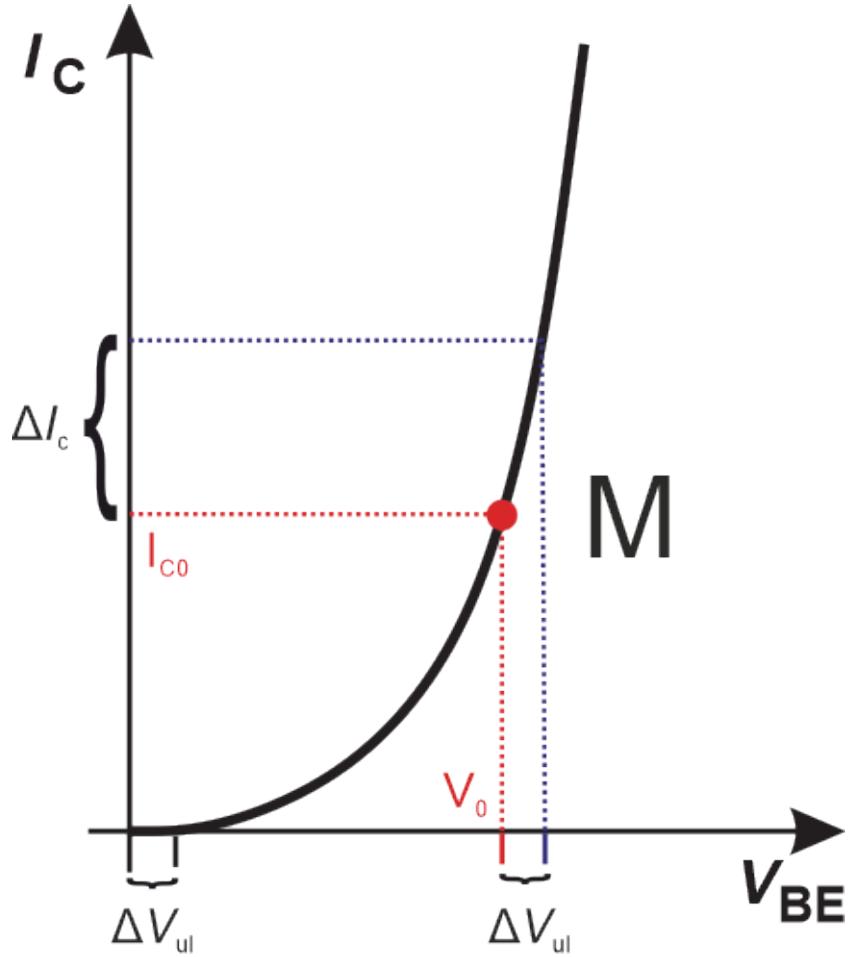
# Polarizacija i radna tačka



- Bez polarizacije ( $V_0=0$ ) promena napona  $V_{ul}$  od  $10\text{mV}$  izaziva promenu kolektorske struje reda veličine  $10^{-16}\text{A}$ .
- Sa polarizacijom naponom  $V_0=750\text{mV}$ , promena napona  $V_{ul}$  od  $10\text{mV}$  izaziva promenu kolektorske struje od  **$0,78\text{mA}$** .
- **Radna tačka** tranzistora određena je naponima polarizacije  $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$ .

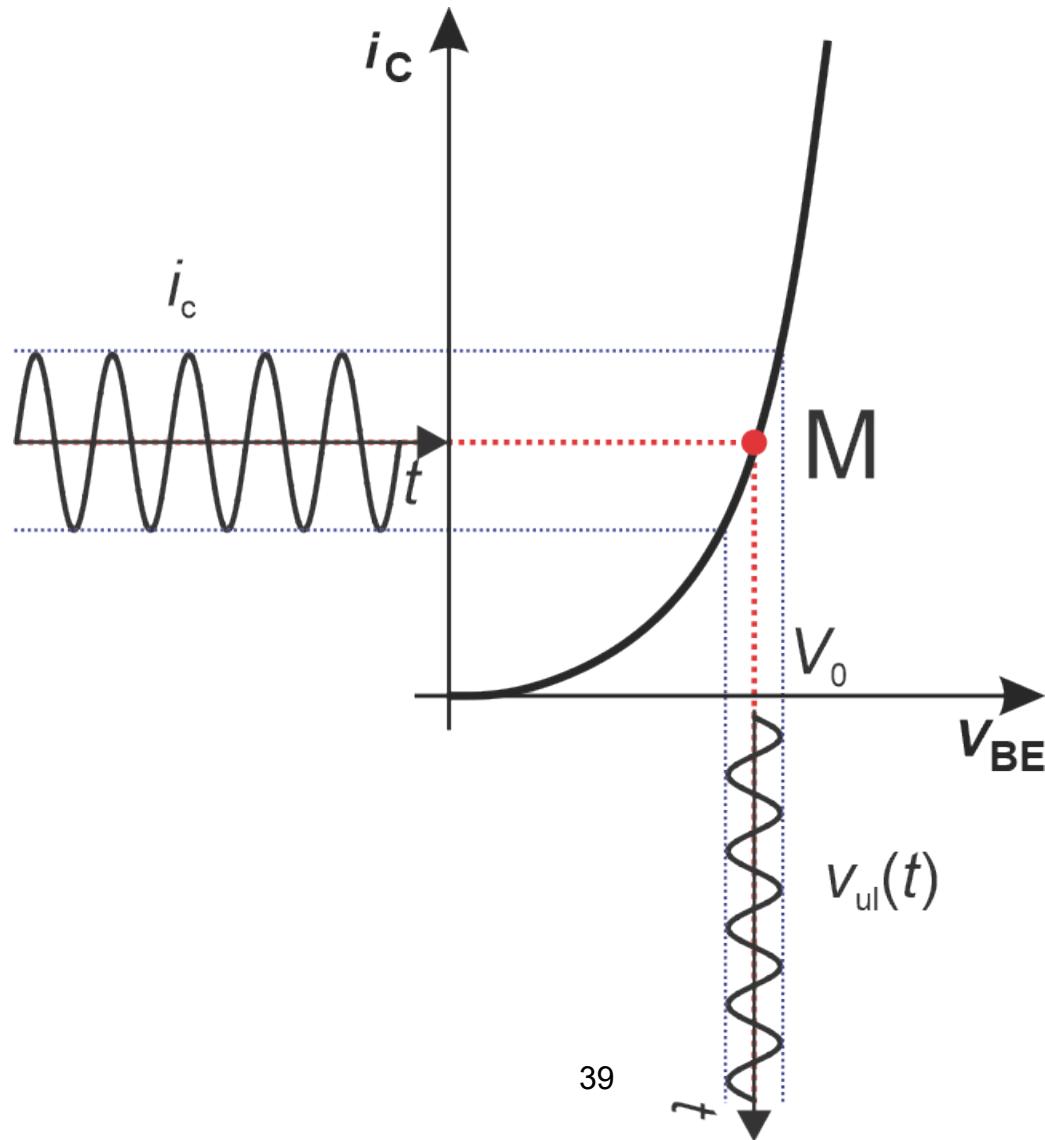
$$R_C = \frac{\Delta V_{iz}}{\Delta I_C} = 128\Omega$$

# Polarizacija i radna tačka



- **Polarizacijom** bipolarnog tranzistora određujemo radnu tačku, tačku na prenosnoj karakteristici u kojoj mala promena napona na emitorskom spoju dovodi do velike promene struje kolektora.
- Radna tačka tranzistora određena je jednosmernim naponima polarizacije  $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$  i struje  $I_C$ .

# Polarizacija i radna tačka



# Konvencija označavanja napona i struja tranzistora

- Vremenski promenljivi naponi i struje se označavaju **malim slovom i velikim slovima u indeksima**:  
 $i_B, i_C, i_E, v_{BE}, v_{CE}$
- Jednosmerne vrednosti napona i struja se označavaju **velikim slovom i velikim slovima u indeksima**:  
 $I_B, I_C, I_E, V_{BE}, V_{CE}$
- Vremenski promenljive vrednosti napona i struja bez jednosmerne vrednosti (njihova srednja vrednost jednak je nuli) se označavaju **malim slovom i malim slovima u indeksima**:  
 $i_b, i_c, i_e, v_{be}, v_{ce}$

# Konvencija označavanja napona i struja tranzistora

- Zavisnost vremenski promenljivih napona i struja od vremena se podrazumeva, tako da nije eksplisitno istaknuta:

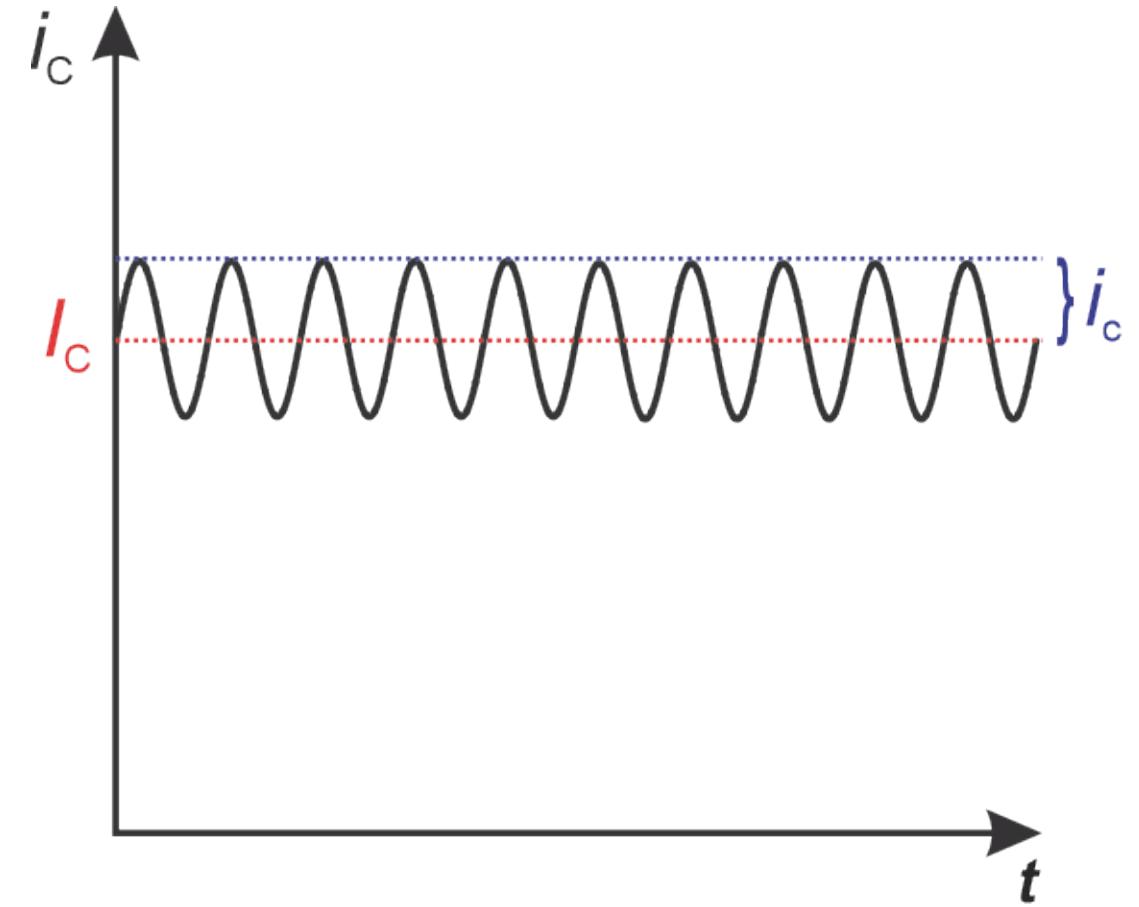
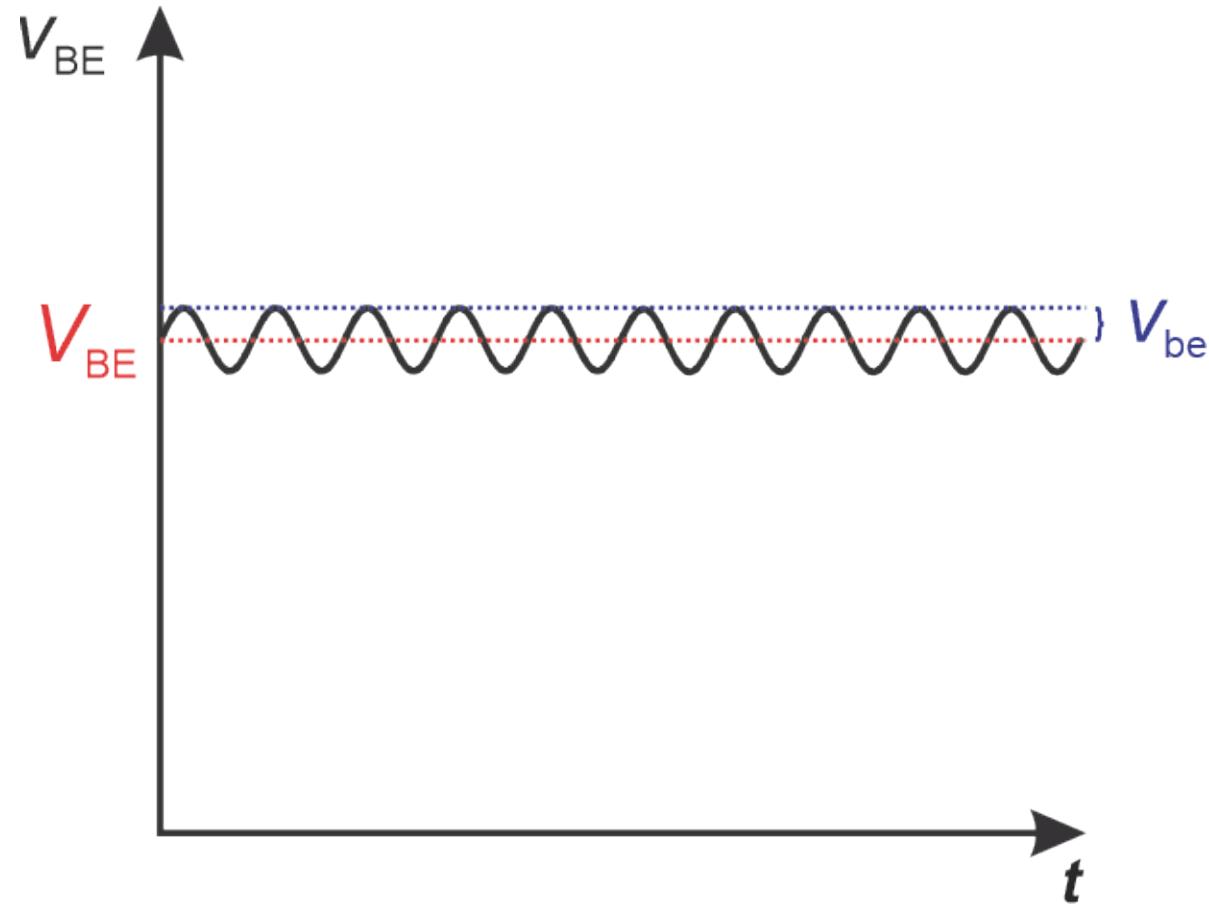
$$i_C = i_C(t), v_{BE} = v_{BE}(t), v_{CE} = v_{CE}(t), \dots$$

$$i_c = i_c(t), v_{be} = v_{be}(t), v_{ce} = v_{ce}(t), \dots$$

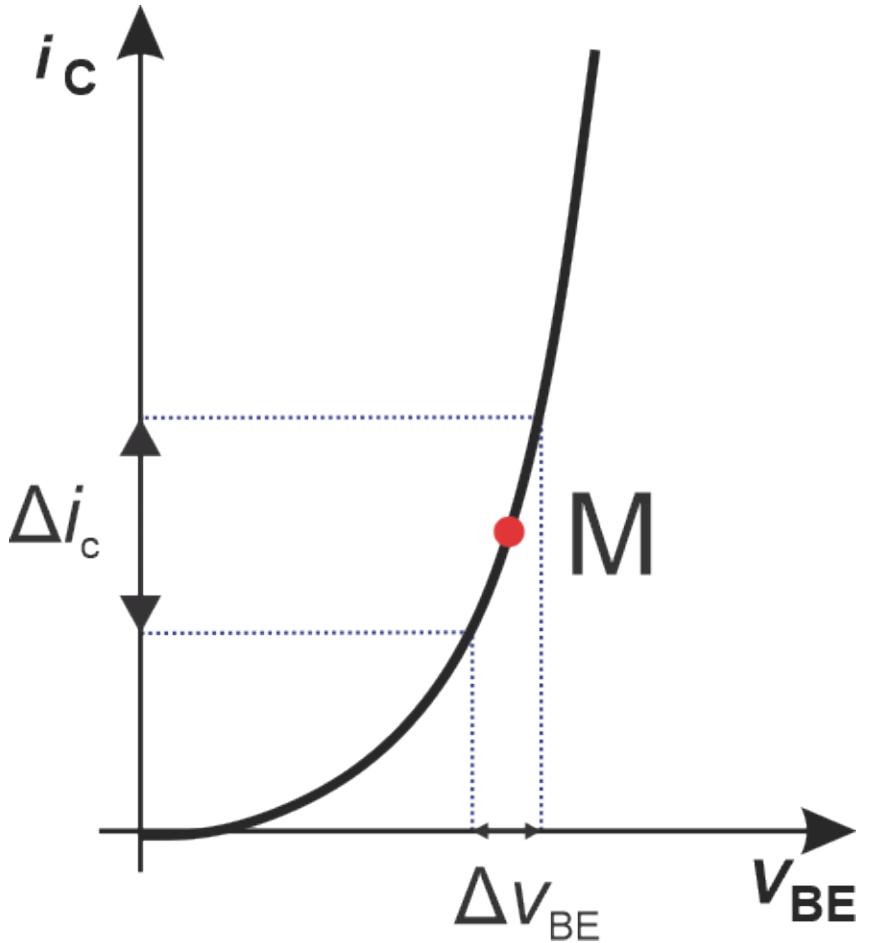
- Prema konvenciji, važe jednačine:

$$i_C = i_c + I_C, v_{BE} = v_{be} + V_{BE}, v_{CE} = v_{ce} + V_{CE}.$$

# Polarizacija i radna tačka



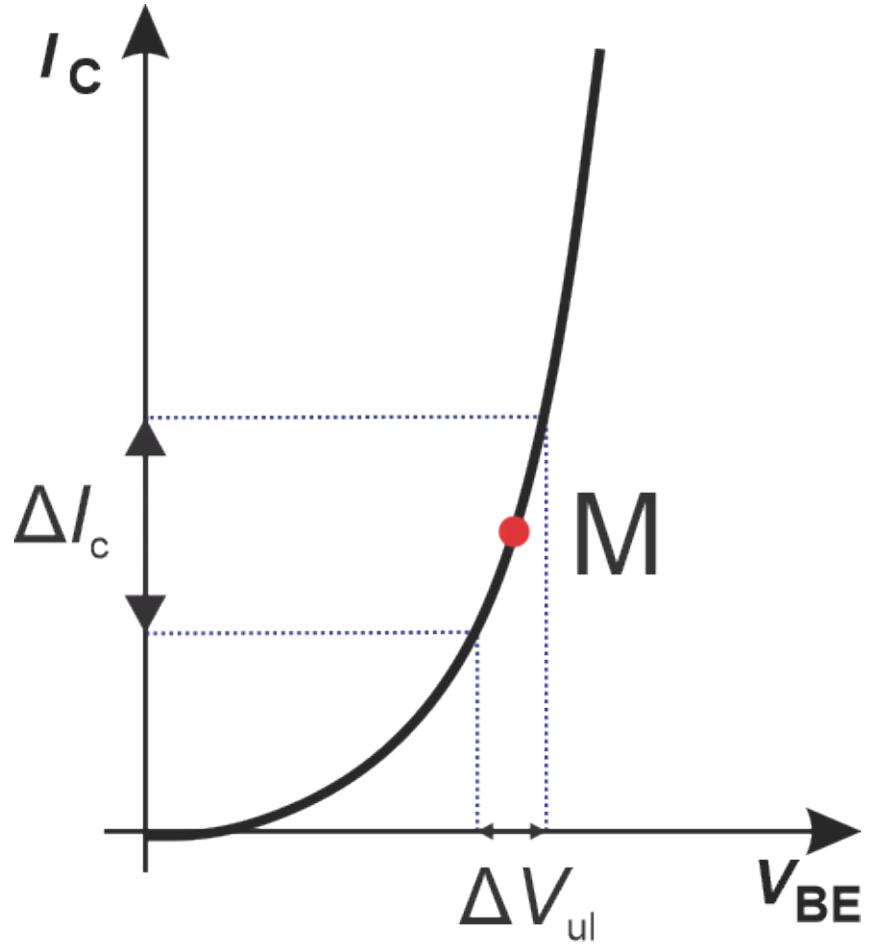
# Transkonduktansa



- Transkonduktansa predstavlja količnik promene struje kolektora i promene napona između baze i emitora:

$$g_m = \frac{di_C}{dV_{BE}}$$

# Transkonduktansa

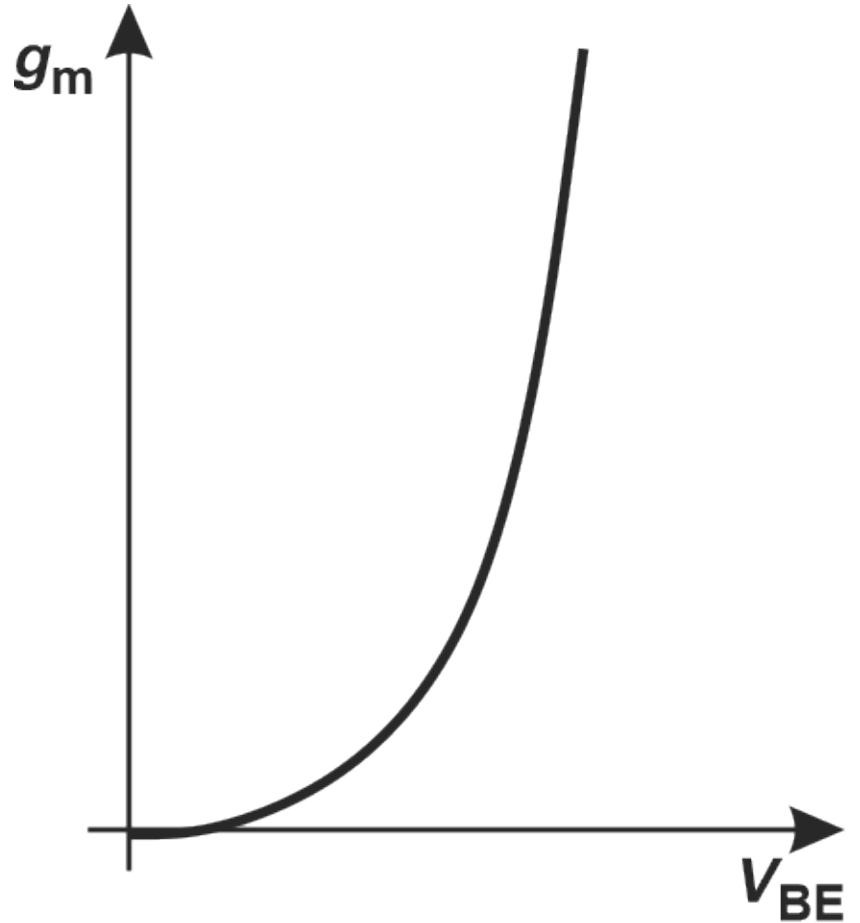


$$i_C = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$g_m = \frac{di_C}{dv_{BE}}$$

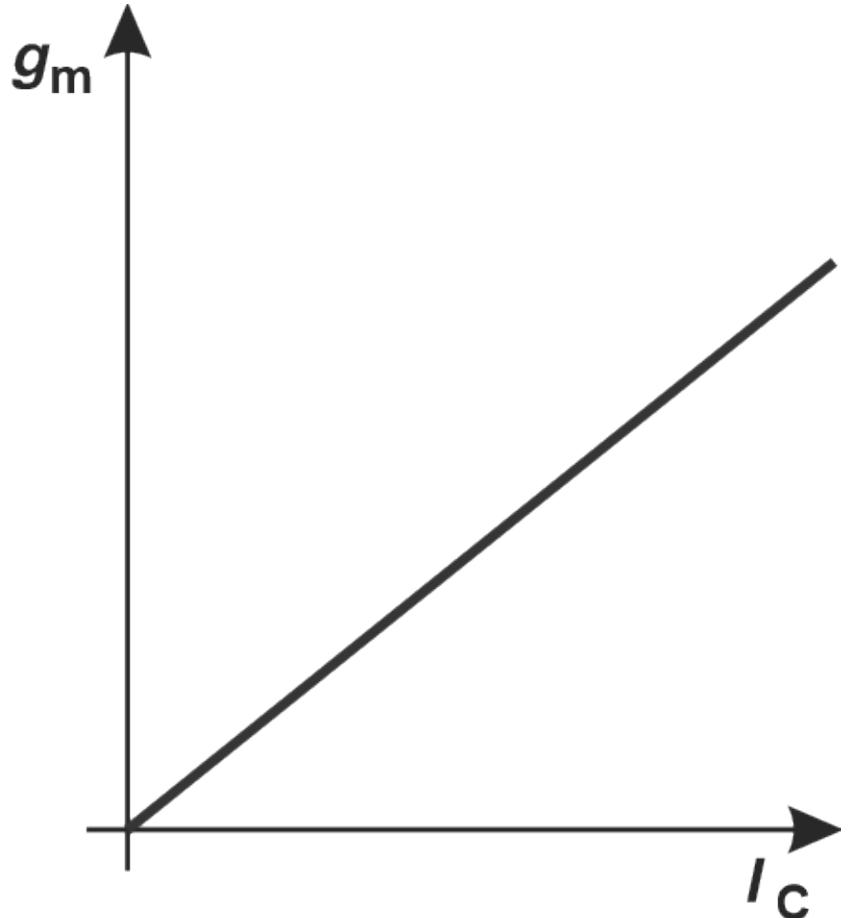
$$g_m = \frac{I_S}{V_T} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \approx \frac{I_S}{V_T} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) = \frac{I_C}{V_T}$$

# Transkonduktansa



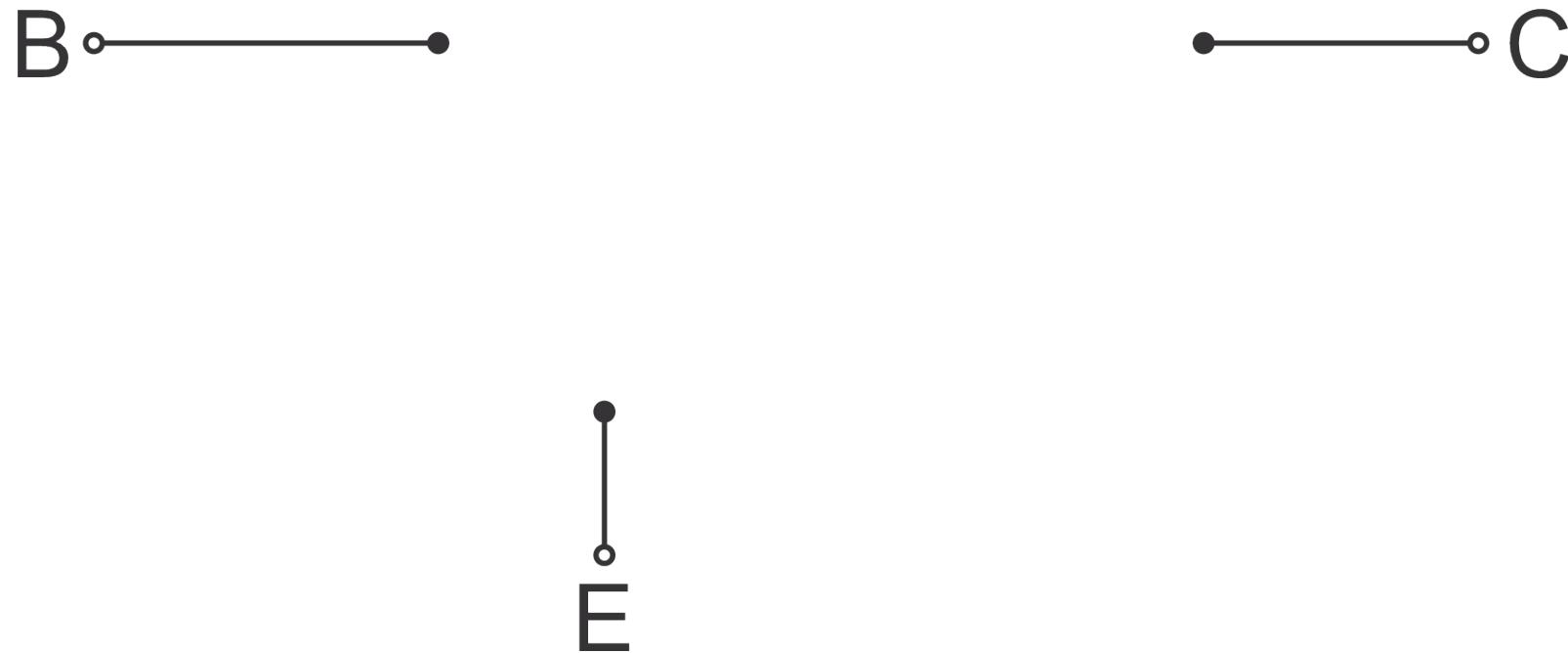
- **Transkonduktansa** zavisi od radne tačke tranzistora – napona  $V_{BE}$ . Zavisnost transkonduktanse od napona  $V_{BE}$  je eksponencijalna.
- Pojačanje pojačavača je proporcionalno transkonduktansi.

# Transkonduktansa

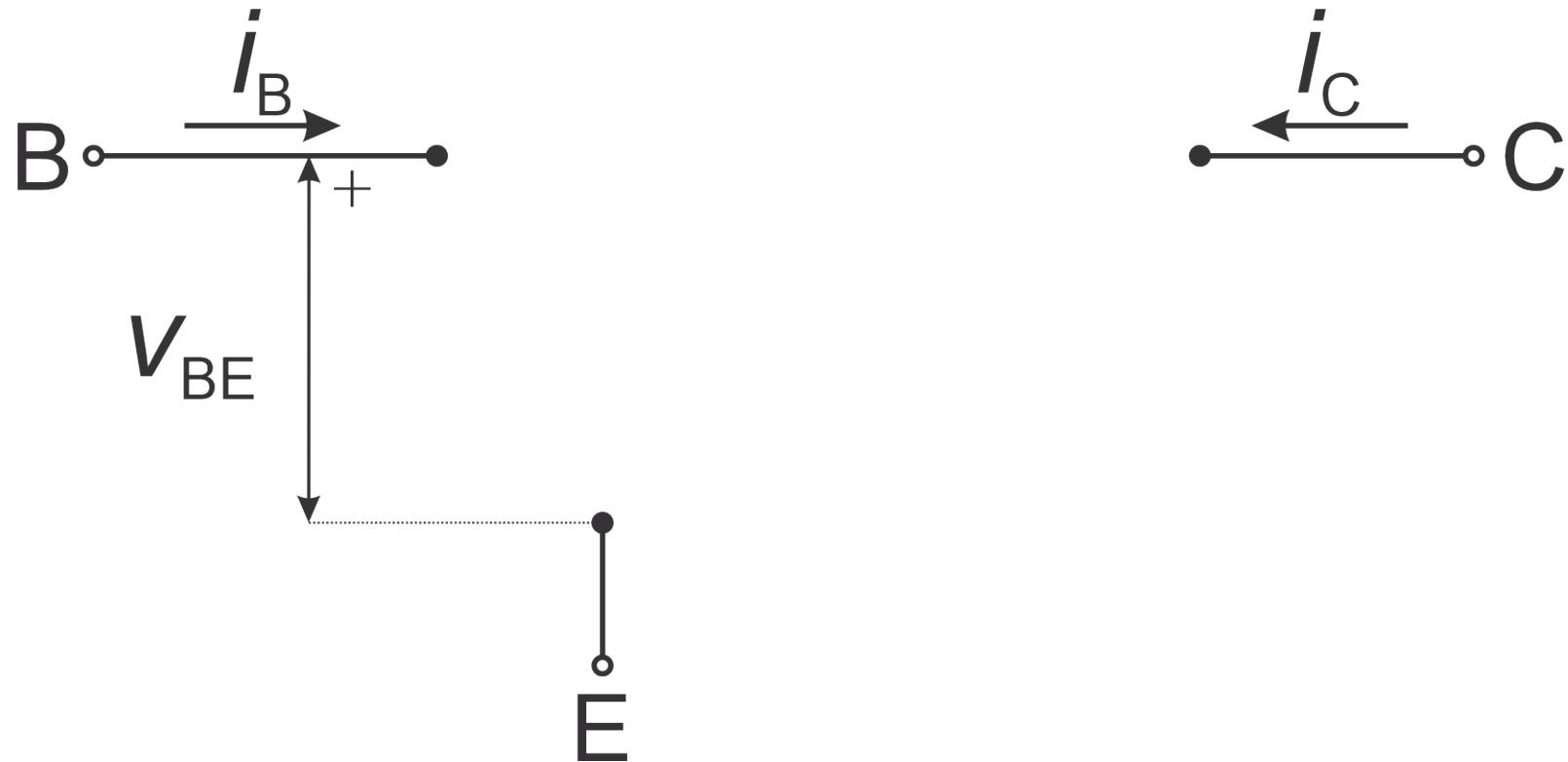


- Transkonduktansa je linearno proporcionalna struji kolektora, veća transkonduktansa (samim tim i pojačanje) zahteva veću snagu generatora koji napaja kolo.

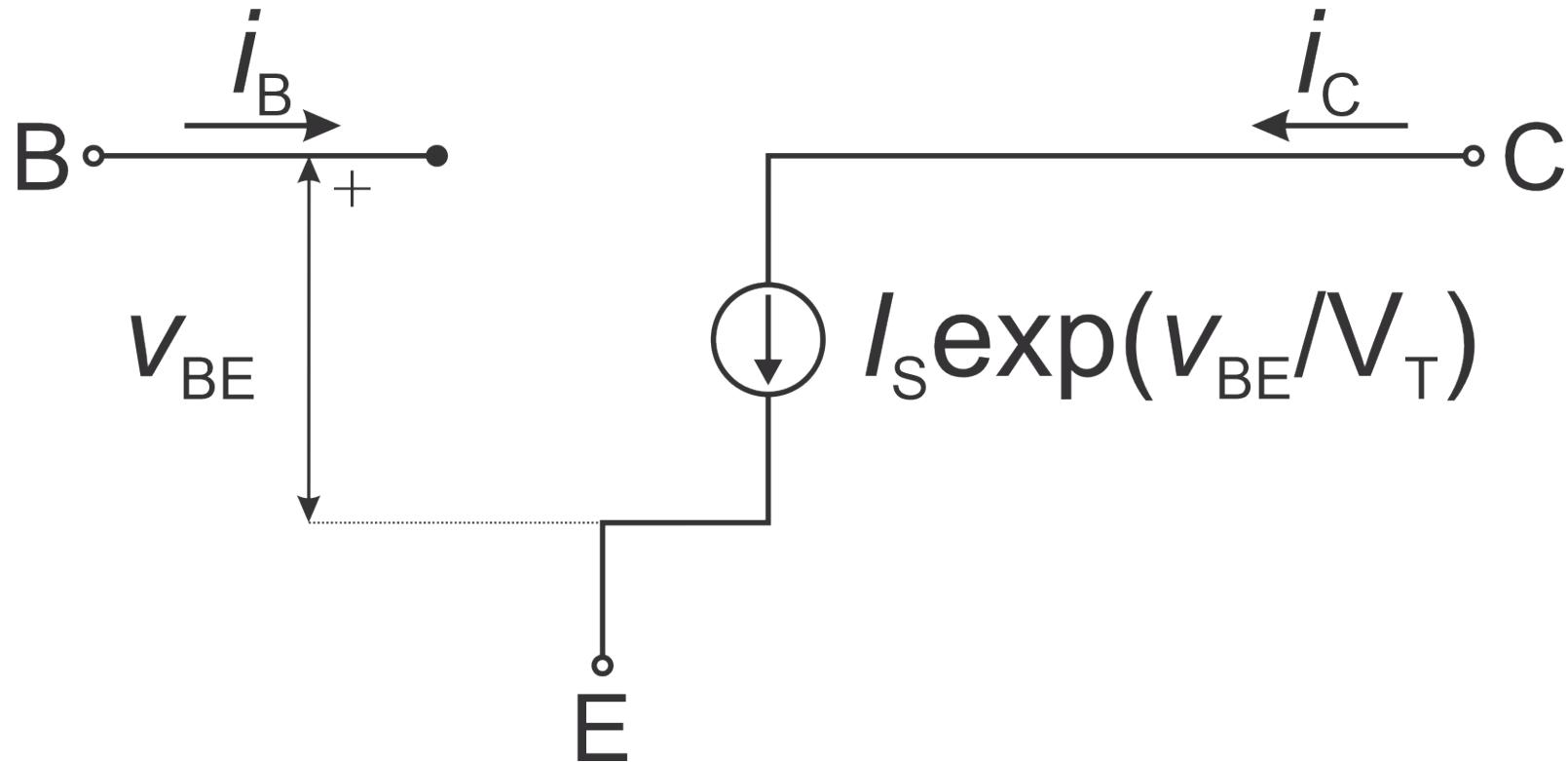
# Jednostavni model bipolarnog tranzistora



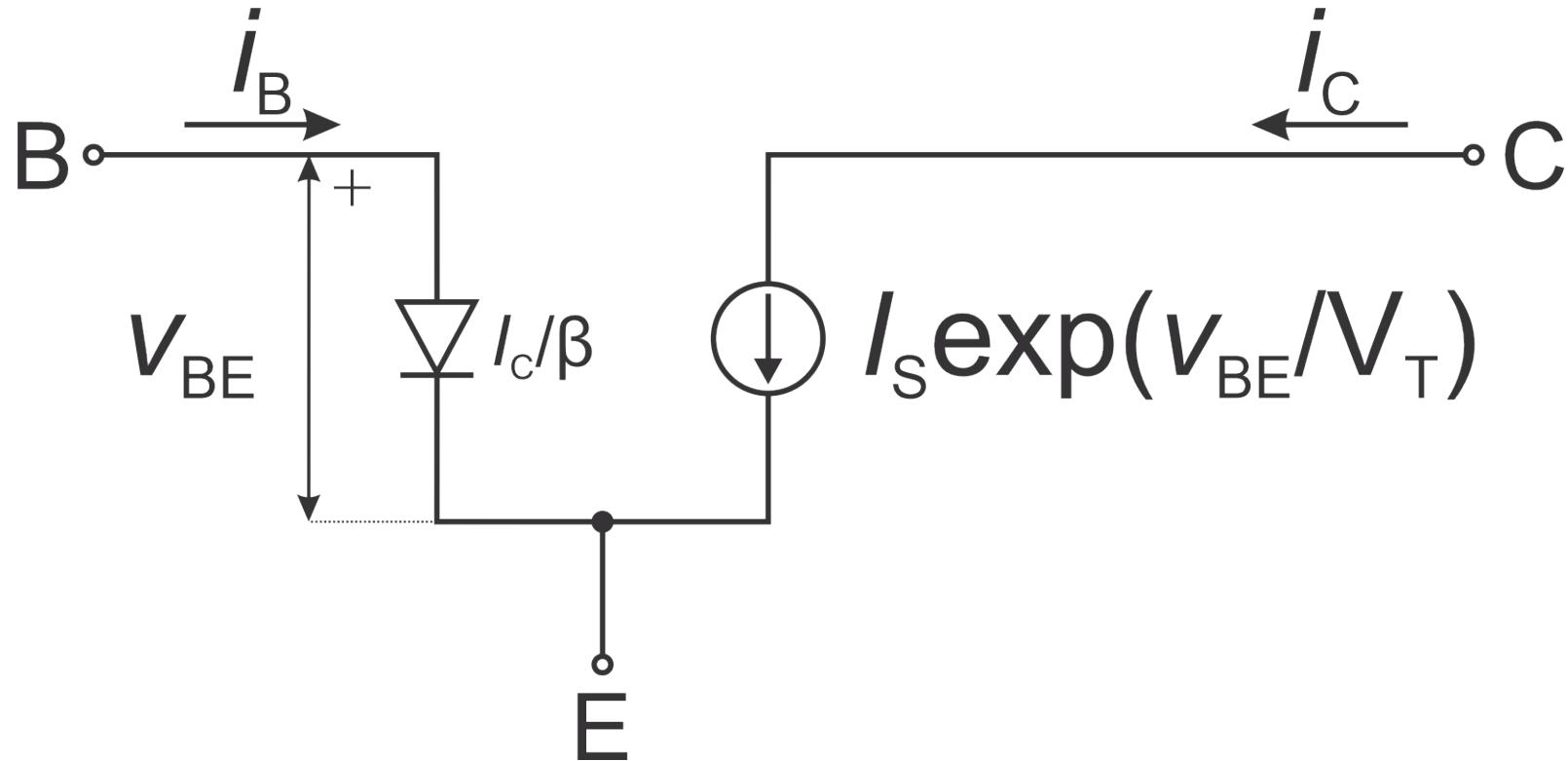
# Jednostavni model bipolarnog tranzistora



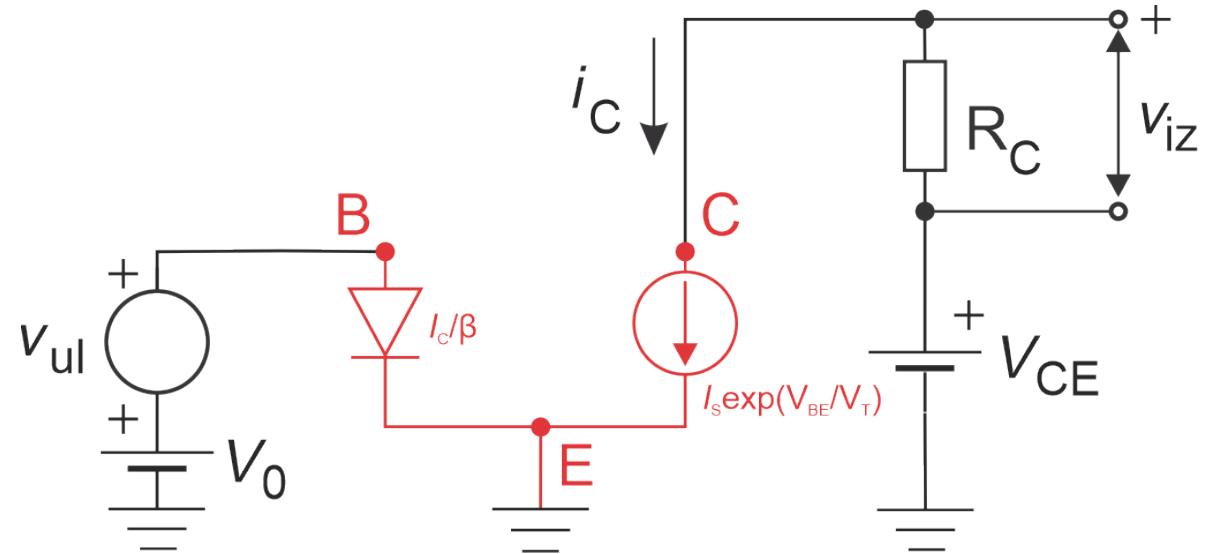
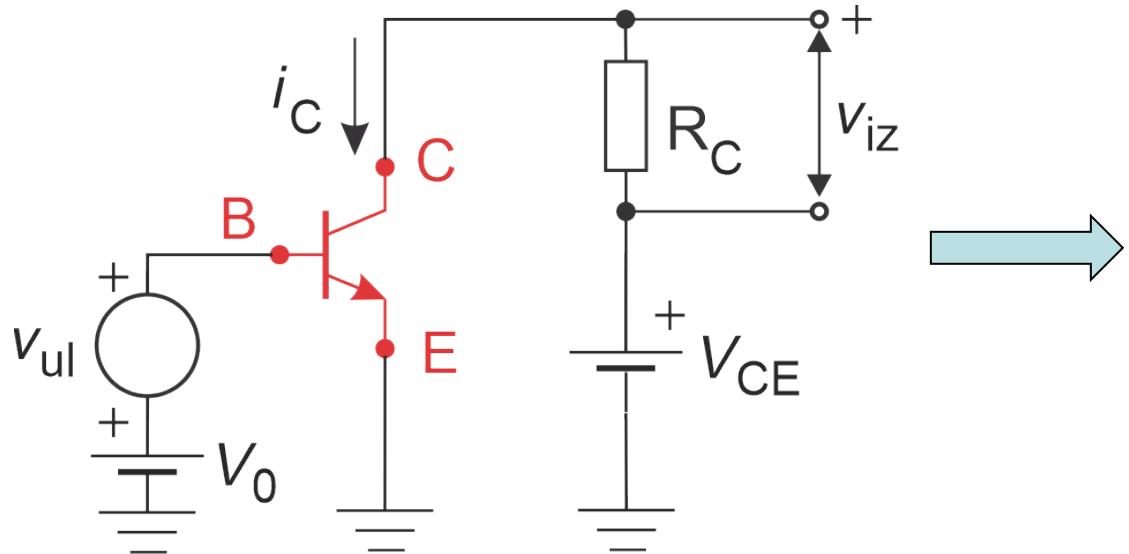
# Jednostavni model bipolarnog tranzistora



# Jednostavni model bipolarnog tranzistora



# Jednostavni model bipolarnog tranzistora



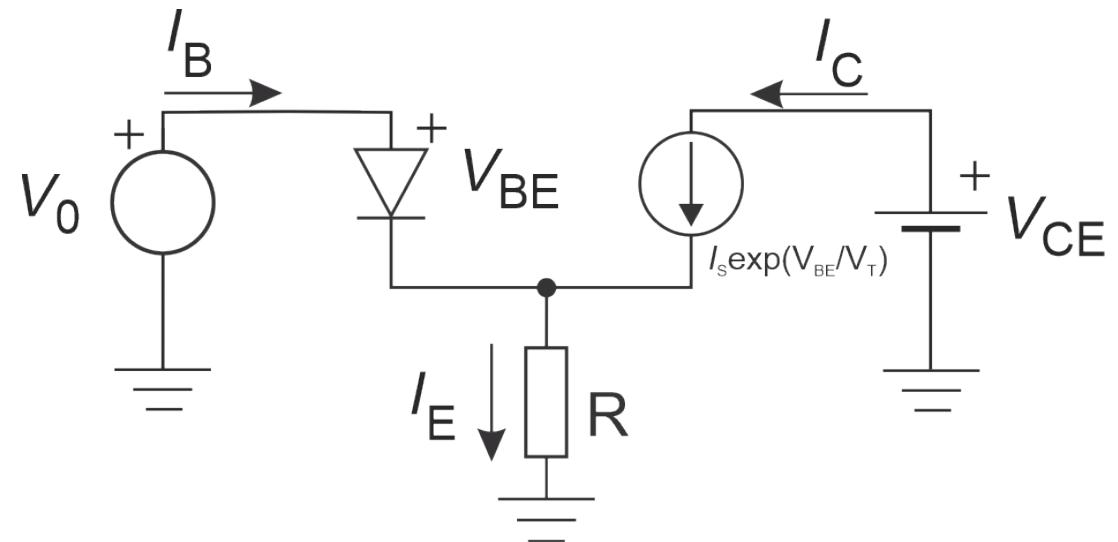
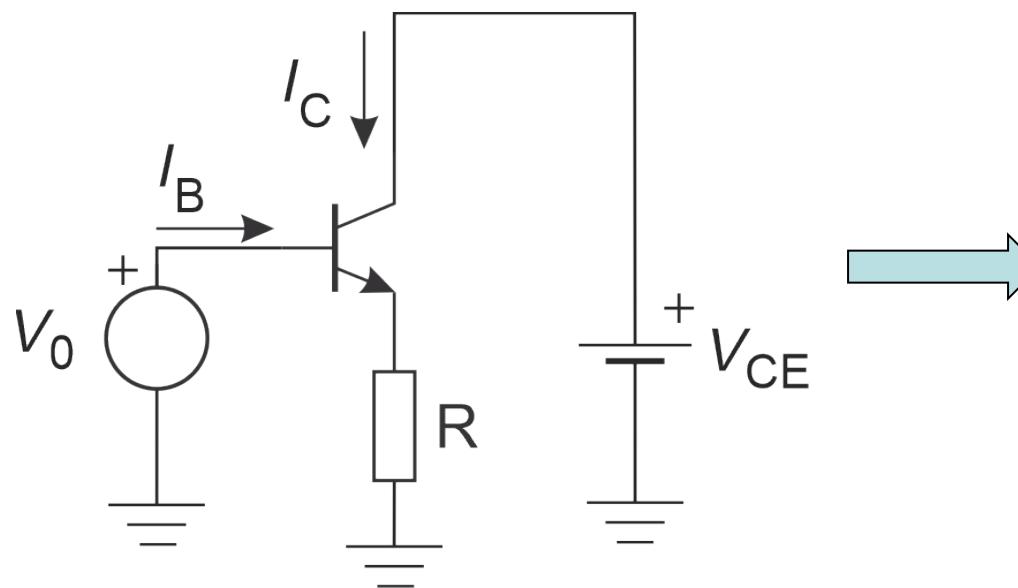
# Model bipolarnog tranzistora za velike signale

- **Model** je adekvatan samo ako je tranzistor u **aktivnoj oblasti** (emitorski spoj direktno polarisan, kolektorski inverzno polarisan).
- Ovaj model se zove **model bipolarnog tranzistora za velike signale**.
- Signal  $v_{ul}$  može biti proizvoljne amplitude, pod uslovom da je tranzistor uvek u aktivnoj oblasti.
- Model je **nelinearan**, struja kolektora eksponencijalno zavisi od ulaznog napona.

# Primer (jednosmerni režim kola)

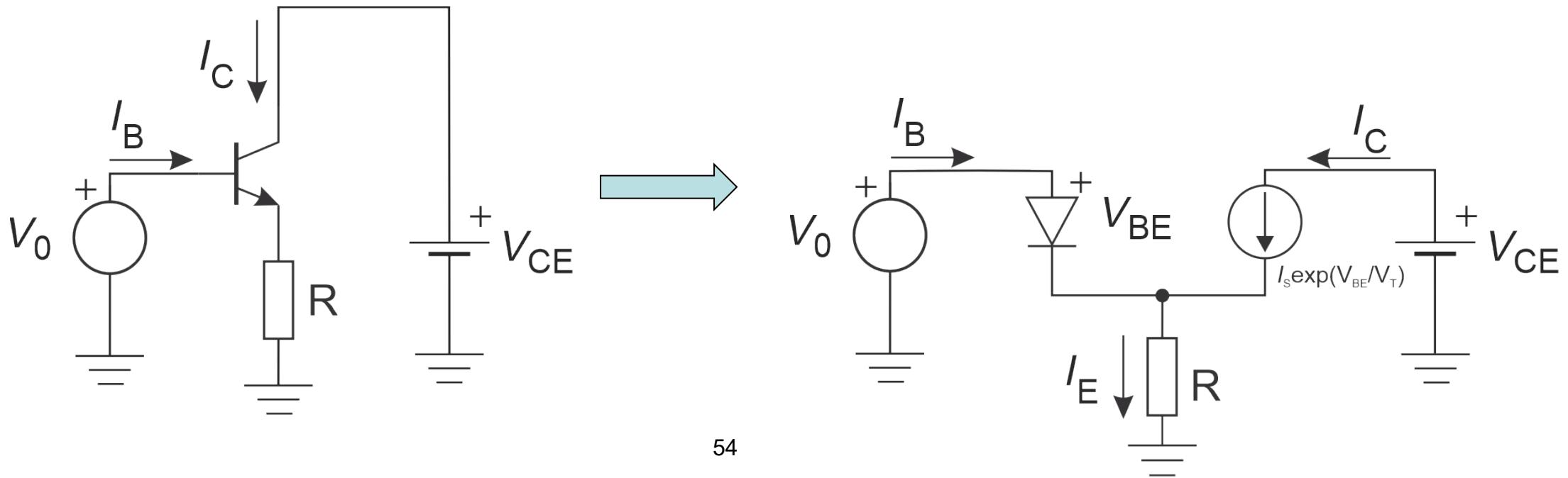
$$I_S = 10^{-16} \text{ A}, \beta = 100$$

$$I_C \approx I_E, R = 100\Omega, V_{ul} = V_0 = 800\text{mV}, V_{CE} = 3\text{V}$$



# Primer (jednosmerni režim kola)

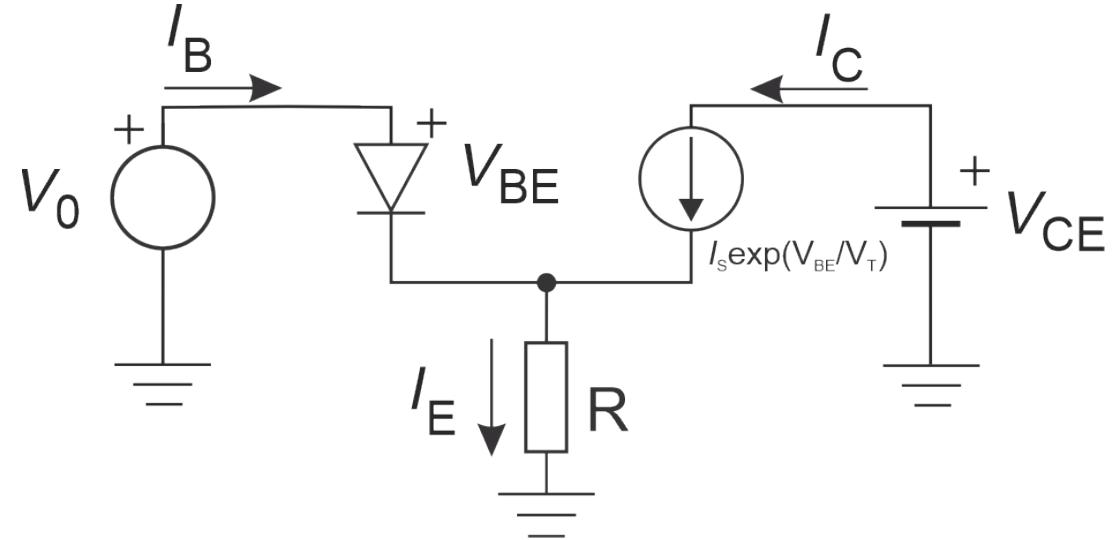
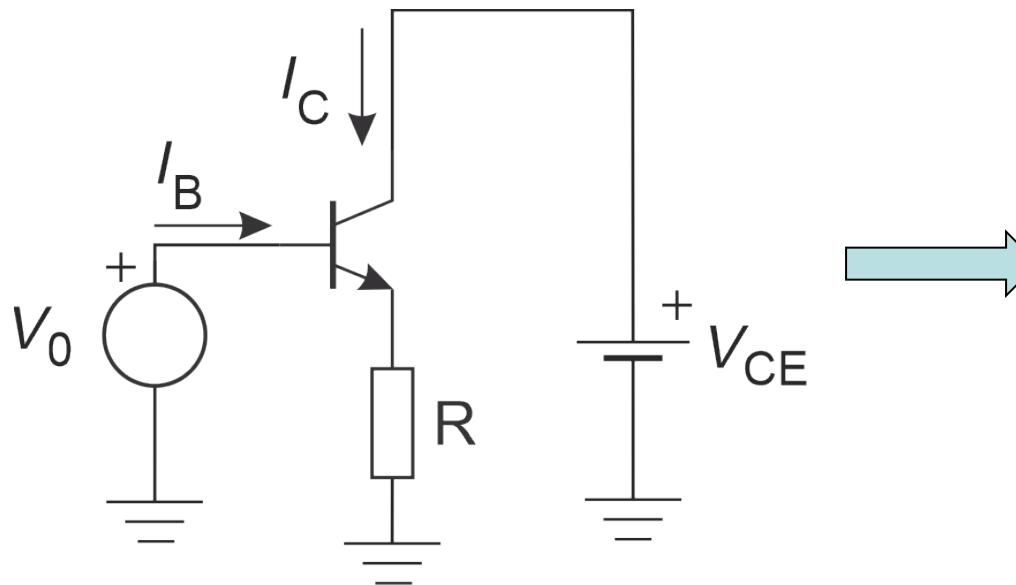
$$V_0 = V_{BE} + I_E \cdot R \approx V_{BE} + I_C \cdot R$$



# Primer (jednosmerni režim kola)

$$V_{BE} = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right)$$

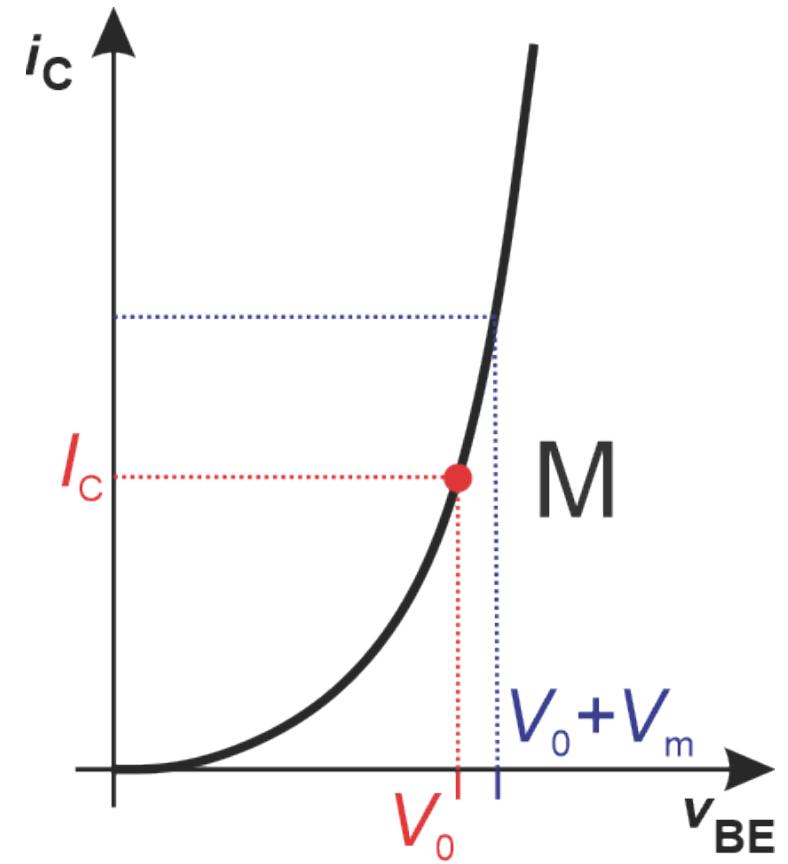
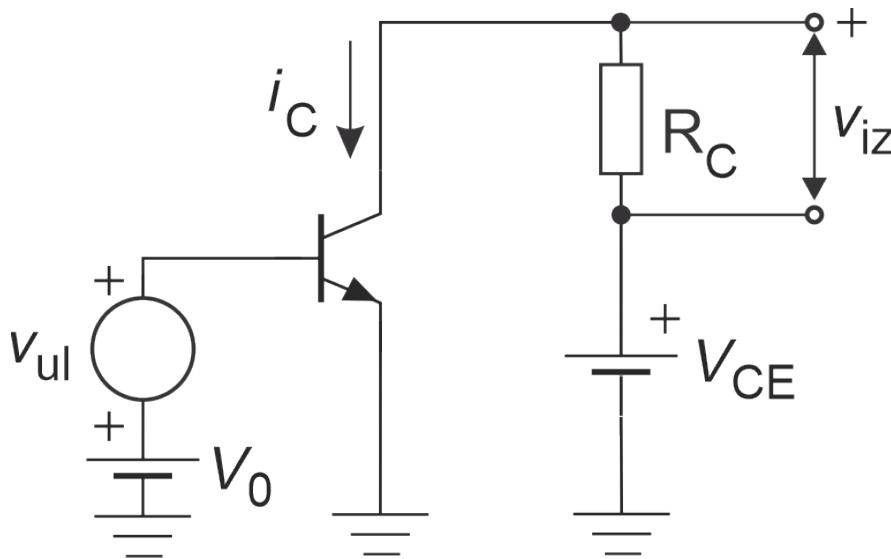
$$V_0 = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) + I_C \cdot R$$



# Model bipolarnog tranzistora za male signale

- Signal  $v_{ul}(t)$  je superponiran jednosmernom naponu  $V_0$ , promena napona  $v_{BE}$  je mala ( $V_m \ll V_0$ ):

$$v_{BE} = V_0 + v_{ul}(t) = V_0 + V_m \cdot \sin \omega t$$



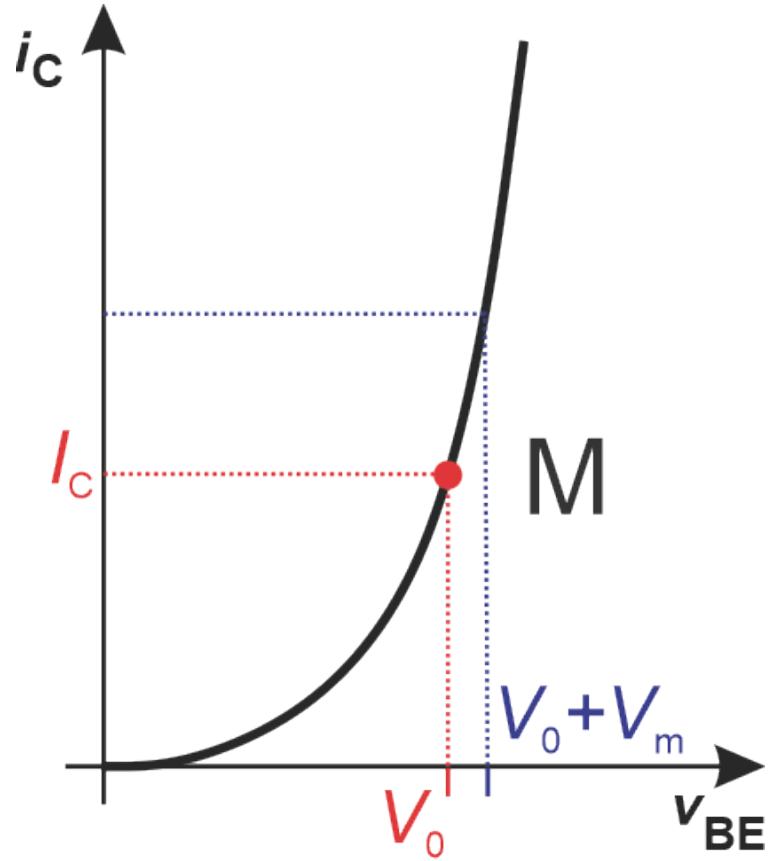
# Model bipolarnog tranzistora za male signale

$$i_C = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_0 + v_{ul}(t)}{V_T}\right) = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_0}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{v_{ul}(t)}{V_T}\right)$$

$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_0}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_m \cdot \sin \omega t}{V_T}\right)$$

$$i_C = I_C \cdot \exp\left(\frac{V_m}{V_T} \cdot \sin \omega t\right)$$



# Model bipolarnog tranzistora za male signale

- Tejlorov (Taylor) razvoj eksponencijalne funkcije u okolini nule:

$$e^x = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^i}{i!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots$$

- Za male vrednosti argumenta  $x$ :

$$|x| \ll 1$$

$$e^x \approx 1 + x$$

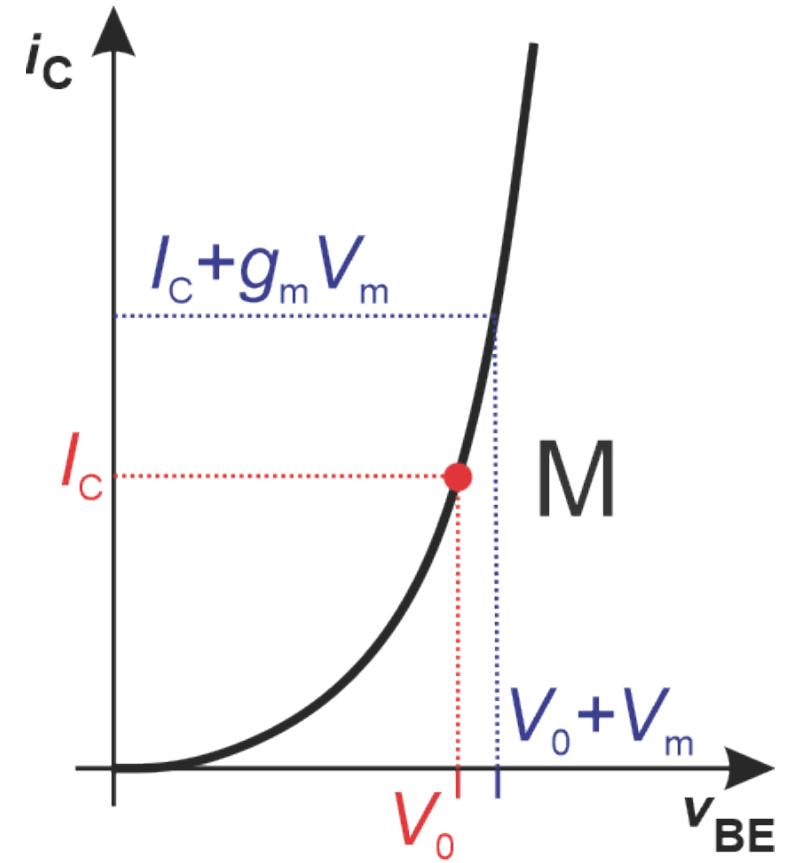
# Model bipolarnog tranzistora za male signale

- Sinusna funkcija je manja ili jednaka jedinici, ukoliko je  $V_m < V_T$ , imamo:

$$i_C = I_C \cdot \exp\left(\frac{V_m}{V_T} \cdot \sin \omega t\right)$$

$$V_m < V_T \Rightarrow i_C \approx I_C \cdot \left(1 + \frac{V_m}{V_T} \cdot \sin \omega t\right)$$

$$i_C = I_C + \frac{I_C}{V_T} \cdot V_m \sin \omega t = I_{C0} + \frac{I_C}{V_T} \cdot v_{ul}(t)$$



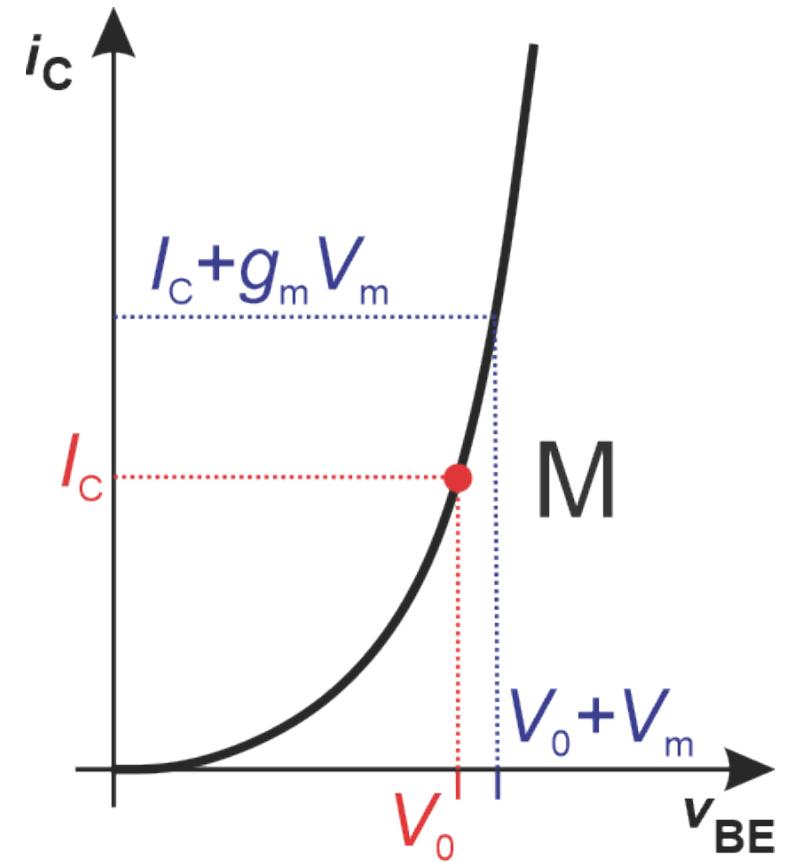
# Model bipolarnog tranzistora za male signale

- Količnik kolektorske struje i napona  $V_T$  je **transkonduktansa** tranzistora u radnoj tački M:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

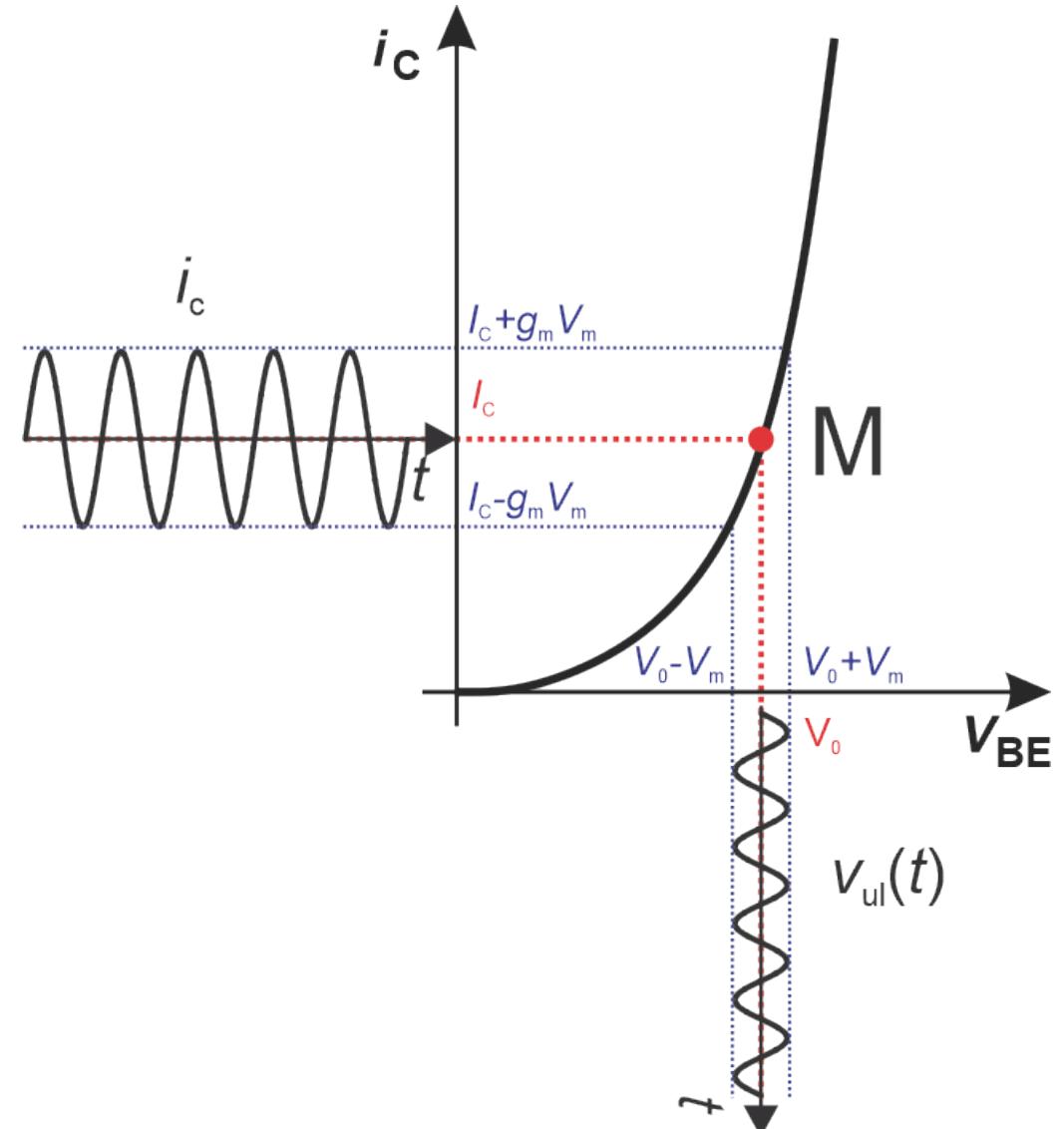
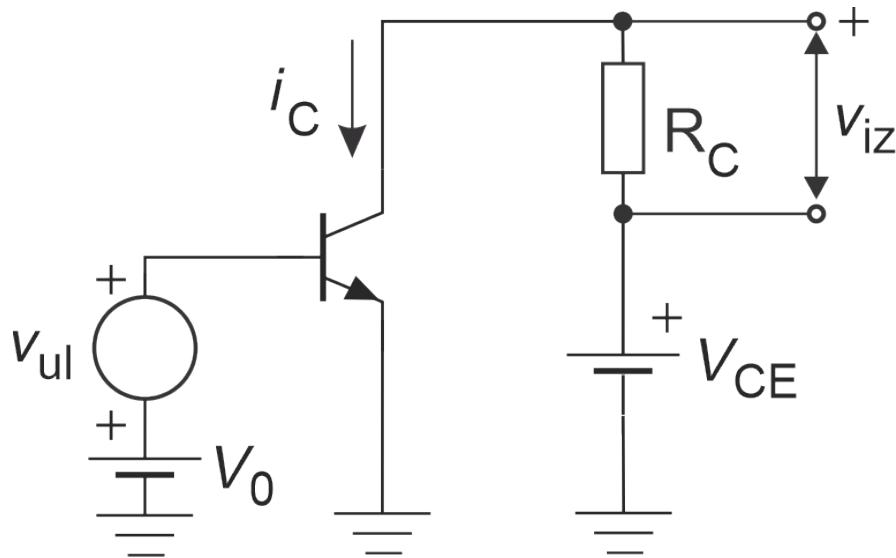
- Kolektorska struja je:

$$i_C = I_C + g_m \cdot V_m \sin \omega t = I_C + \underbrace{g_m \cdot v_{ul}(t)}_{i_c}$$



# Model bipolarnog tranzistora za male signale

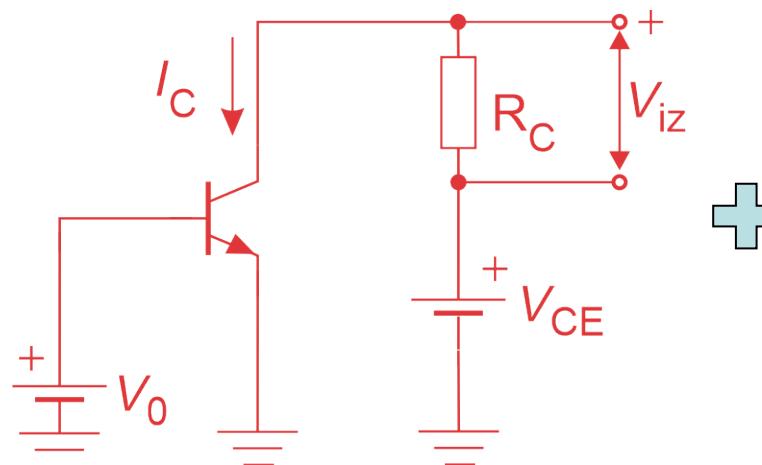
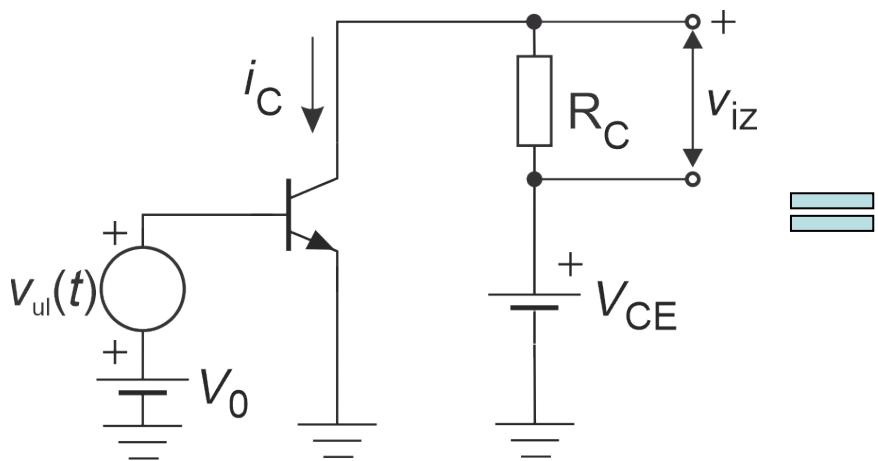
$$i_C = I_C + g_m \cdot V_m \sin \omega t = I_C + \underbrace{g_m \cdot v_{ul}(t)}_{i_c}$$



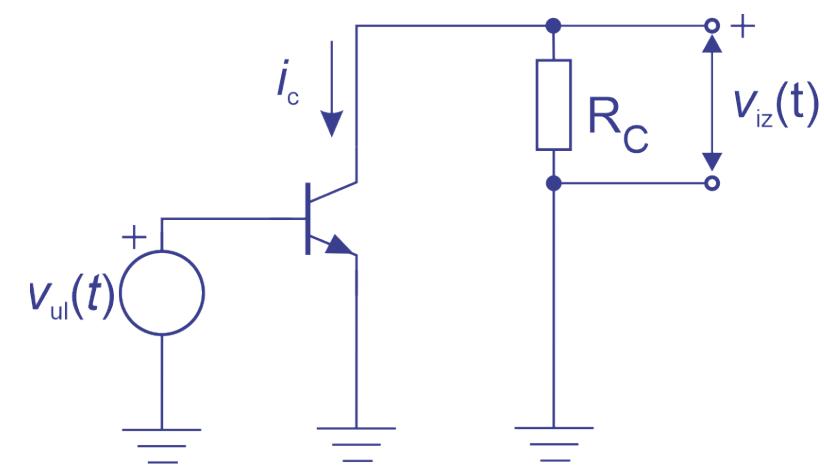
# Model bipolarnog tranzistora za male signale

$$i_C = I_C + g_m \cdot V_m \sin \omega t = I_C + \underbrace{g_m \cdot v_{ul}(t)}_{i_c}$$

Superpozicija



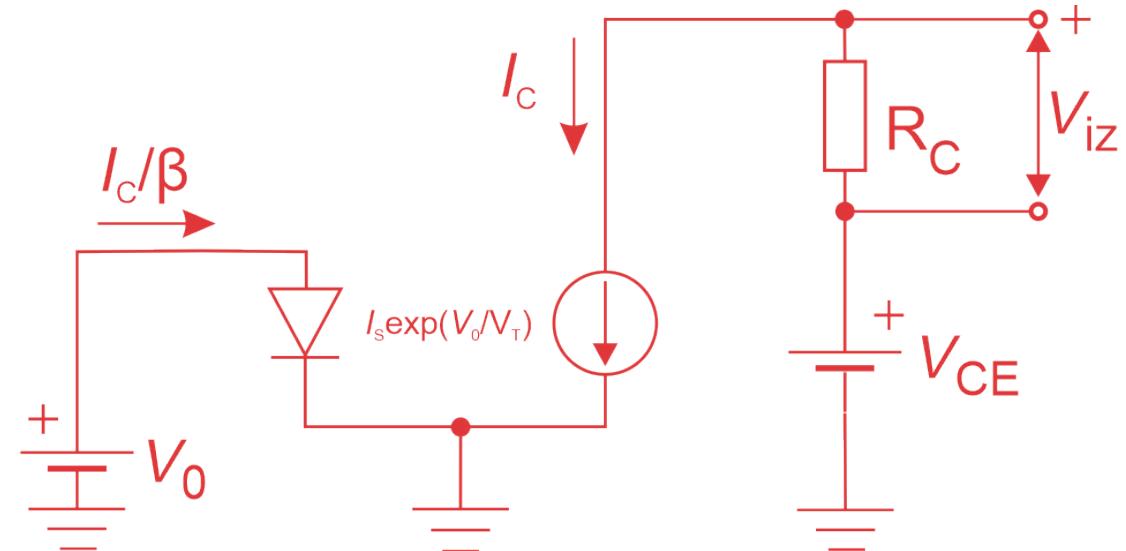
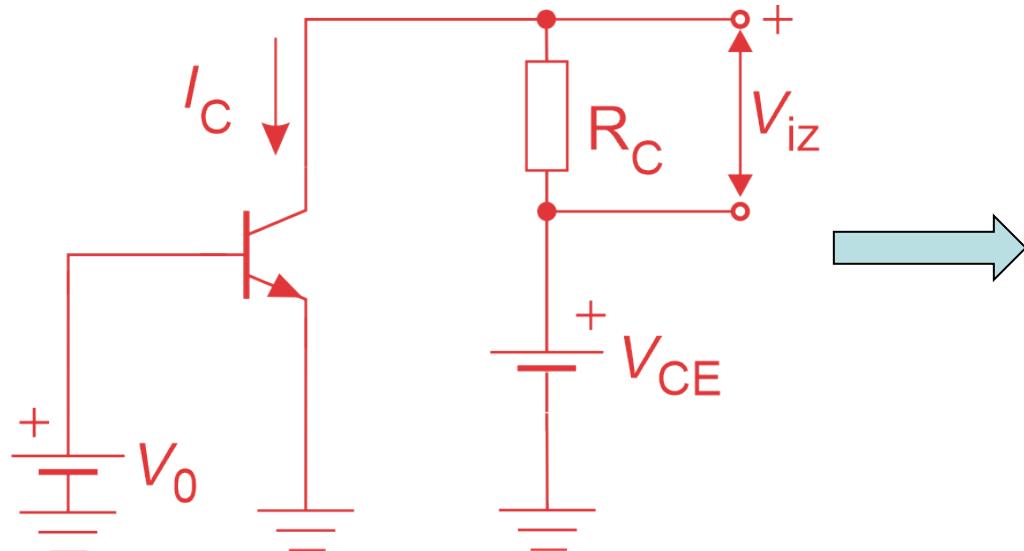
Veliki signali  
(polarizacija)



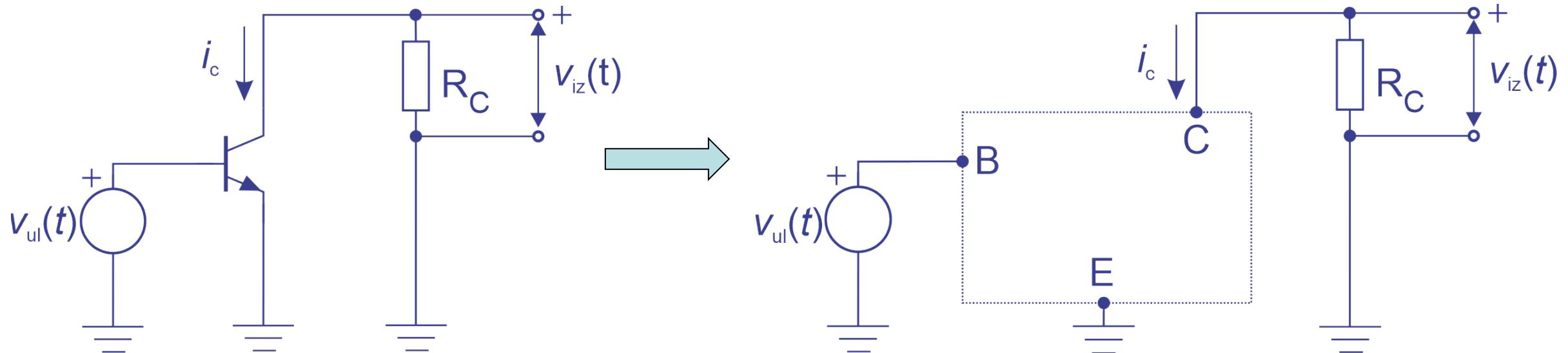
Signali malih  
amplituda

# Model za velike signale

- Model za velike signale – poznati parametri  $I_S$ ,  $\beta$ .
- Izračunava se  $I_C$ .



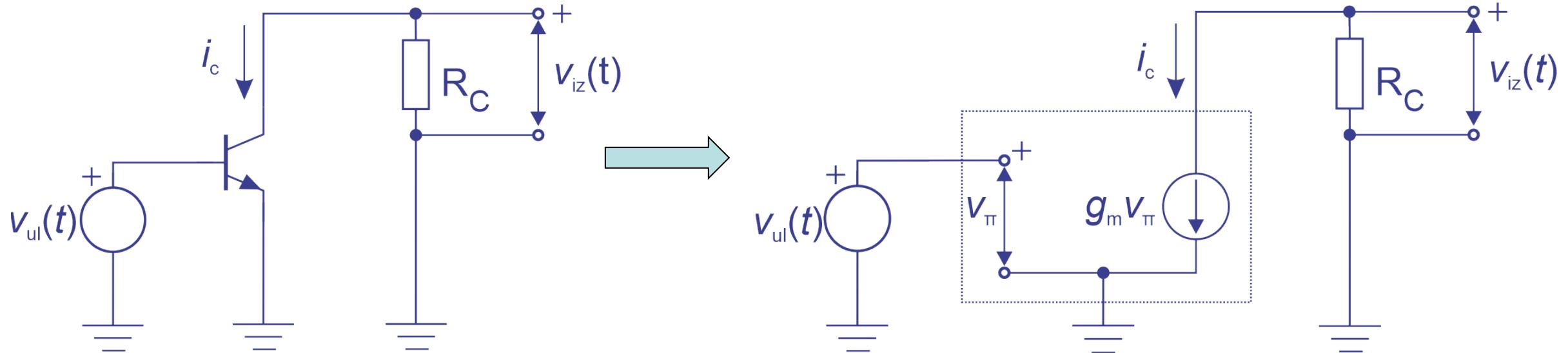
# Model za male signale



# Model za male signale

- Kolektorska struja

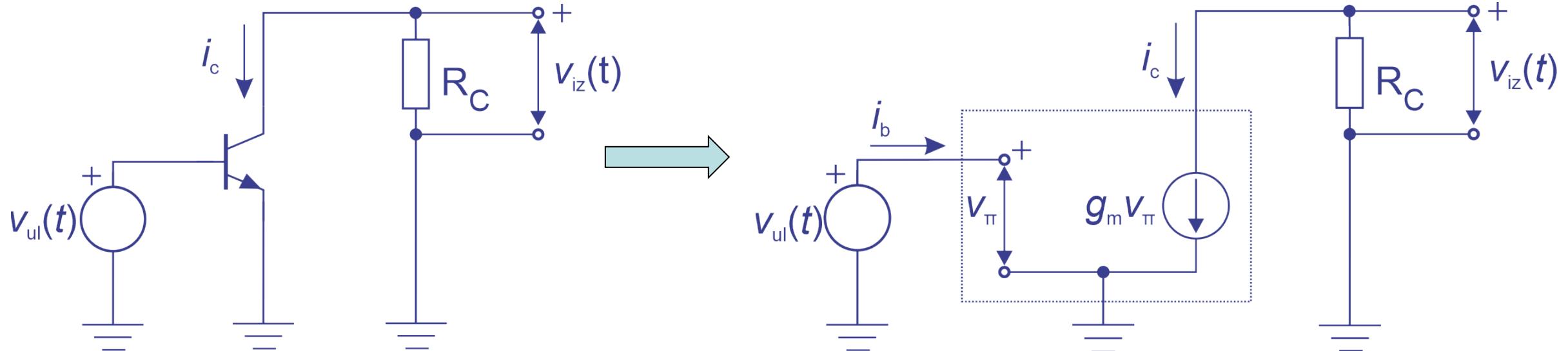
$$i_c(t) = g_m \cdot v_{ul}(t), \quad g_m = \frac{I_C}{V_T}$$



# Model za male signale

- Struja baze

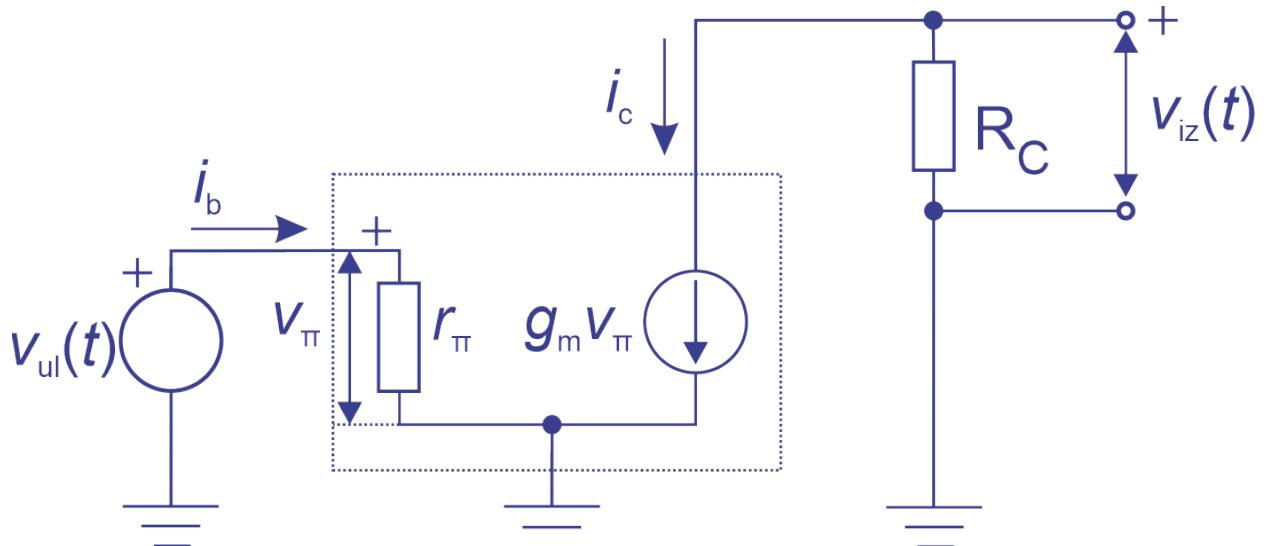
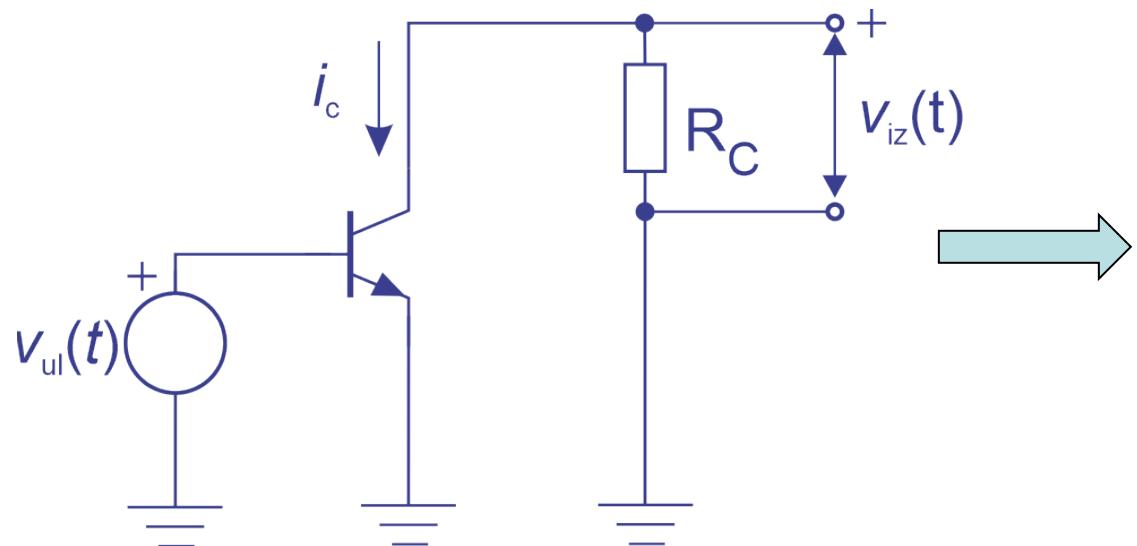
$$i_b = \frac{i_c}{\beta} = \frac{g_m}{\beta} \cdot v_\pi, \quad v_\pi = \frac{\beta}{g_m} \cdot i_b$$



# Model za male signale

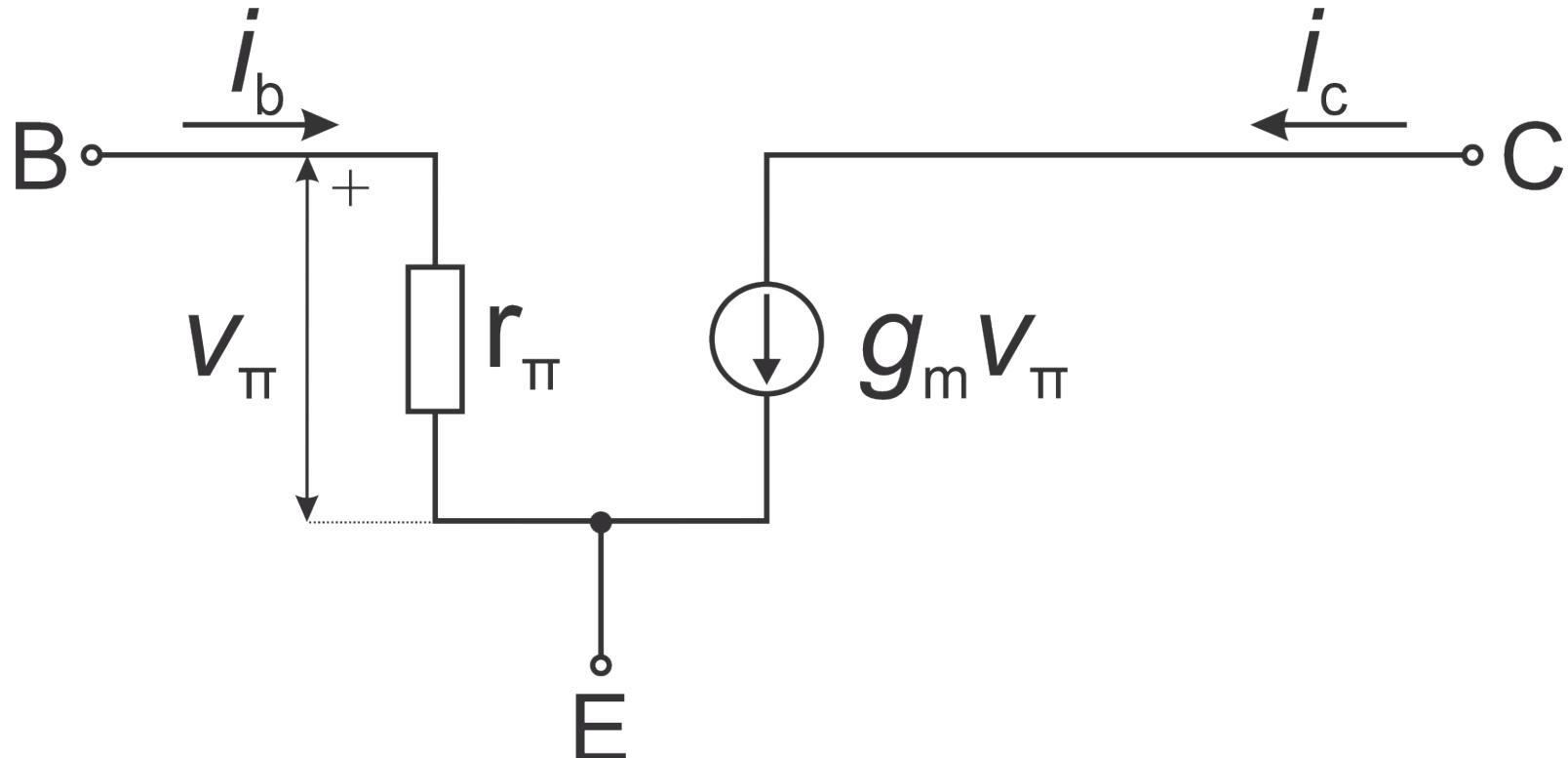
- Otpornost emitorskog spoja

$$v_\pi = r_\pi \cdot i_B, \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$



# Model za male signale

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}, \quad r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}$$



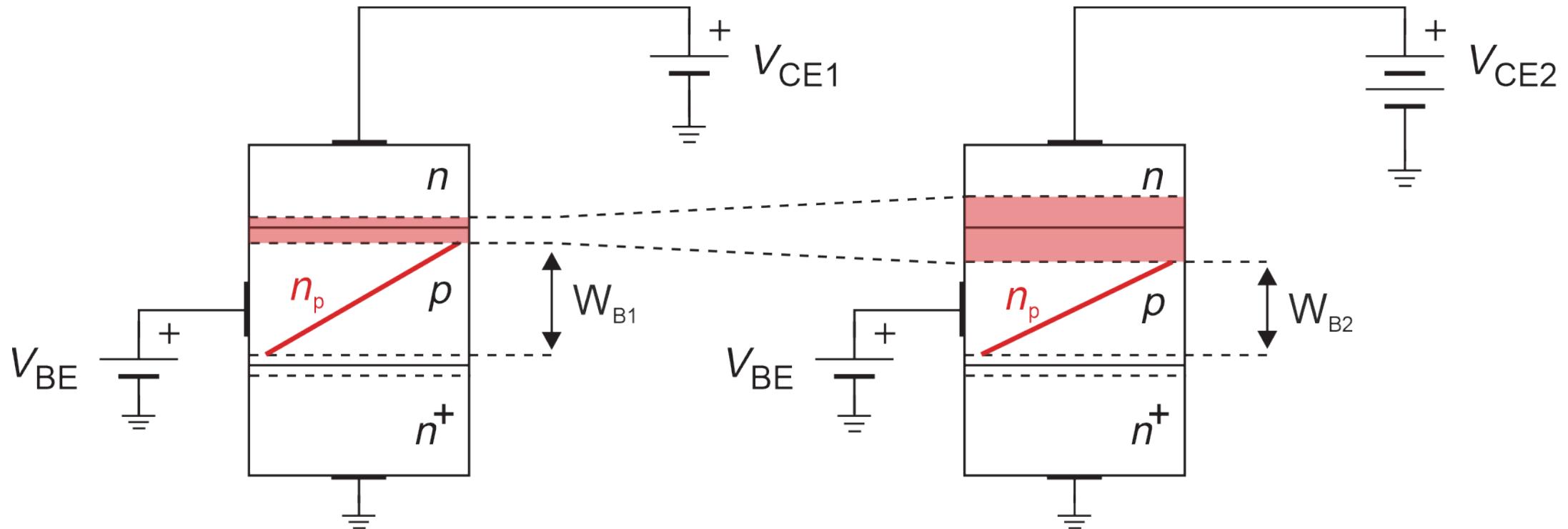
# Model za male signale

- Parametri modela za male signale  $g_m$  i  $r_\pi$  se izračunavaju na osnovu vrednosti kolektorske struje u jednosmernom režimu,  $I_C$ , koja se izračunava primenom modela za velike signale.
- **Naponski generatori** velikih signala predstavljaju **kratak spoj**, **strujni generatori** velikih signala **prekid** u kolu za male signale.

# Erlijev (Early) efekat

- Erlijev efekat, nazvan po J. M. Early-u, je promena efektivne širine baze u bipolarnom tranzistoru usled promene napona između baze i kolektora.
- Veći napon inverzno polarisanog kolektorskog spoja povećava širinu osiromašene oblasti kolektorskog spoja, smanjujući tako širinu baze koja provodi naelektrisanja.

# Erlijev (Early) efekat



# Erlijev (Early) efekat

$$I_C = I_S \left( \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

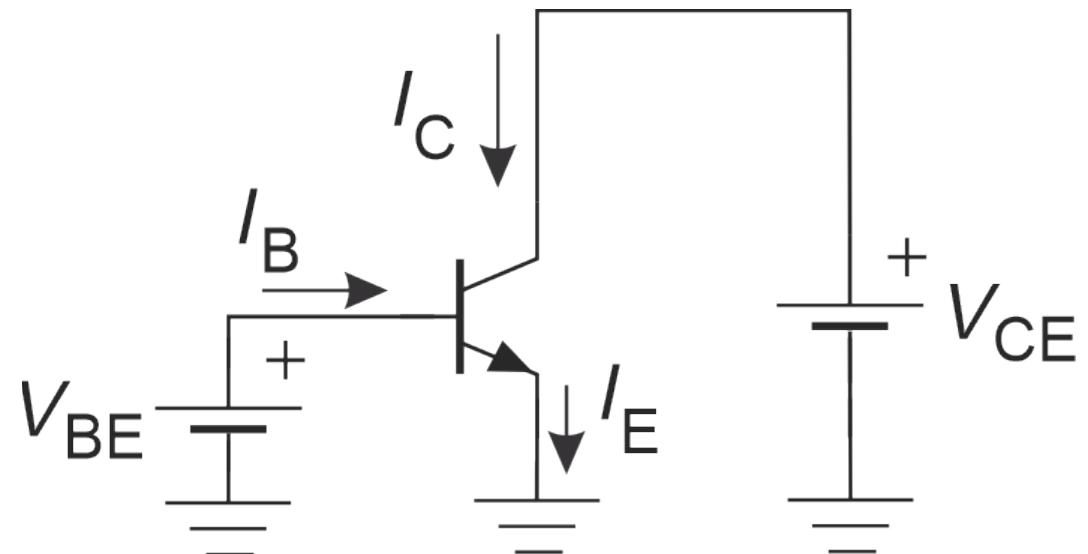
$$I_S = \frac{A_E \cdot q_e \cdot n_i^2 \cdot D_n}{W_B \cdot N_B}$$

$$W_{B1} > W_{B2} \Rightarrow I_{S1} < I_{S2} \Rightarrow I_{C1} < I_{C2}$$

$A_E$  – površina emitorskog spoja

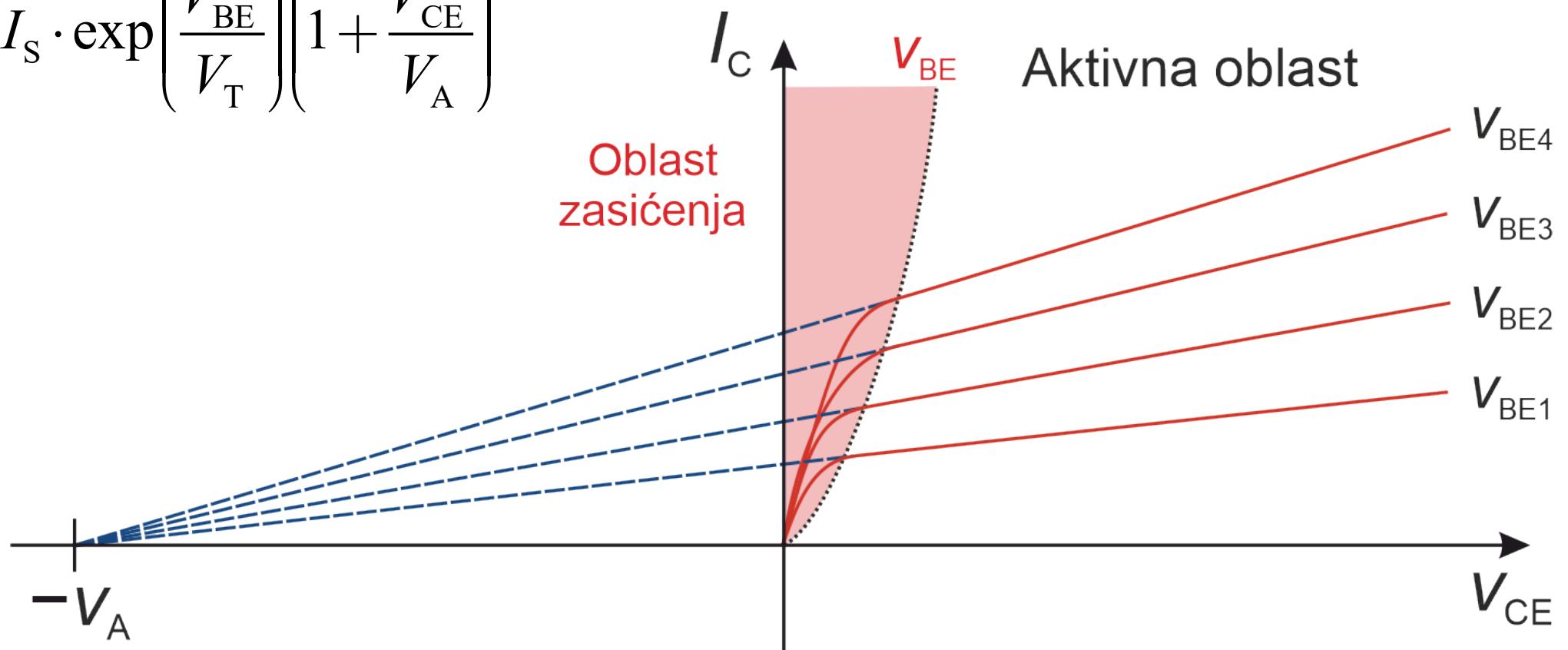
$W_B$  – širina oblasti baze

$N_B$  – koncentracija akceptorata u bazi



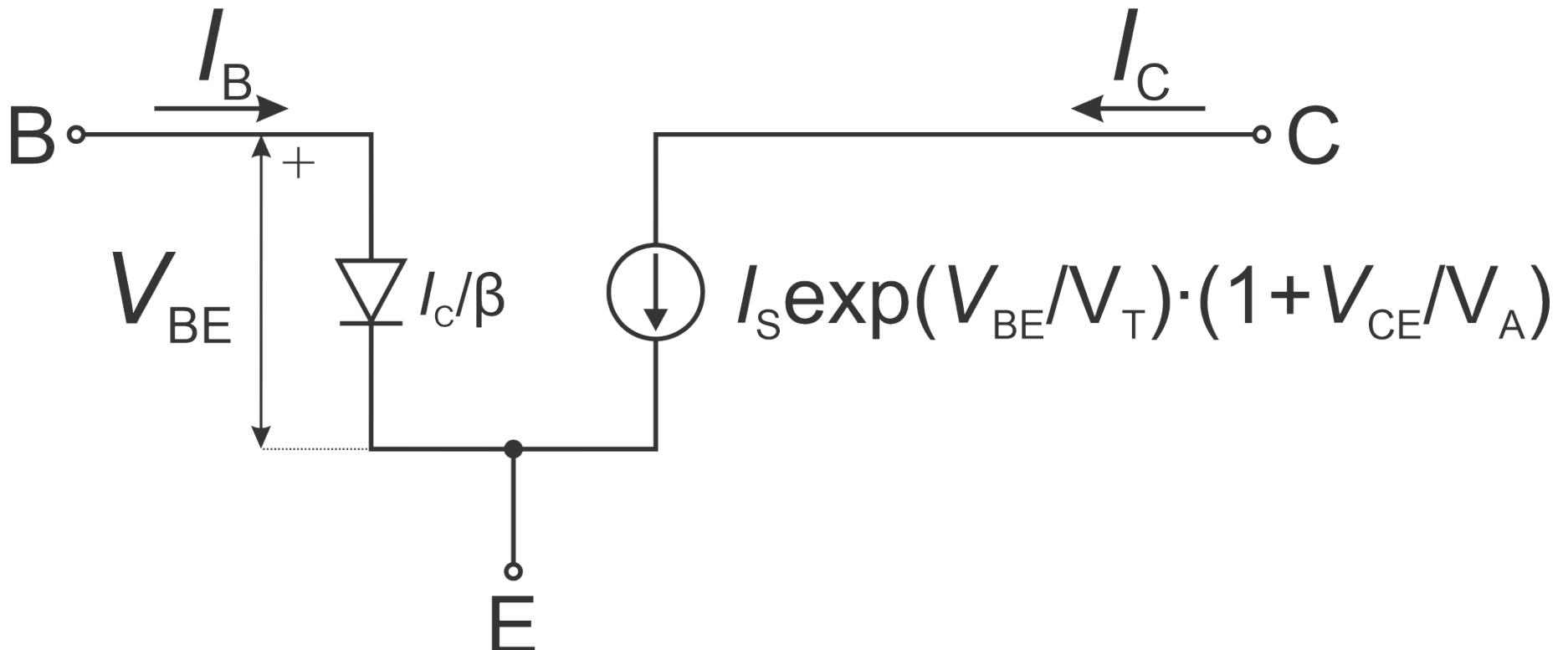
# Erlijev (Early) efekat

$$I_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$



# Erlijev (Early) efekat

- Model za velike signale

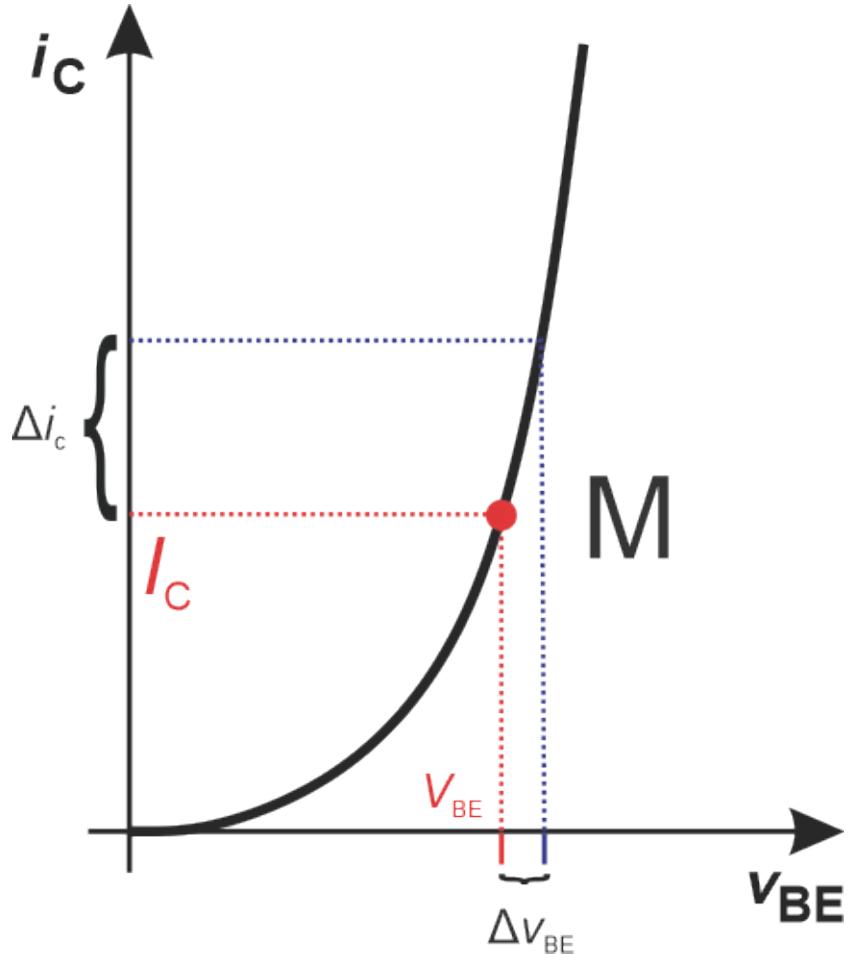


# Erlijev (Early) efekat

## Model za male signale

- Bipolarni tranzistor je polarisan, postignuta je odgovarajuća radna tačka.
- Prilikom promene napona između dva priključka ( $V_{CE}$ ), napon na drugim ( $V_{BE}$ ) ostaje konstantan.
- Modelovanje efekata elementima kola.

# Erlijev (Early) efekat

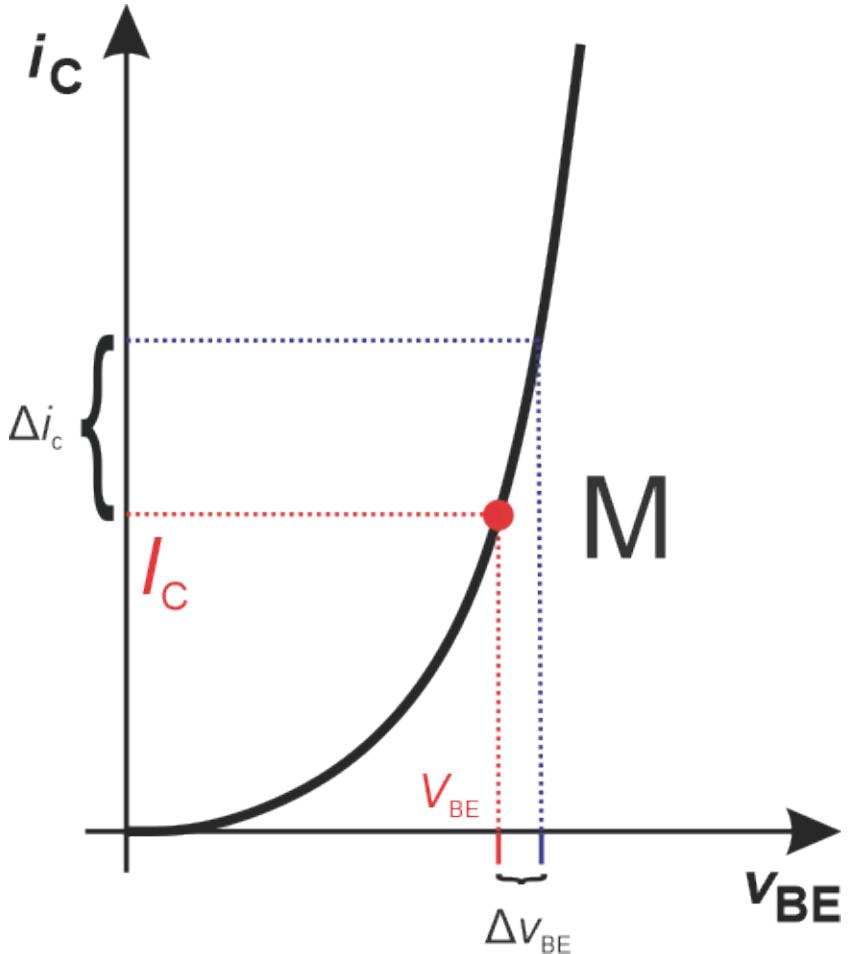


$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$g_m = \frac{di_C}{dv_{BE}}$$

$$g_m = \frac{I_S}{V_T} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \cdot \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) \approx \frac{I_C}{V_T}$$

# Erlijev (Early) efekat

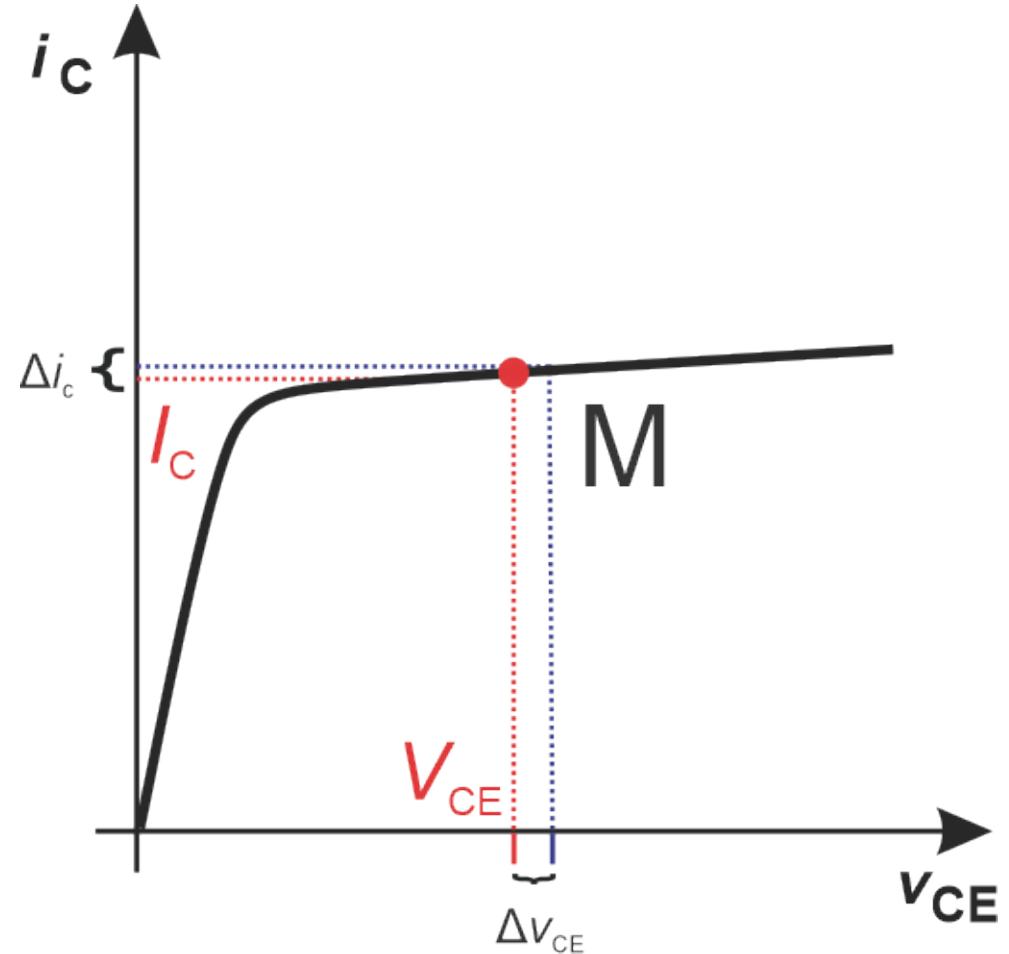


- Odnos struja baze i kolektora je nepromenjen,  $\beta$ .

$$i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}$$

# Erlijev (Early) efekat



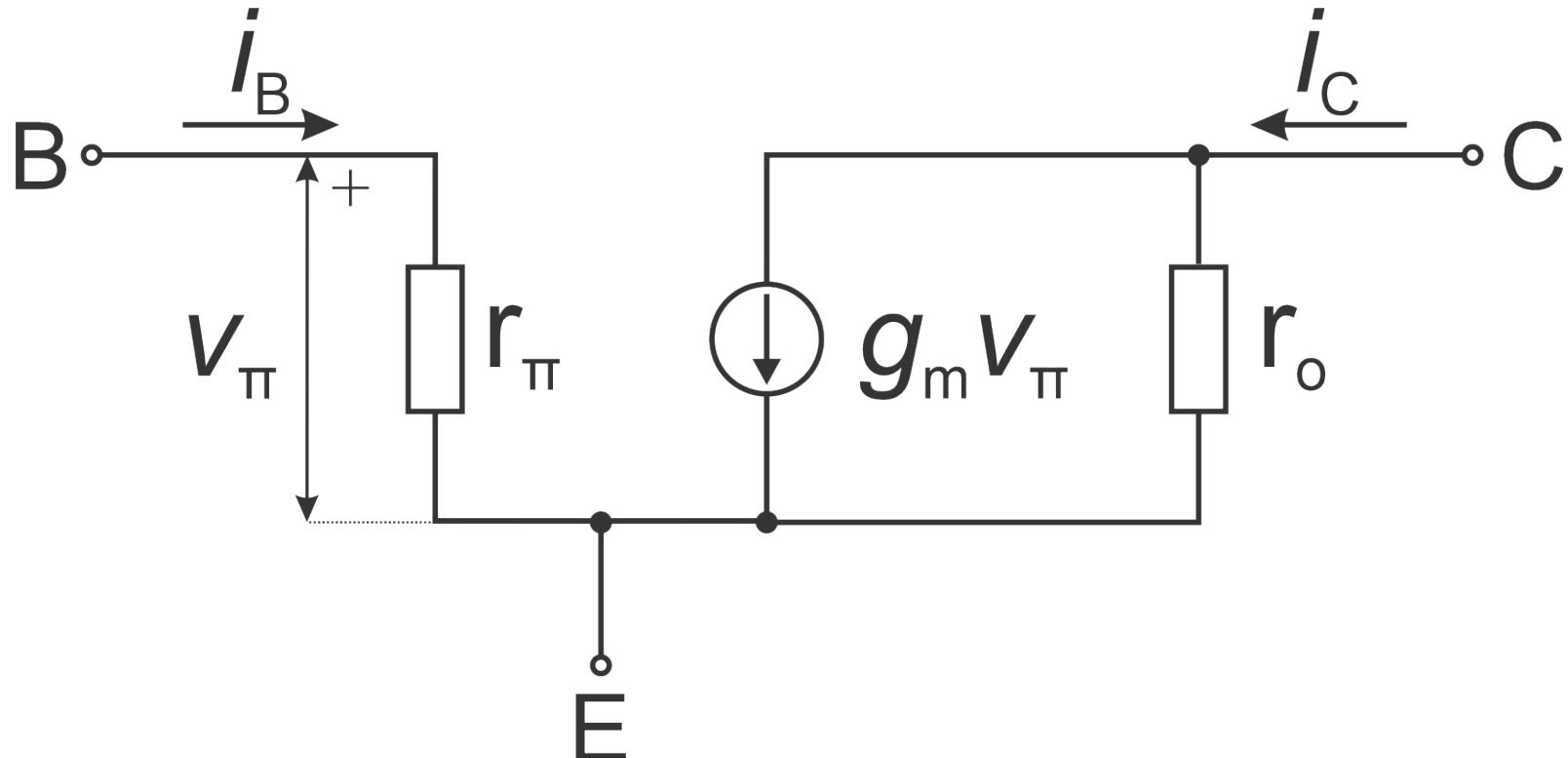
$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

$$\frac{di_C}{dv_{CE}} = I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \cdot \frac{1}{V_A} \approx \frac{I_C}{V_A}$$

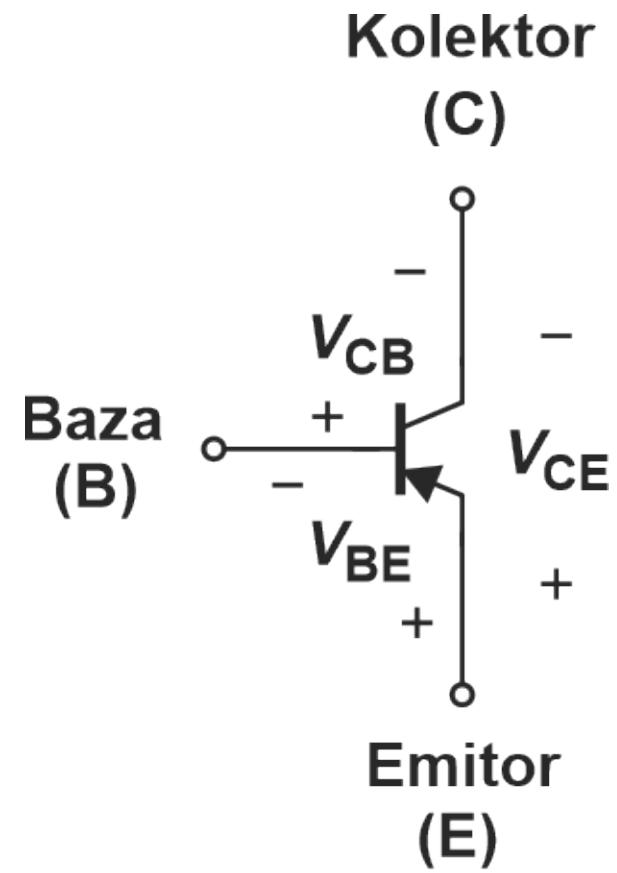
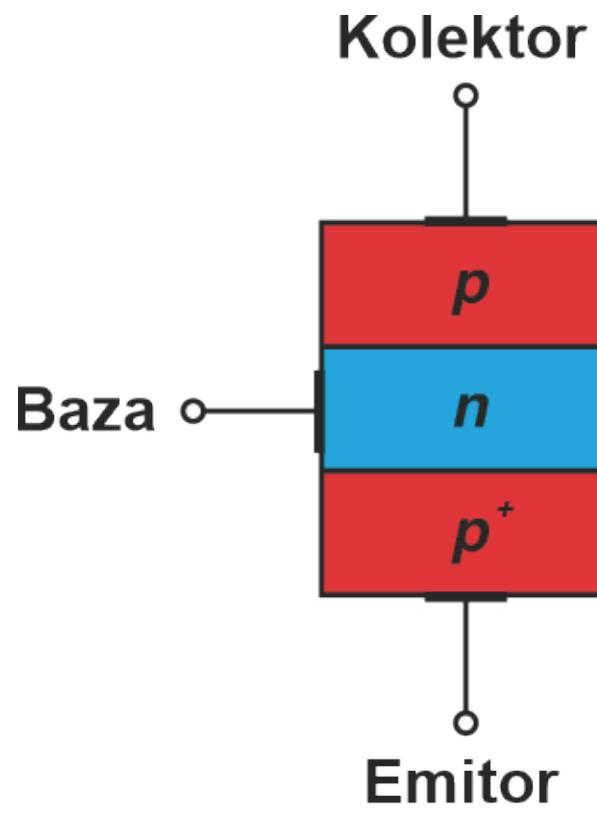
$$r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

# Erljiev (Early) efekt, model za male signale

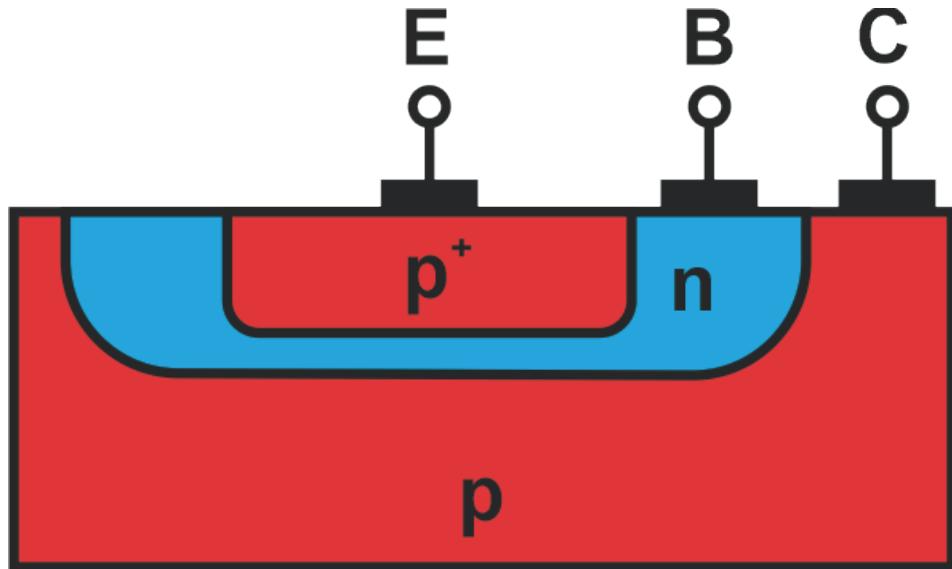
$$g_m = \frac{I_C}{V_T}, \quad r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}, \quad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$



# PNP tranzistor



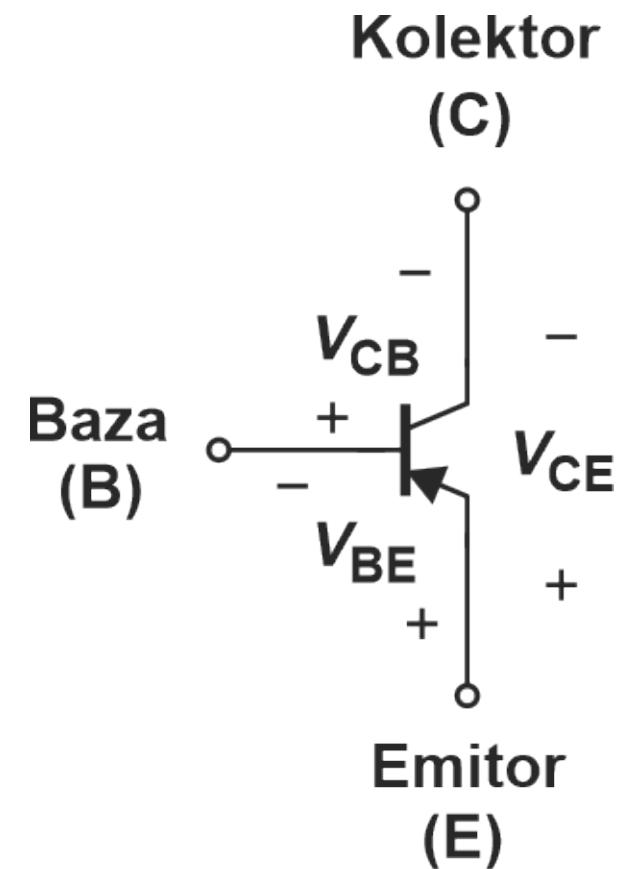
# Struktura PNP bipolarnog tranzistora



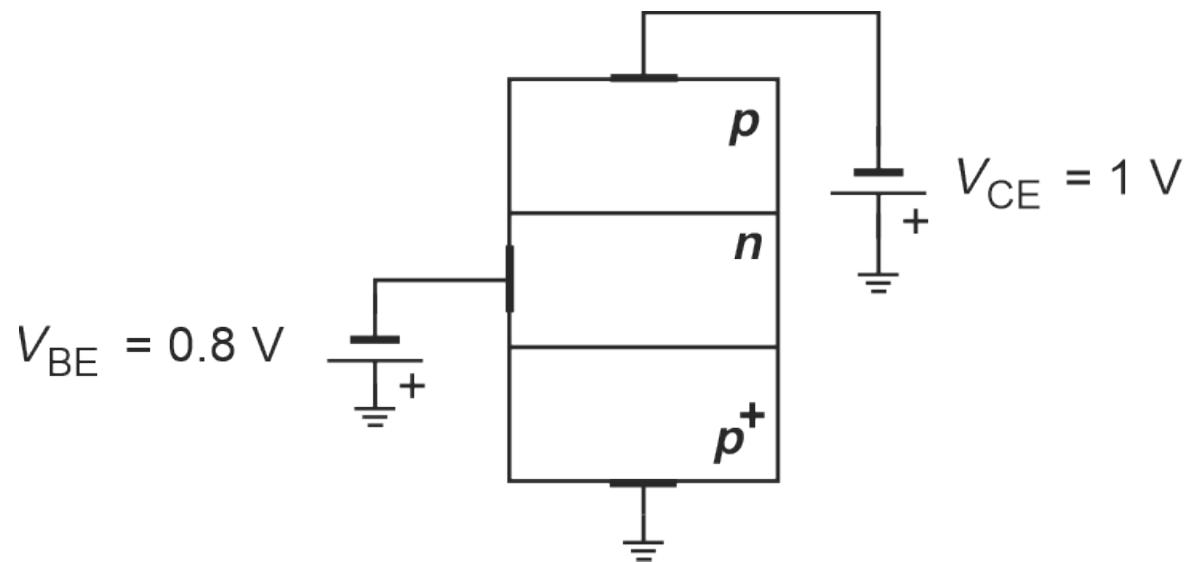
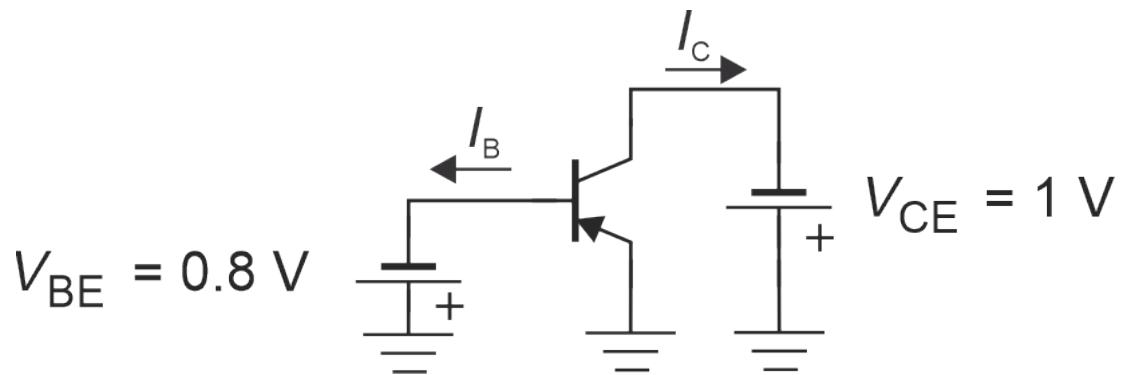
Poprečni presek

# Režimi rada PNP tranzistora

Naponi	Emitorski	Kolektorski	Režim
$V_{BE} < 0, V_{CB} < 0$	direktno	inverzno	aktivna oblast
$V_{BE} < 0, V_{CB} > 0$	direktno	direktno	zasićenje
$V_{BE} > 0, V_{CB} < 0$	inverzno	inverzno	zakočenje
$V_{BE} > 0, V_{CB} > 0$	inverzno	direktno	inverzna aktivna o.

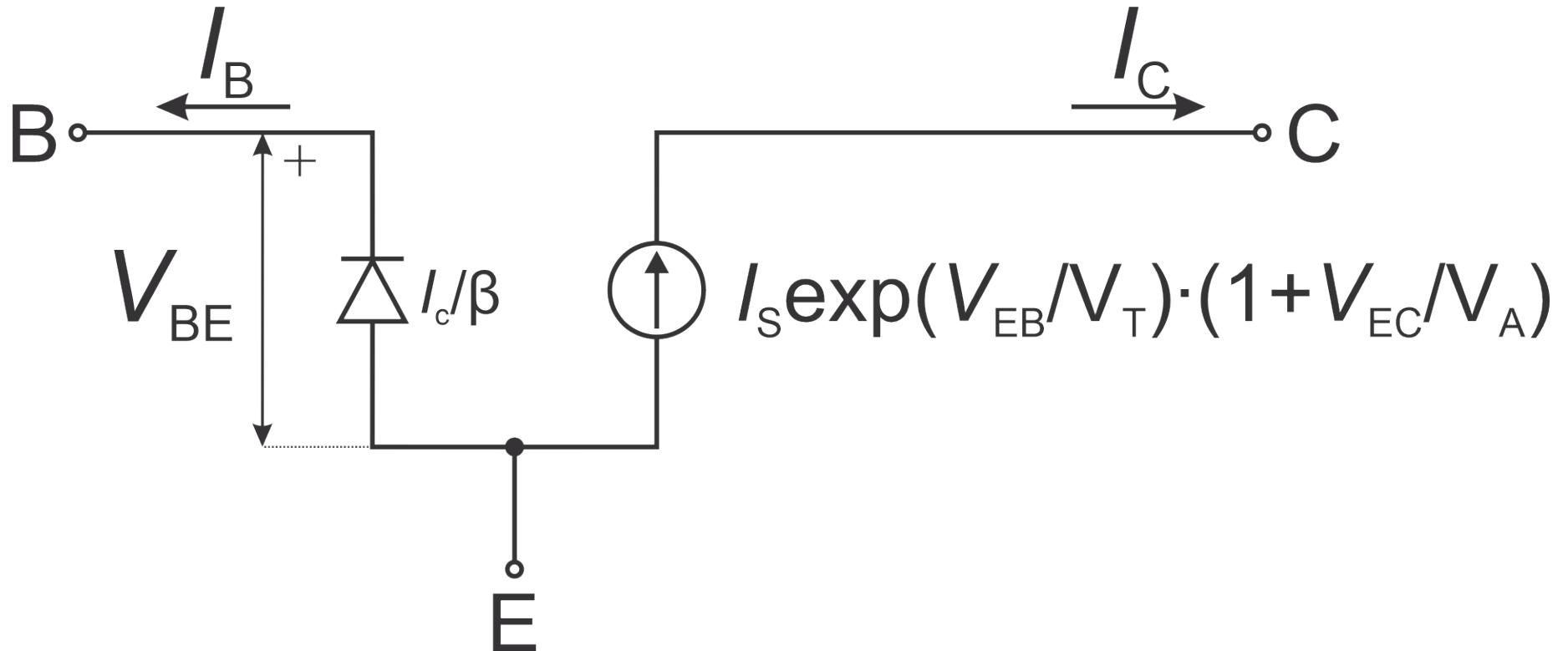


# Tranzistorski efekat – aktivan režim



$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} \leq 0$$

# Model za velike signale



# Model za male signale

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}, \quad r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C}, \quad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

