

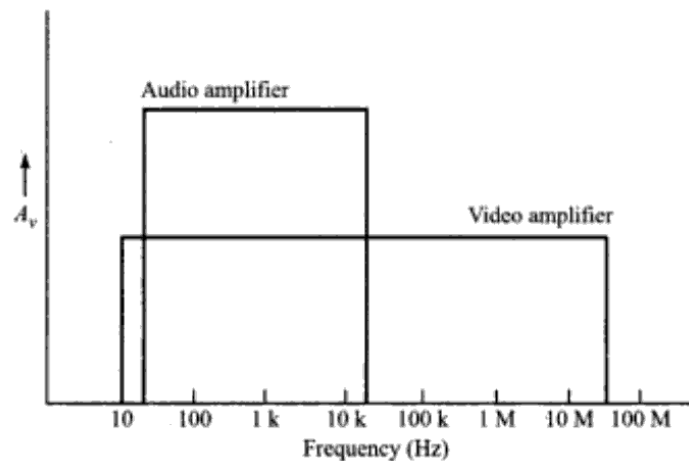
# Širokopojasni pojačavači

# Širokopojasni pojačavači

Širokopojasni pojačavači ili video pojačavači imaju propusni opseg u opsegu od nekoliko herca do do frekvencija reda megaherca. Pored obrade video signala primenjuju se i u radarima kao i u ultrazvučnim aplikacijama. Najveće ograničenje pri projektovanju ovih kola predstavljaju u parazitne kapacitivnosti koje su reda pF.

Uobičajeni postupak za stabilizaciju rada operacionog pojačavača je uvođenje dominantnog pola na frekvencijama od desetak herca. U tom slučaju jedinično pojačanje je u opsegu od 1 do 10 MHz. Ovaj način stabilisanja pojačavača nije primenjiv kod video pojačavača koji treba da ima približno konstantno pojačanje u frekvencijskom opsegu koji sadrži video informaciju.

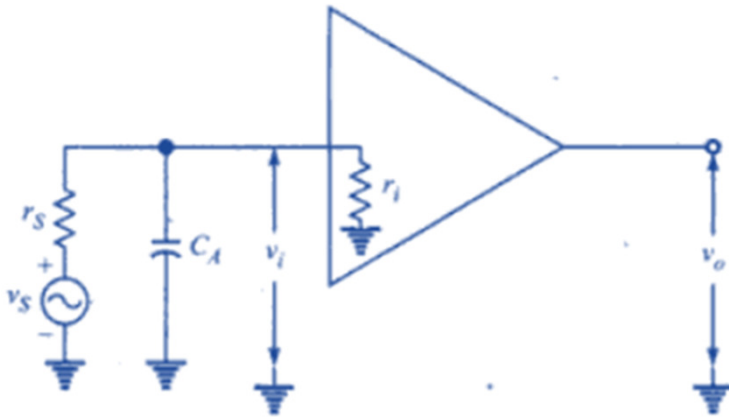
Tehnike koja se primenjuje u širokopojasnim pojačavačima su umanjene otpornosti opterećenja i negativna povratna sprega. Ovim tehnikama se umanjuje pojačanje, čime se zapravo pravi kompromis između pojačanja i širine propusnog opsega.



# Širokopolasni pojačavači

## Uticaj paralelne kapacitvnosti na ulazu pojačavača

Na visokim frekvencijama moraju se pored medjuelektrodnih kapacitvnosti tranzistora razmotriti i kapacitvnosti koje postoje na provodnicima, spojevima i svim provodnim oblastima koje su blizu jedna druge. Paralelna kapacitvnost predstavlja kapacitvnost kroz koju teče naizmeničnu komponenta struje prema referentnom čvoru, čime se umanjuje pojačanje pojačavača. Ovim kapacitvnostima praktično se preusmerava signal ka masi.



Frekvencija pola je inverzno proporcionalana paralelnoj vezi otpornosti izvora signala  $r_s$  i ulazne otpornosti pojačavača  $r_i$ . Da bi se povećala granična frekvencija potrebno je smanjiti jednu od ove dve otpornosti.

$$Z_C || r_i = \frac{r_i}{1 + j\omega \cdot C_A \cdot r_i}$$

$$\frac{v_i}{v_s} = \frac{r_i}{1 + j\omega \cdot C_A \cdot r_i} \cdot \frac{1}{r_s + \frac{r_i}{1 + j\omega \cdot C_A \cdot r_i}}$$

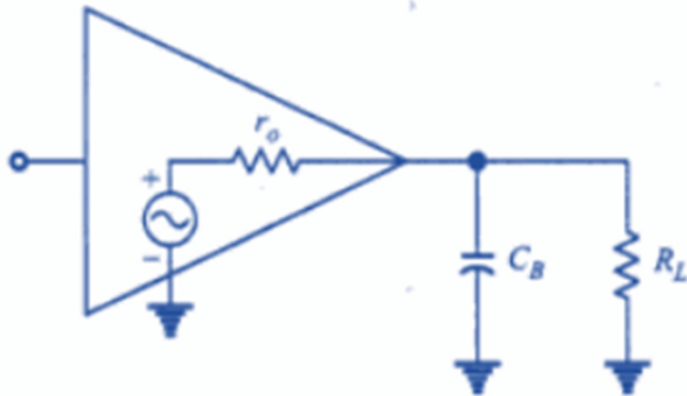
$$\frac{v_i}{v_s} = \frac{r_i}{r_i + r_s} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_A}}$$

$$\omega_A = \frac{1}{C_A \cdot r_i || r_s}$$

# Širokopolasni pojačavači

## Uticaj paralelne kapacitivnosti na izlazu pojačavača

Paralelna kapacitivnost na izlazu pojačavača formira zajedno sa izlaznom otpornošću pojačavača,  $r_o$ , i otpornošću potrošača propusnik niskih frekvencija. Analitički izraz je isti kao za šant kapacitivnost na ulazu pojačavača.



$$Z_C || R_L = \frac{R_L}{1 + j\omega \cdot C_B \cdot R_L}$$

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{R_L}{1 + j\omega \cdot C_B \cdot R_L} \cdot \frac{1}{r_o + \frac{R_L}{1 + j\omega \cdot C_B \cdot R_L}}$$

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{R_L}{r_o + R_L} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_B}}$$

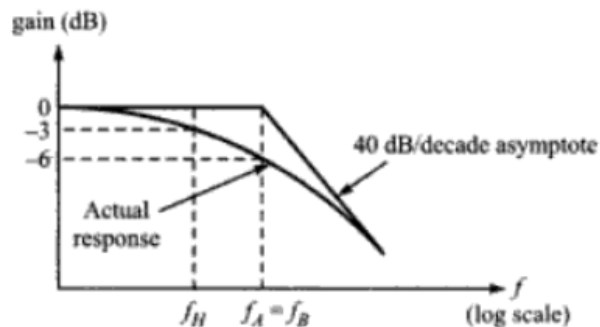
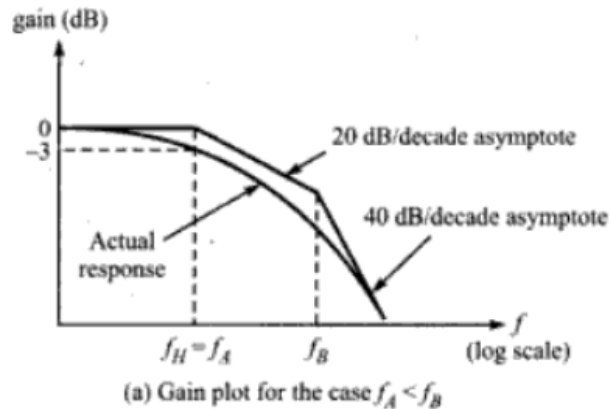
$$\omega_A = \frac{1}{C_B \cdot R_L || r_o}$$

Da bi se povećava frekvencija pola potrebno je smanjiti izlaznu otpornost ili otpornost potrošača. Dominantan uticaj imaće manja od ove dve otpornosti.

# Širokopojasni pojačavači

## Uticaj paralelnih kapacitvnosti na frekvencijsku karakteristiku

Svaka od dve šant kapacitvnosti, na ulazu i na izlazu, kreiraju po jedan pol u prenosnoj funkciji pojačavača. U asimptotskoj aproksimaciji amplitudske karakteristike nakon graničnih frekvencija ulaznog i izlaznog RC kola javlja se pad naponske karakteristike od 20 dB/dec.

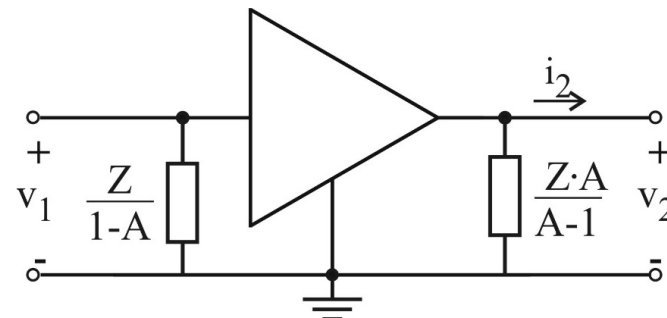
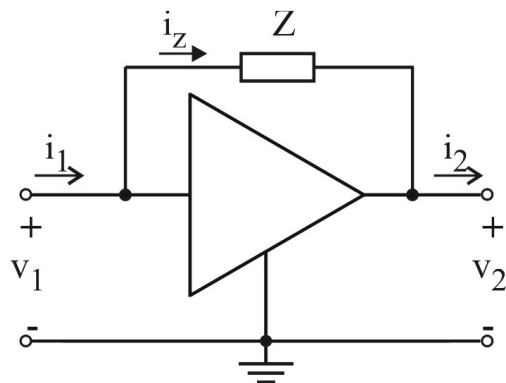


# Širokopojasni pojačavači

## Milerova teorema

Primenom Milerove teoreme zamenjuje se impedansa koja povezuje izlaz i ulaz nekog pojačavača sa dve impedanse od kojih je jedna između ulaznih priključaka a druga između izlaznih priključaka. Da bi ova dva kola bila identična potrebno je obezbediti da pri istoj vrednosti napona na ulazu  $v_1$  i izlazu  $v_2$  u oba kola teku iste struje kao pre zamene impedanse.

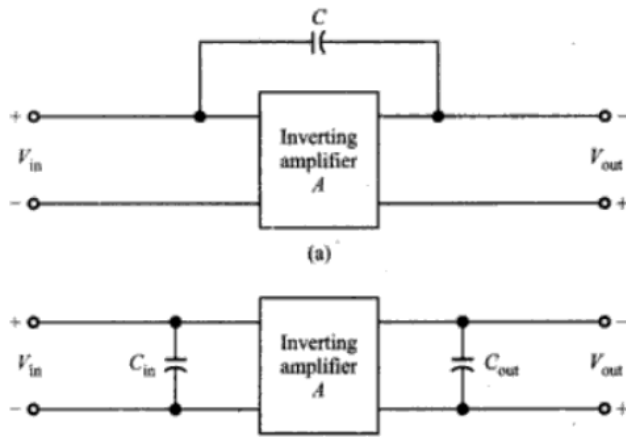
$$Z_1 = \frac{v_1}{i_Z} = \frac{v_1}{\frac{v_1 - v_2}{Z}} \quad Z_2 = \frac{v_2}{-i_Z} = \frac{v_2}{\frac{v_2 - v_1}{Z}} \quad \frac{v_2}{v_1} = A$$
$$Z_1 = \frac{Z}{1 - A} \quad Z_2 = \frac{Z \cdot A}{A - 1}$$



# Širokopojasni pojačavači

## Milerova teorema

Ekvivalentna kapacitivnost paralelno sa ulaznim pristupom naziva se Milerova kapacitivnost. Uticaj ekvivalentne kapacitivnosti na izlazu je znatno manja nego na ulazu.



$$Z_{in} = \frac{Z}{1 - A}$$

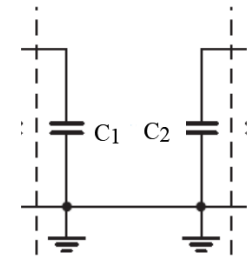
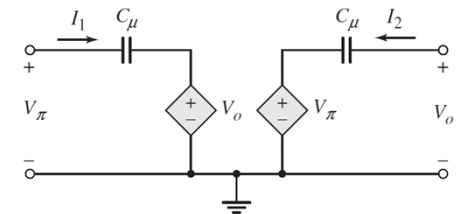
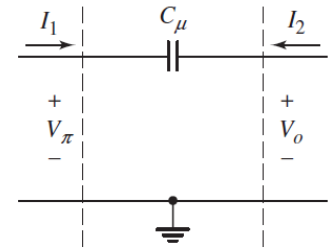
$$Y_{in} = (1 - A) \cdot Y$$

$$C_{in} = (1 - A) \cdot C$$

$$Z_{out} = \frac{Z \cdot A}{A - 1}$$

$$Y_{out} = Y \cdot \frac{A - 1}{A}$$

$$C_{out} = \frac{A - 1}{A} \cdot C$$

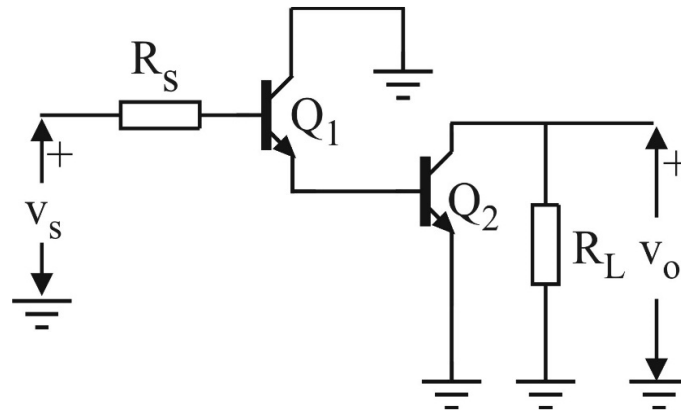


# Širokopolasni pojačavači

## Direktna sprega stepena sa zajedničkim kolektorom i stepena sa zajedničkim emitorom

Na graničnu frekvenciju sprege sa zajedničkim emitorom najviše utiče kapacitivnost na ulaznom pristupu, jer je za ovu spregu ulazna vremenska konstanta daleko veća od izlazne vremenske konstante. Jedno od rešenja da se smanji ulazna vremenska konstanta pojačavača sa zajedničkim emitorom i proširi propusni opseg je da se između pobudnog generatora i pojačavača poveže naponski bafer.

Prvi pojačavački stepen koji čini tranzistor  $Q_1$  u sprezi sa zajedničkim kolektorom ima ulogu naponskog bafera. Usled prisustva naponskog bafera značajno je smanjena vremenska konstanta kola na ulaznom pristupu drugog pojačavačkog stepena, jer je unutrašnja otpornost pobudnog generatora,  $R_s$ , zamenjena izlaznom otpornošću bafera.



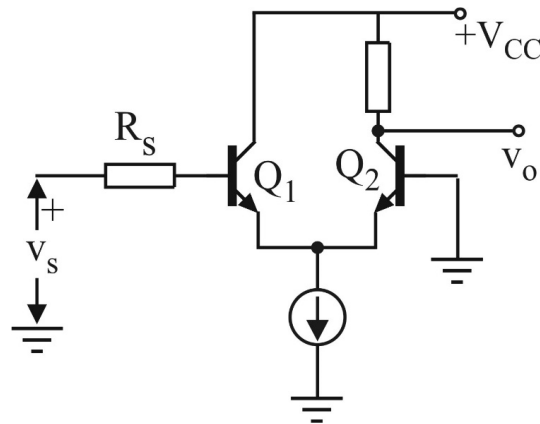


# Širokopolasni pojačavači

## Direktna sprema stepena sa zajedničkim kolektorom i stepena sa zajedničkom bazom

Ovo kolo predstavlja poseban slučaj diferencijalnog pojačavača sa asimetričnim ulazom. Uloga prvog pojačavačkog stepena, koji je u sprezi sa zajedničkim kolektorom je da minimizira ulaznu kapacitivnost i obezbedi strujno pojačanje. Drugi pojačavački stepen koji je u sprezi sa zajedničkom bazom konvertuje strujno pojačanje u naponsko pojačanje.

Nedostatak ovog kola je da je pojačanje pozitivno što otežava uvođenje negativne povratne sprege. Dobre odlike ovog kola su velika vrednost granične frekvencije i stabilnost jednosmernih struja zahvaljujući simetričnosti kola.



# Širokopojasni pojačavači

## Hibridni $\pi$ model bipolarnog tranzistora

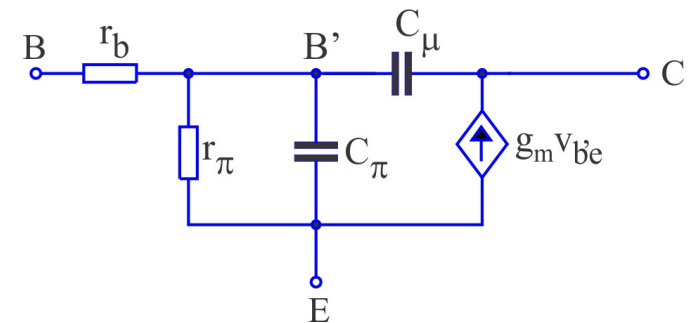
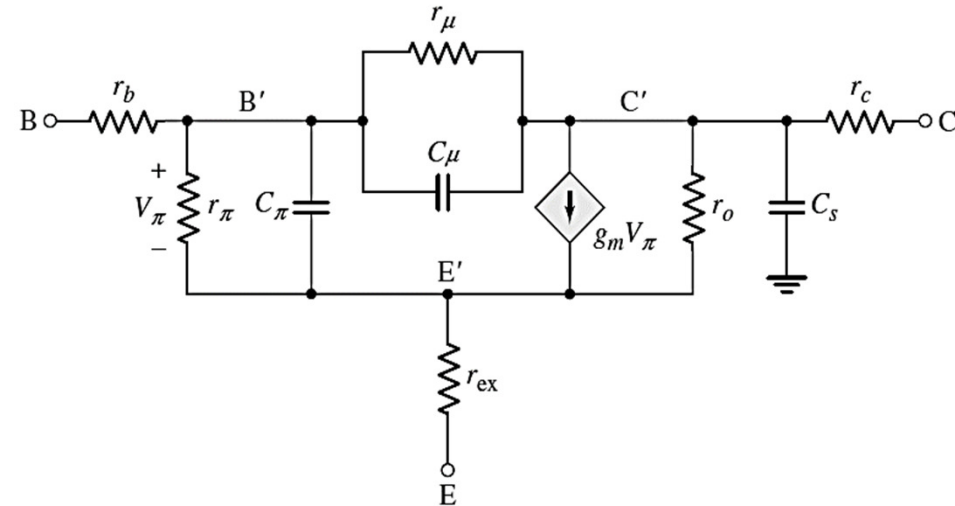
$C_\pi$  je difuziona kapacitivnost direktno polarisanog emitorskog pn spoja. Nastaje kao posledica variranja koncentracije manjinskih nosilaca naelektrisanja u području baze prilikom promene napona na emitorskom pn spoju. Kapacitivnost  $C_\pi$  je reda stotinak pF i linearno je srazmerna struji kolektora.

$C_\mu$  predstavlja kapacitivnost prostornog naelektrisanja inverzno polarisanog kolektorskog pn spoja. Vrednost ove kapacitivnosti kreće se od 2 pF do 10 pF. Ova kapacitivnos zavisi od napona inverzne polarizacije  $V_{CB}$ .

$r_b$  je **otpornost tela baze**, koja modelira otpornost od sponjeg terminala baze do aktivne oblasti baze. Posledica je male koncentracije nosilaca u bazi. Ovaj parametar se često zanemaruje ali dolazi do izražaja na visokim frekvencijama. Vrednost  $r_b$  kreće se od nekoliko oma do 100  $\Omega$ .

$g_m$  je transkonduktansa. Red veličine ovog parametra je desetak mS.

$r_\pi$  je **ulazna dinamička otpornost**. Red veličine k $\Omega$ .



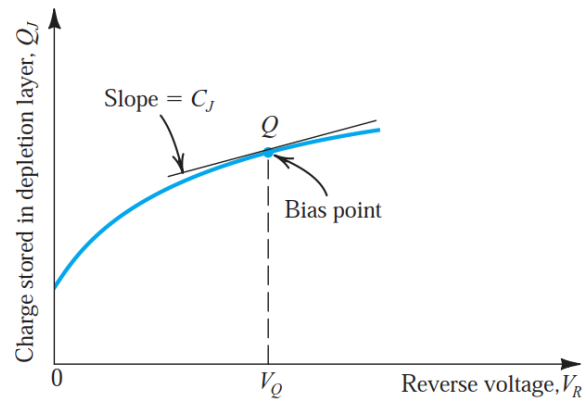
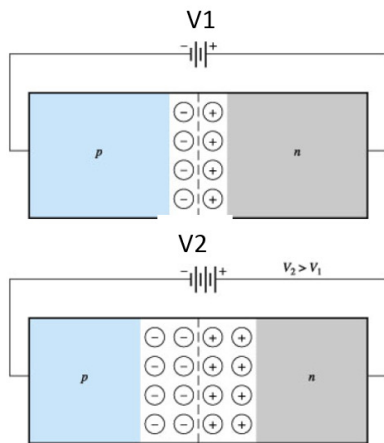
*Pojednostavljeni hibridni  $\pi$  model*

# Širokopolasni pojačavači

**Kapacitivnost prostornog naelektrisanja** je posledica promene širine prelazne oblasti pod dejstvom napona na diodi. Ova kapacitivnost dolazi do izražaja pri inverznoj polarizaciji diode i inverzno je proporcionalna korenu napona.

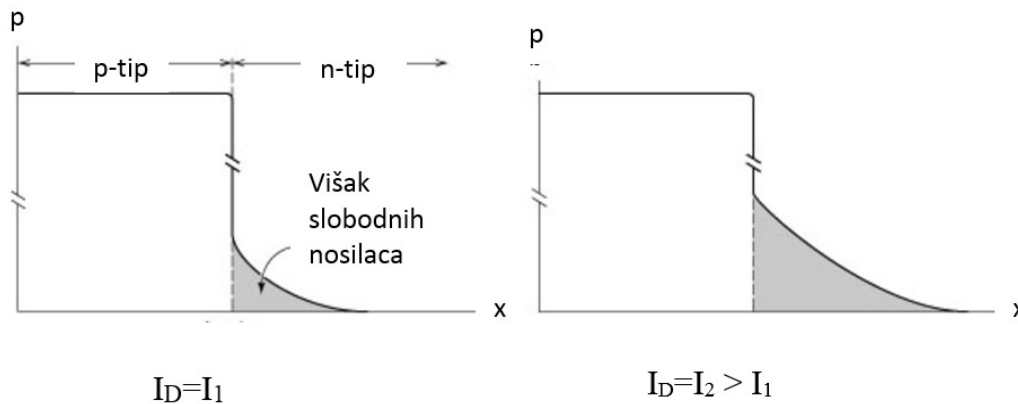
$$C = \frac{dQ_T}{dV} \qquad C_T = \frac{C_{T0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}$$

$C_{T0}$  je kapacitivnost prostornog naelektrisanja kada dioda nije polarisana,  $V_R$  je spoljašni napon inverzne polarizacije,  $V_0$  je potencijalna barijera.



# Širokopojasni pojačavači

**Difuziona kapacitivnost** je posledica akumuliranja nosilaca naelektrisanja u okolini prelazne oblasti prilikom direktne polarizacije diode. Da bi se stvorio višak slobodnih nosilaca naelektrisanja potrebno je određeno vreme zbog konačnog vremena prostiranja nosilaca naelektrisanja. Sama pojava je ekvivalentna pojavi punjenja i pražnjenja kondenzatora. Difuziona kapacitivnost dolazi do izražaja pri direktnoj polarizaciji pn spoja. Vrednost ove kapacitivnosti je direktno srazmerna struji koja teče kroz pn spoj  $I_D$ , kod tranzistora je to struja emitora ( $\tau$  u jednačini je vreme preleta).



$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{\tau \cdot I_D}{V_T} = \frac{\tau}{r_d}$$

# Širokopolasni pojačavači

## Hibridni pi model bipolarnog tranzistora

Vrednosti transkonduktanse  $g_m$ , ulazne dinamičke otpornosti,  $r_\pi$ , kao i izlazne dinamičke otpornosti,  $r_o$ , mogu se odrediti iz radne tačke tranzistora, odnosno iz jendosmernih struja i napona.

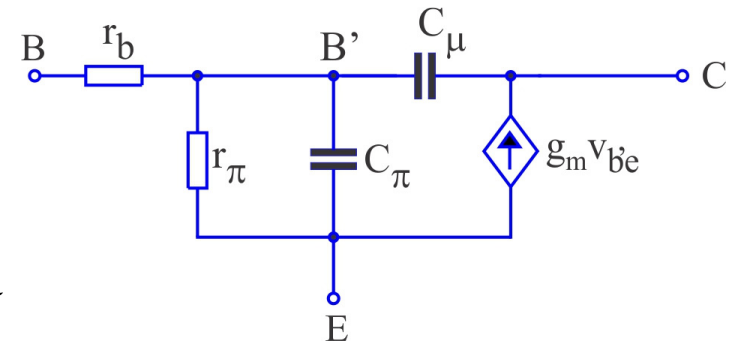
Transkonduktansa je parcijalni izvod struje kolektora po naponu baza emitor. Polazeći od izraza za velike signale dobija se zavisnost transkonduktanse od radne tačke.

$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial v_{BE}}$$

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

$$g_m = \frac{\alpha_o}{r_e}$$

$r_e$  je dinamička otpornost emitorskog pn spoja,  $\alpha_o$  koeficijent strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom.



Ulazna dinamička otpornost,  $r_\pi$ , predstavlja parcijalni izvod napona između baze i emitora po struji baze.

$$r_\pi = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}$$

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

# Širokopolasni pojačavači

## Frekvencijska zavisnost strujnog pojačanja sa kratkospojenim izlazom

$$v_{be} = i_i \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_\pi} + s \cdot (C_\pi + C_\mu)}$$
$$i_o = g_m \cdot v_{be}$$

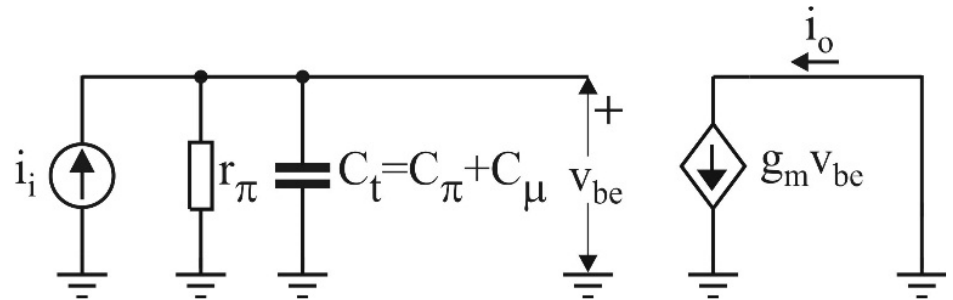
$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{v_o = 0} = \frac{g_m \cdot r_\pi}{1 + s \cdot (C_\pi + C_\mu) \cdot r_\pi}$$

$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{v_o = 0} = \frac{\beta_0}{1 + \frac{s}{\omega_\beta}}$$

$$\omega_\beta = \frac{1}{(C_\pi + C_\mu) \cdot r_\pi} \approx \frac{1}{C_\pi \cdot r_\pi}$$

$\omega_\beta$  je granična frekvencija strujnog pojanja.

$$\beta_0 = g_m \cdot r_\pi \quad \beta_0 \text{ je jednosmerno strujno pojačanje}$$



# Širokopojasni pojačavači

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \Big|_{v_o = 0} = \frac{\beta_0}{1 + \frac{s}{\omega_\beta}}$$

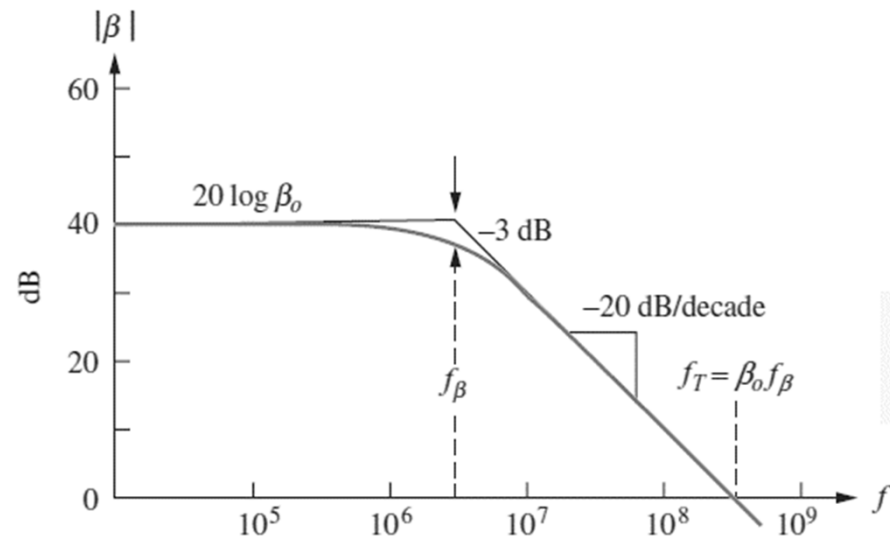
$$\beta(s) = \frac{\beta_0}{1 + \frac{s}{\omega_\beta}}$$

$$\beta(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\beta}}$$

$$|\beta(j\omega)| \approx \frac{\beta_0 \omega_\beta}{\omega}$$

$$|\beta(j\omega_t)| = 1$$

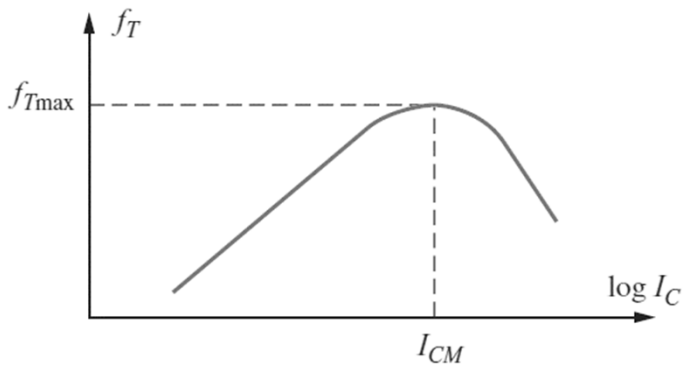
$$\omega_t = \beta_0 \omega_\beta = \frac{\beta_0}{r_\pi \cdot (C_\pi + C_\mu)}$$



$f_t$  je **jedinična frekvencija tranzistora**. Na ovoj frekvenciji pojačanje tranzistora je jednako jedinici što praktično znači da tranzistor na frekvencijama većim od  $f_t$  ne obavlja funkciju pojačanja jer mu je strujno pojačanje manje od 1.

Za frekvencije koje su veće od granične frekvencije  $\omega_\beta$  strujno pojačanje opada sa nagibom  $-20$  dB/dec. Granična frekvencija  $f_\beta$  je reda MHz, a frekvencija  $f_t$  reda stotinak megaherca.

# Širokopojasni pojačavači



$$\omega_t = \beta_0 \omega_\beta = \frac{\beta_0}{r_\pi \cdot C_\pi}$$

**Jedinična frekvencija tranzistora  $f_t$**  se navodi u kataloškim podacima jer jedno od svojstava tranzistora kao poluprovodničke komponente. Izraz za jediničnu frekvenciju može da posluži da se odrede parazitne kapacitivnosti  $C_\pi$  i  $C_\mu$ , jer strujno pojačanje  $\beta$  jedan od kataloških podataka, dok se  $r_p$  može odrediti iz radne tačke tranzistora.

Jedinična frekvencija zavisi od radne tačke, jer se sa promenom radne tačke menja i vrednost strujnog pojačanja  $\beta$ . Pri malim i pri velikim vrednostima jednosmerne struje kolektora strujno pojačanje se smanjuje, a samim tim i  $\omega_t$ .

Hibridni pi model tranzistora na korektan način prikazuje ponašanje tranzistora do frekvencija koje su oko  $0.3 f_t$ .



# Širokopojasni pojačavači

## Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkim emitorom

Prilikom analize kola, kapacitivnost  $C_\mu$  koja povezuje bazu i kolektor, se primenom Milerove teoreme preslikava u dve kapacitivnosti, jednu paralelno ulaznom pristupu a drugu paralelnu izlaznom pristupu. Kolo sadrži dva RC kola, jedno na ulaznom pristupu i drugo na izlaznom pristupu. S obzirom da se je vremenska konstanta RC kola na ulazu znatno veća i da formira dominantan pol, prilikom određivanja granične frekvencije zanemaruje se kapacitivnost koja postoji na izlaznom pristupu.

Na ulaznom pristupu  $C_\mu$  se preslikava u:

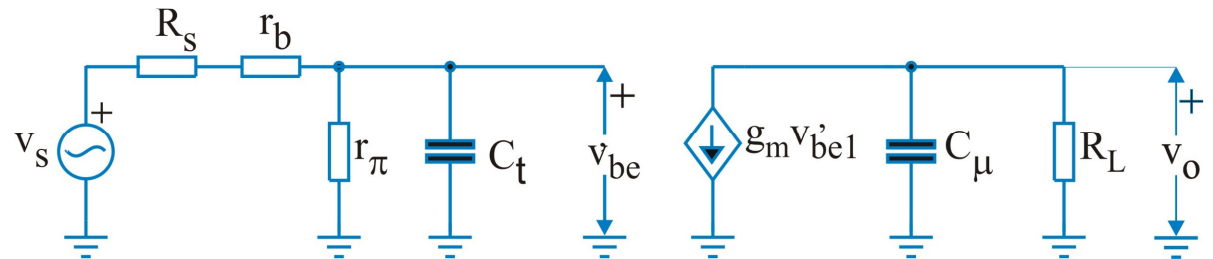
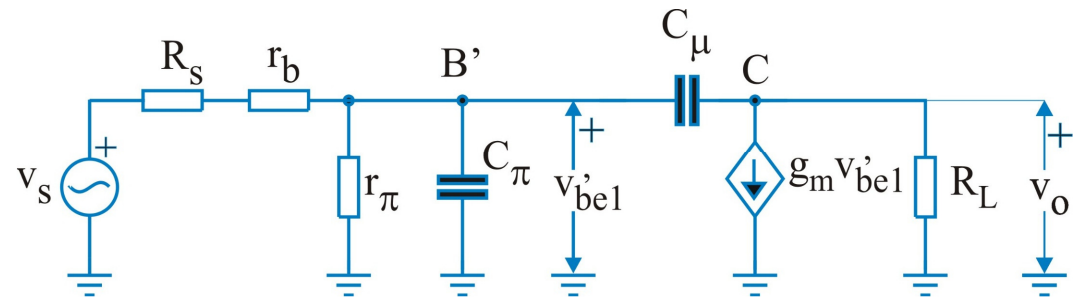
$$(1 - A) \cdot C_\mu = (1 + g_m \cdot R_L) \cdot C_\mu$$

Na izlaznom pristupu  $C_\mu$  se preslikava u:

$$\frac{A - 1}{A} \cdot C_\mu \approx C_\mu \quad A = \frac{v_o}{v'_b} = -g_m \cdot R_L$$

Paralelna veza dve kapacitivnosti na ulazu je označena sa  $C_t$ .

$$C_t = C_\pi + (1 + g_m \cdot R_L) \cdot C_\mu$$



# Širokopojasni pojačavači

## Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkim emitorom

Kolo sadrži dva RC kola, jedno na ulaznom pristupu i drugo na izlaznom pristupu. S obzirom da se je vremenska konstanta RC kola na ulazu znatno veća i da formira dominantan pol, prilikom određivanja granične frekvencije zanemaruje se kapacitivnost koja postoji na izlaznom pristupu.

$$\frac{v'_b - v_i}{R_S + r_b} + v'_b \cdot \left( \frac{1}{r_\pi} + s \cdot C_t \right) = 0$$

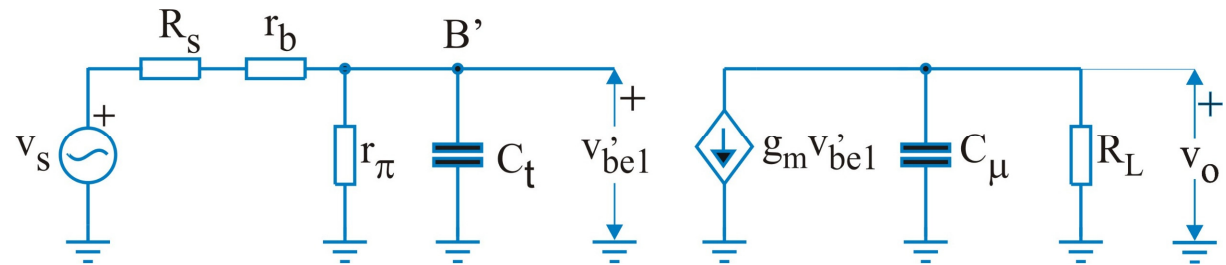
$$v_o = -g_m \cdot v'_b \cdot R_L$$

$$A(s) = \frac{v_o}{v_i} = A_o \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{p1}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{p2}}}$$

$$\omega_{p1} \ll \omega_{p2} \quad A(s) \approx A_o \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{p1}}}$$

$$A_o = -g_m \cdot R_L \cdot \frac{r_\pi}{r_\pi + R_S + r_b}$$

$$\omega_{3dB} = \omega_{p1} = \frac{1}{C_t \cdot (R_S + r_b) \parallel r_\pi}$$



$$C_t = C_\pi + (1 + g_m \cdot R_L) \cdot C_\mu$$

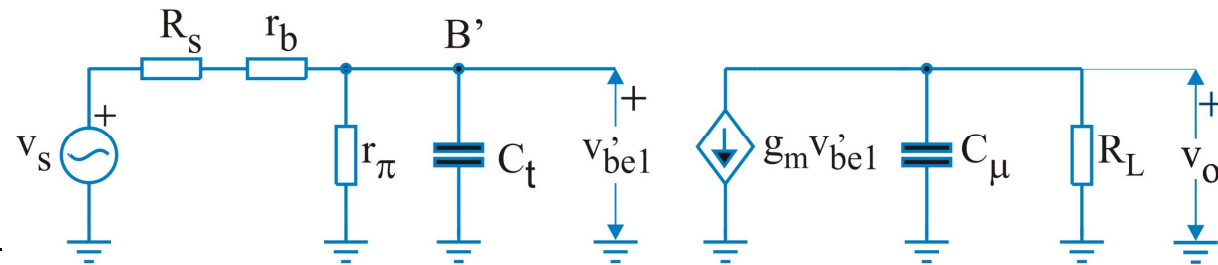
# Širokopojasni pojačavači

## Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkim emitorom

$$\omega_p = \frac{1}{C_t \cdot (R_s + r_b) \parallel r_\pi}$$

$$C_t = C_\pi + (1 + g_m \cdot R_L) \cdot C_\mu$$

$$\omega_p = \left( \frac{1}{R_s + r_b} + \frac{1}{r_\pi} \right) \cdot \frac{1}{C_\pi + (1 + g_m \cdot R_L) \cdot C_\mu}$$



Propusni opseg  $\omega_p$  je inverzno proporcionalan vrednosti svih parametara za male signale  $C_\pi$ ,  $C_\mu$ ,  $r_\pi$ ,  $g_m$ ,  $r_b$ . Pored toga granična frekvencija je inverzno proporcionalna otpornosti potrošača  $R_L$  i unutrašnjoj otpornosti izvora signala  $R_s$ .

Granična frekvencija pri strujnoj pobudi  $R_s \rightarrow \infty$   $\omega_p = \frac{1}{C_t \cdot r_\pi}$

Granična frekvencija pri naponskoj pobudi  $R_s = 0$   $\omega_p = \frac{1}{C_t \cdot r_b}$   $r_b \ll r_\pi$

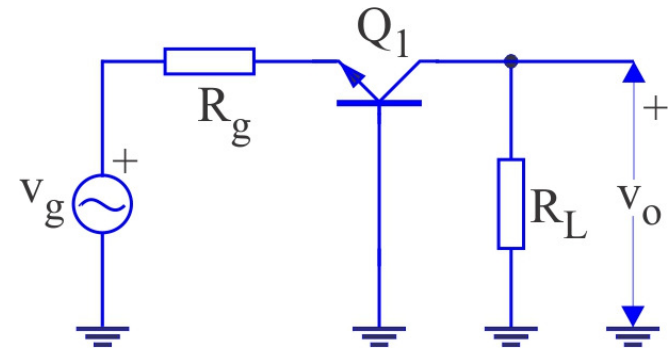
Granična frekvencija naponskog pojačanja značajno zavisi od unutrašnje impedanse pobudnog generatora,  $R_s$ . Najveća vrednost granične frekvencije je pri strujnoj pobudi a najmanja pri naponskoj pobudi.

# Širokopojasni pojačavači

## Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom

Glavne osobine sprege sa zajedničkom bazom su velika ulazna otpornost, mala izlazna otpornost, strujno pojačanje približno jednako jedinici.

Kapacitivnost prostornog naelektrisanja kolektorskog pn spoja,  $C_{\mu}$ , je u paraleli sa potrošačem  $R_L$ . Ukoliko je otpornost potrošača  $R_L$  nije suviše velika dobija se veoma širok propusni opseg pojačavača.

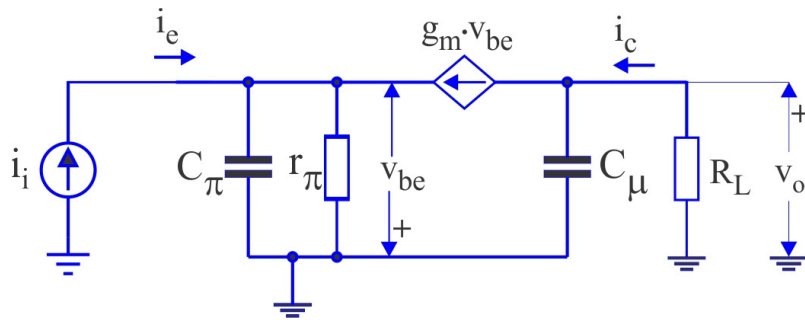


# Širokopojasni pojačavači

## Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom

$$i_c = g_m \cdot v_{be}$$

$$i_e = -v_{be} \cdot \left( s \cdot C_\pi + \frac{1}{r_\pi} + g_m \right)$$



$$\frac{i_c}{i_e} = \frac{g_m}{s \cdot C_\pi + \frac{1}{r_\pi} + g_m} = \frac{g_m \cdot r_\pi}{s \cdot C_\pi \cdot r_\pi + 1 + g_m \cdot r_\pi}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{g_m \cdot r_\pi}{1 + g_m \cdot r_\pi}$$

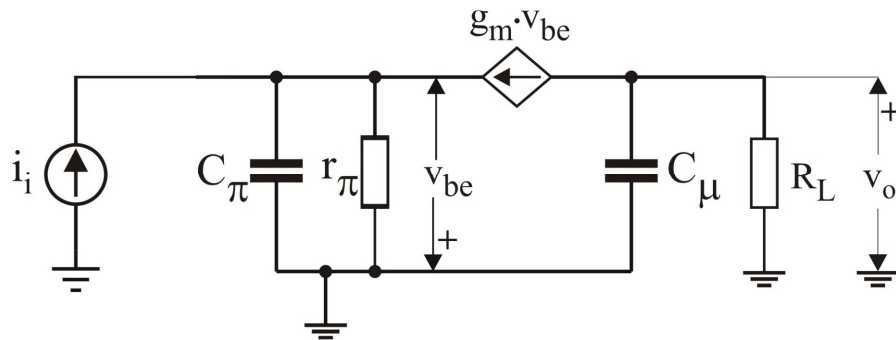
$$A_i = \frac{i_c}{i_e} = \frac{\alpha}{1 + s \cdot C_\pi \cdot \frac{r_\pi}{1 + \beta}}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1 + \beta}{C_\pi \cdot r_\pi}$$

Pol **strujnog pojačanja** je na veoma visokoj frekvenciji.  $\alpha$  je koeficijent strujnog pojačanja za spregu sa zajedničkom bazom, koji iznosi približno 1. Zaključak je da ukoliko se kolo ne analizira na ekstremno visokim frekvencijama možemo da smatramo su struja kolektora i struja emitora jednake.

# Širokopolasni pojačavači

## Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom

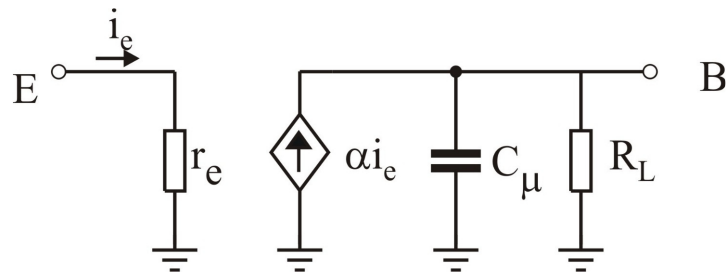


$$i_c \approx i_e$$

$$v_o = -i_c \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_L} + s \cdot C_\mu}$$

$$A = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{R_L}{r_e} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_\mu \cdot R_L}$$

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{C_\mu \cdot R_L}$$



Ulazna vremenska konstanta je veoma mala i može se zanemariti. Granična frekvencija je određena izlaznom vremenskom konstantom  $\tau_2$ . Ukoliko je otpornost potrošača mala kolo će imati veoma visoku graničnu frekvenciju.

Kada se zanemari uticaj ulazne vremenske konstante na frekvencijsku karakteristiku dobija se pojednostavljena ekvivalentna šema za pojačavač u sprezi sa zajedničkom bazom (donja slika).

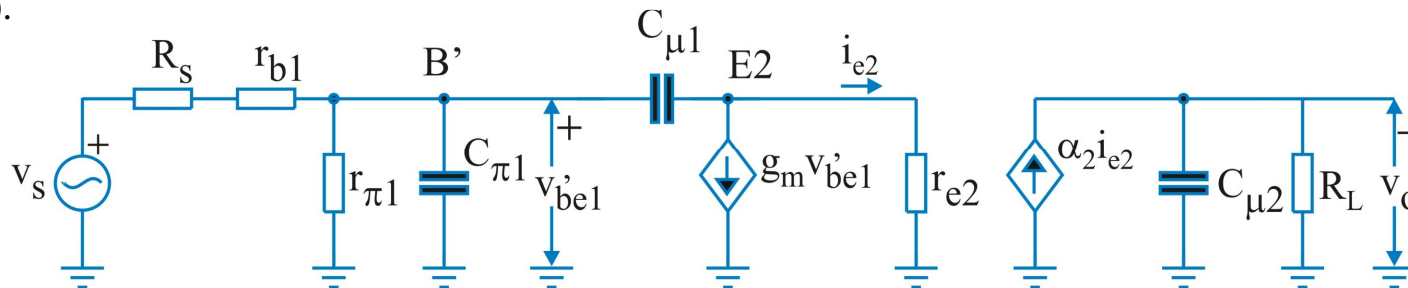
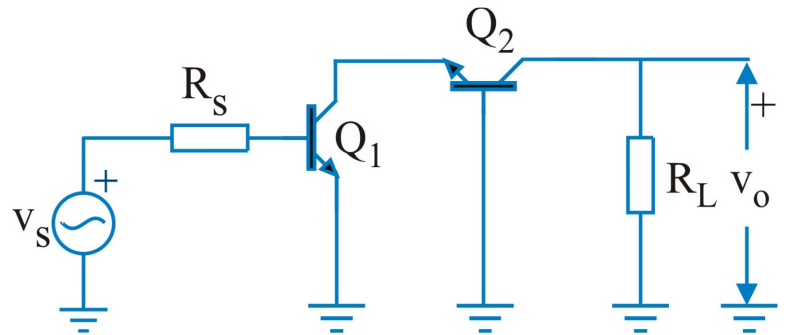
# Širokopolasni pojačavači

## Kaskodni pojačavač

Kaskodni pojačavač se sastoji od dva direktno spregnuta pojačavačka stepena, od kojih je prvi (Q1) **u sprezi sa zajedničkim emitorom** i drugi **u sprezi sa zajedničkom bazom** (Q2).

Opterećenje prvog stepena je ulazna otpornost pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom čija je vrednost vrlo mala. Kao posledica toga naponsko pojačanje prvog stepena biće veoma malo, dok će pojačanje struje biti povećano.

Drugi pojačavački stepen ima ulogu strujnog bafera, to praktično znači da može da se modelira kao strujni generator kontrolisan strujom (ulazna otpornost vrlo mala –idealno nula, izlazna otpornost vrlo velika –idealno beskonačna).



# Širokopolasni pojačavači

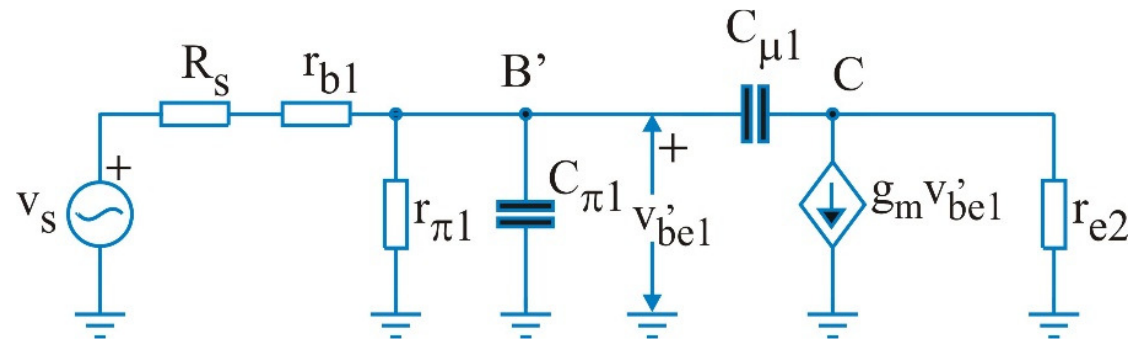
## Kaskodni pojačavač

Da bi primenili Milerovu teoremu potrebno je odrediti odnos jednosmernih napona ili niskofrekvencijskih napona na krajevima kapacitivnosti  $C_{\mu 1}$ .

$$\frac{v_{ce}}{v'_{be}} = -g_{m1} \cdot r_{e2}$$
$$g_{m1} = \frac{\alpha_1}{r_{e1}}$$
$$\underline{I_{E1} \approx I_{E2} \Rightarrow r_{e1} = r_{e2}}$$

$$K = \frac{v_{ce}}{v'_{be}} = -\alpha_1 \approx -1$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E}$$
$$g_m = \frac{\alpha}{r_e}$$



Kada se primeni Milerova teorema, kapacitvost prostornog naelektrisanja kolektorskog spoja tranzistora Q1,  $C_{\mu 1}$ , preslikava se na ulazu i izlazu prvog stepena u kapacitvost duplo veće vrednosti.

$$C_{be1} = C_{\mu 1} \cdot \frac{K - 1}{K} = 2 \cdot C_{\mu 1}$$

$$C_{ce1} = C_{\mu 1} \cdot (1 - K) = 2 \cdot C_{\mu 1}$$



# Širokopolasni pojačavači

## Kaskodni pojačavač

$$\frac{v'_{be1}}{v_s} = \frac{r_{\pi 1}}{r_{\pi 1} + r_{b1} + R_S} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot (C_{\pi 1} + 2 \cdot C_{\mu 1}) \cdot (R_S + r_{b1}) \parallel r_{\pi}}$$

$$\frac{v_{e2}}{v'_{be1}} = -g_{m1} \cdot r_{e2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot 2 \cdot C_{\mu 1} \cdot r_{e2}} \approx \frac{-\alpha}{1 + s \cdot 2 \cdot C_{\mu 1} \cdot r_{e2}}$$

$$\frac{v_{e2}}{v_s} = \frac{v_{e2}}{v'_{be1}} \cdot \frac{v'_{be1}}{v_{in}} = A_{o1} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_1} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_2} \approx A_{o1} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_1}$$

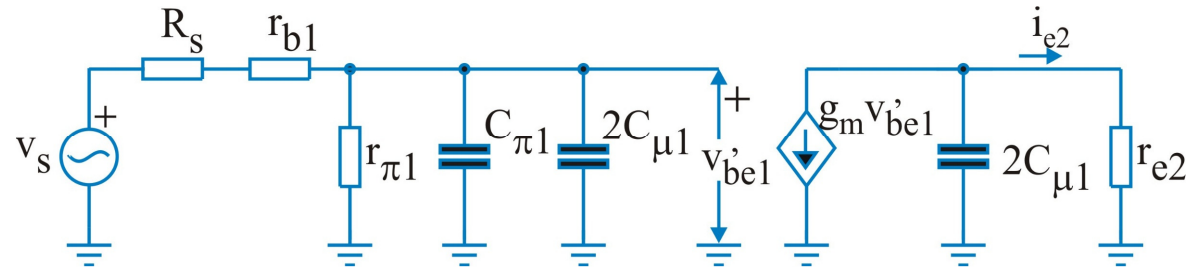
$$\tau_1 \gg \tau_2 \quad A_{o1} = -\frac{\alpha \cdot r_{\pi 1}}{r_{\pi 1} + r_{b1} + R_S}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{(C_{\pi 1} + 2 \cdot C_{\mu 1}) \cdot (R_S + r_b) \parallel r_{\pi}}$$

$$C_{\pi 1} \gg C_{\mu 1} \Rightarrow \omega_{p1} \approx \frac{1}{C_{\pi 1} \cdot (R_S + r_b) \parallel r_{\pi}}$$

$\omega_{p1}$  odgovara izrazu za graničnu frekvenciju pojačavača u sprezi sa zajedničkim emitorom kada je otpornost potrošača jednaka  $r_e$ .

Zahvaljujući jediničnom pojačanju prvog stepena smanjen je uticaj Milerove kapacitivnosti  $C_{\mu}$  na ulaznu vremensku konstantu. Granična frekvencija, koja je jednaka recipročnoj vrednosti ove vremenske konstante je znatno veća u odnosu na jednostepeni pojačavač sa zajedničkim emitorom.



# Širokopojasni pojačavači

## Kaskodni pojačavač

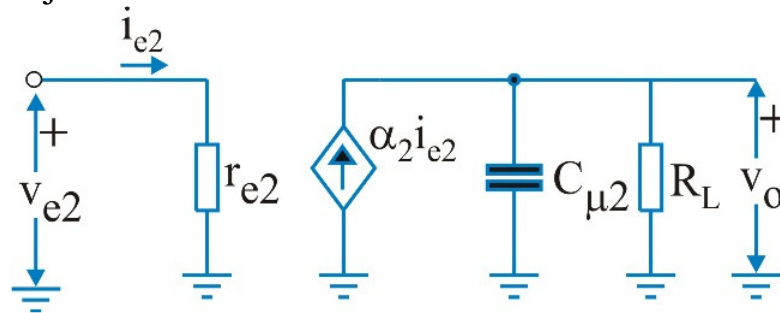
Naponsko pojačanje drugog stepena koji je u sprezi sa zajedničkom bazom:

$$\frac{v_o}{v_{e2}} = -\alpha_2 \cdot i_e \cdot \left( R_L \parallel \frac{1}{s \cdot C_{\mu 2}} \right)$$

$$\frac{v_o}{v_{e2}} = -\frac{\alpha_2 \cdot R_L}{r_{e2}} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_{\mu 2} \cdot R_L}$$

$$\frac{v_o}{v_{e2}} = A_{o2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_3}$$

$$\omega_{p3} = \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{C_{\mu 2} \cdot R_L}$$



Ovo je izraz za graničnu frekvenciju sprege sa zajedničkom bazom.

# Širokopolasni pojačavači

## Kaskodni pojačavač

Ukupno naponsko pojačanje kaskodnog pojačavača:

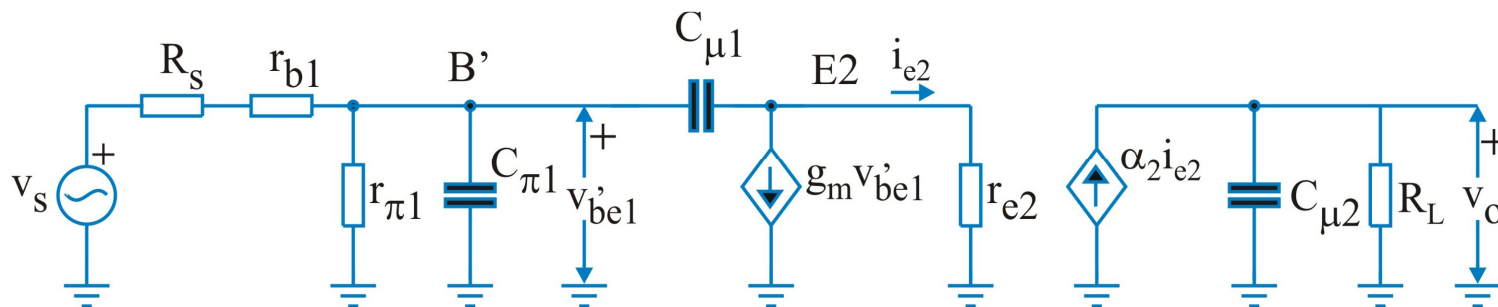
$$\frac{v_o}{v_{in}} = A_{o1} \cdot A_{o2} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_1} \cdot \frac{1}{1 + s \cdot \tau_3}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{(C_{\pi1} + 2 \cdot C_{\mu1}) \cdot (R_S + r_b) || r_{\pi}}$$

$$\omega_{p3} = \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{C_{\mu2} \cdot R_L}$$

Vremenska konstanta na mestu spoja prvog i drugog pojačavačkog stepena  $\tau_2$  nema uticaj na graničnu frekvenciju jer ima vrlo malu vrednost (visoka vrednost frekvencije pola  $\omega_{p2}$ ).

Granična frekvencija kaskodnog pojačavača određena je ulaznom ili izlaznom vremenskom konstantom i to onom koja ima veću vrednost (veća vrednost vremenske konstante znači manju vrednost frekvencije pola). Vrednost ovih vremenskih konstanti zavise od unutrašnje otpornosti pobudnog generatora  $R_S$  i od otpornosti potrošača  $R_L$ .



# Širokopolasni pojačavači

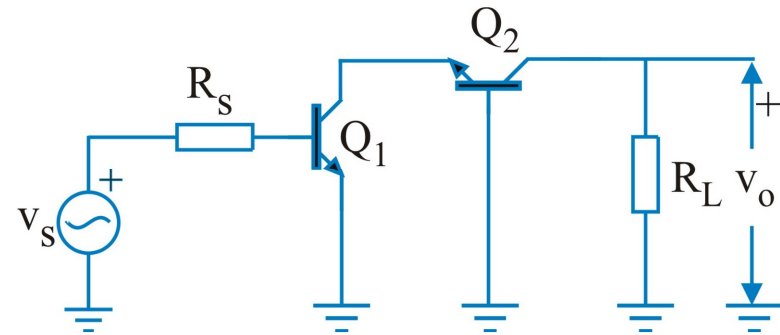
## Kaskodni pojačavač

Prvi pojačavački stepen ima vrednost pojačanja blisku 1. Ovako mala vrednost pojačanja posledica je male vrednosti ulazne impedanse pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom. Zahvaljujući maloj vrednosti pojačanja mala je vrednost Milerove kapacitivnosti. Sa umanjem ulazne kapacitivnosti smanjuje se vremenska konstanta na ulaznom pristupu, koja inače ima najveću vrednost kod sprege sa zajedničkim emitorom.

$$\omega_{p1} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{(C_{\pi1} + 2 \cdot C_{\mu1}) \cdot (R_S + r_b) || r_{\pi}}$$

$$\omega_{p3} = \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{C_{\mu2} \cdot R_L}$$

Granična frekvencija kaskodnog pojačavača biće jedna od ove dve frekvencije i to ona koja ima manju vrednost. Vrednosti ovih frekvencija zavise od unutrašnje otpornosti pobudnog generatora  $R_S$  i od otpornosti potrošača  $R_L$ .

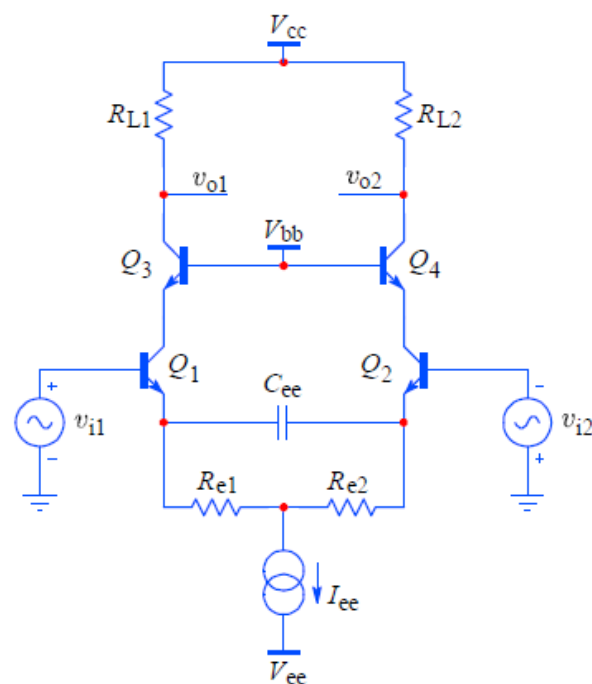


# Širokopolasni pojačavači

## Diferencijalni kaskodni pojačavač

Pri diferencijalnoj pobudi analiza ovog kola ne razlikuje se od analize kaskodnog pojačavača jer čvorovi na osi simetrije predstavljaju virtuelne mase. Ovo proizilazi iz bisekcionog teorema.

Prednost diferencijalnog pojačavača je stabilnost jednosmernih struja. Usled simetrije kola sve promene jednosmernih struja se anuliraju.



# Širokopojasni pojačavači

## Širokopojasni pojačavači

### Osnovna pitanja

1. Pojam širokopojasnih pojačavača (prvi slajd).
2. Uticaj paralelne kapacitivnosti na ulazu i na izlazu pojačavača
3. Pojednostavljeni hibridni pi model bipolarnog tranzistora.

### Ostala pitanja

4. Milerova kapacitivnost.
5. Jedinična frekvencija tranzistora,  $f_t$ .
6. Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkim emitorom.
7. Frekvencijska analiza pojačavača u sprezi sa zajedničkom bazom.
8. Analiza prvog stepena kaskodnog pojačavača.
9. Analiza drugog stepena kaskodnog pojačavača i frekvencijska zavisnost za ceo kaskodni pojačavač.
10. Direktna sprega stepena sa zajedničkim kolektorom i stepena sa zajedničkim emitorom.
11. Direktna sprega stepena sa zajedničkim kolektorom i stepena sa zajedničkom bazom.