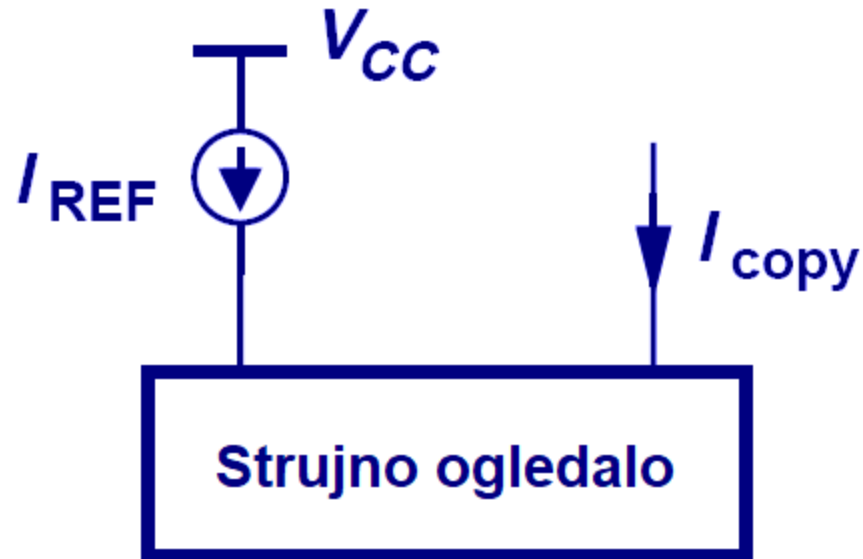


Analogna i digitalna elektronika

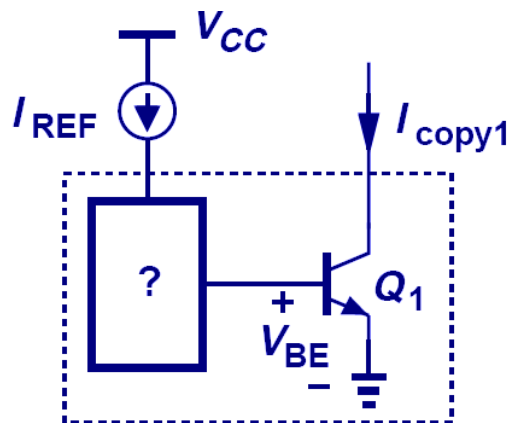
- **Strujna ogledala**
- **Diferencijalni pojačavač**

Koncept strujnog ogledala

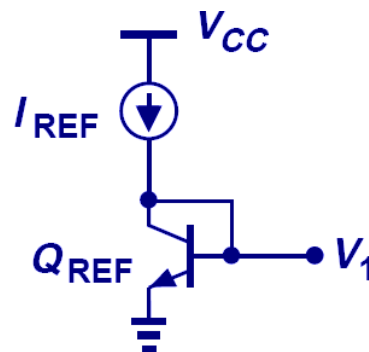


- Svrha strujnog ogledala je da duplira struju strujnog izvora na druge lokacije.

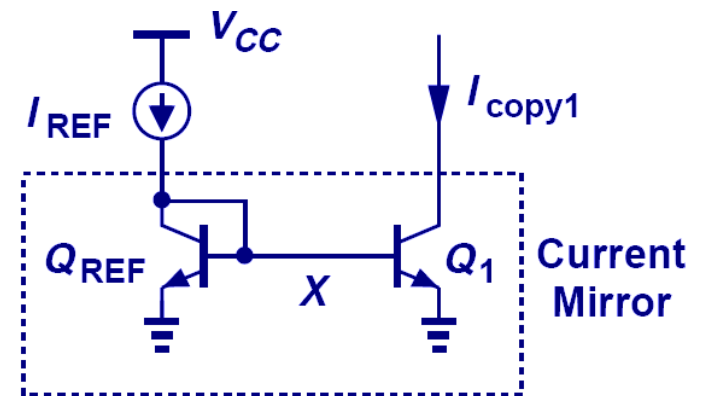
Strujno ogledalo sa BJT



(a)



(b)

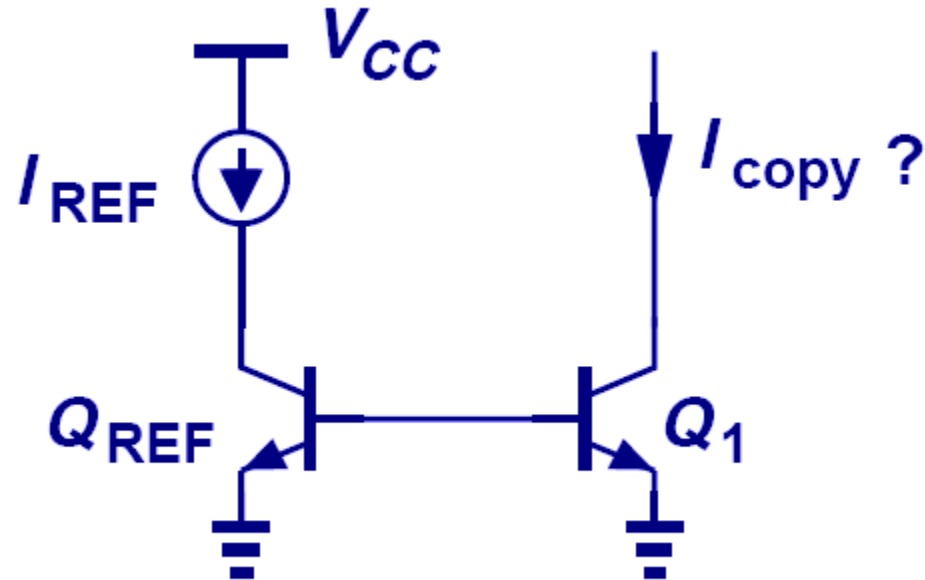


(c)

$$I_{copy1} = \frac{I_{S1}}{I_{S,REF}} I_{REF}$$

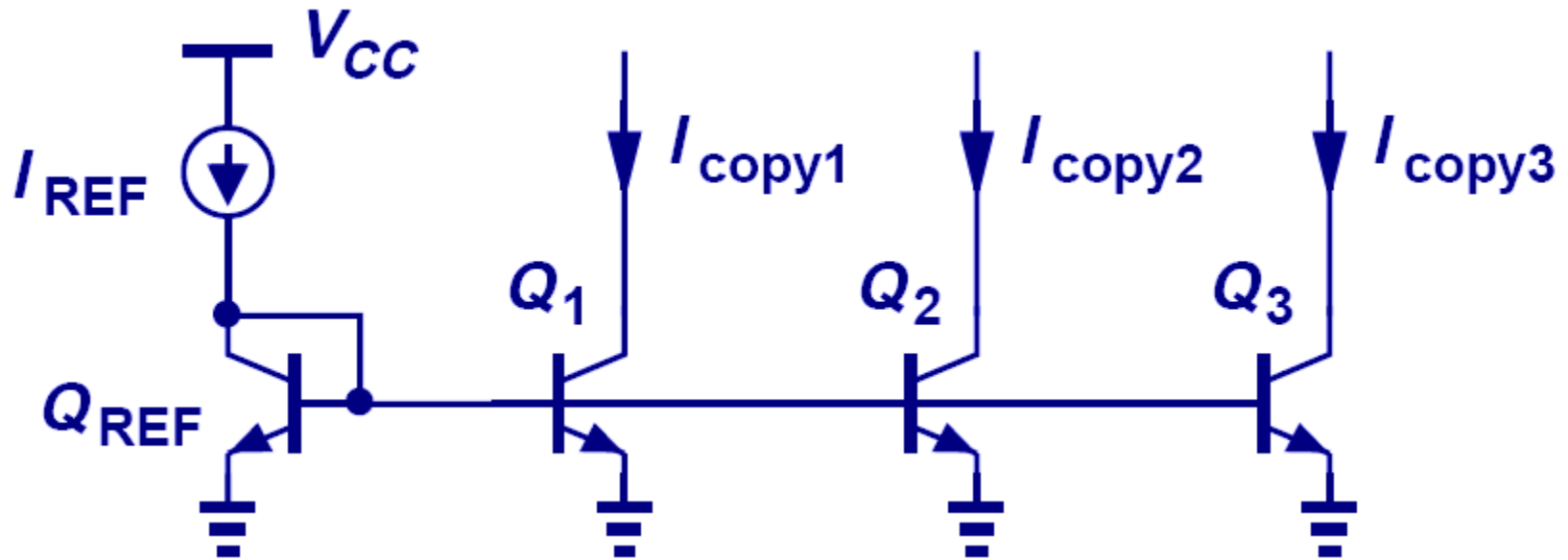
- Diodno povezan Q_{REF} stvara napon V_1 koji čini da bude $I_{copy1} = I_{REF}$, ako je $Q_1 \equiv Q_{REF}$.

Loše strujno ogledalo: Primjer 1



- Bez spajanja kolektora i baze tranzistora Q_{REF} , neće postojati bazne struje, usljed toga I_{copy} je nula.

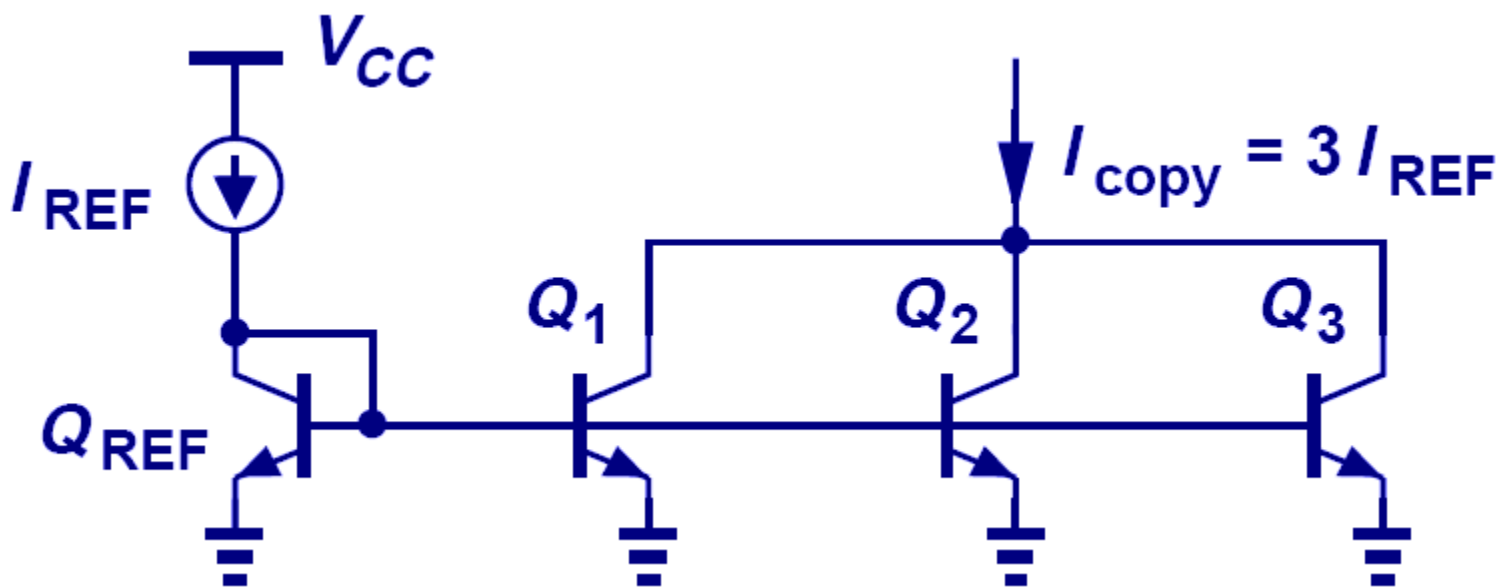
Više kopija od I_{REF}



$$I_{copy,j} = \frac{I_{S,j}}{I_{S,REF}} I_{REF}$$

- Više kopija I_{REF} se može generisati na različitim lokacijama jednostavno upotrebom više tranzistora.

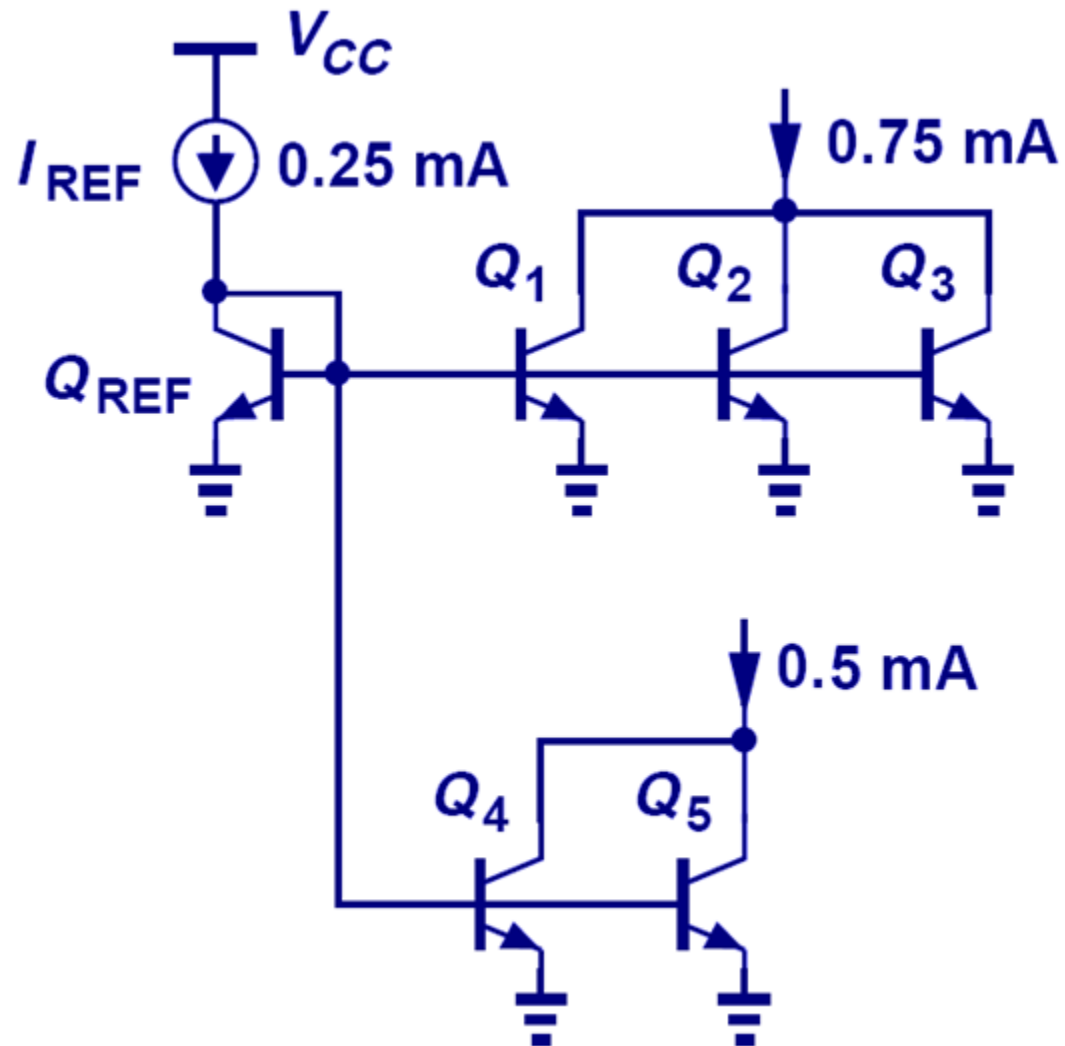
Skaliranje struje



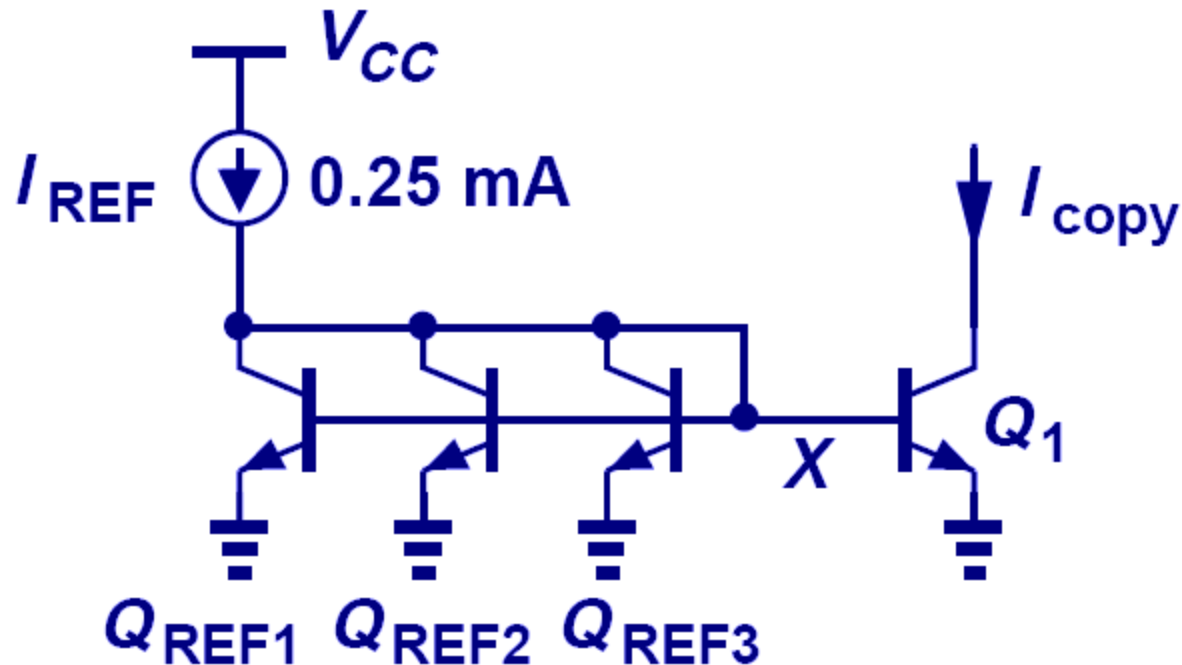
$$I_{copy,j} = n I_{REF}$$

- Skaliranjem emitorske oblasti Q_j n puta emitorska oblast Q_{REF} , $I_{copy,j}$ je takođe n puta veće od I_{REF} . Ovo je ekvivalentno postavljanju n tranzistora, identičnih Q_{REF} , u paralelu

Primjer: Skalirane struje



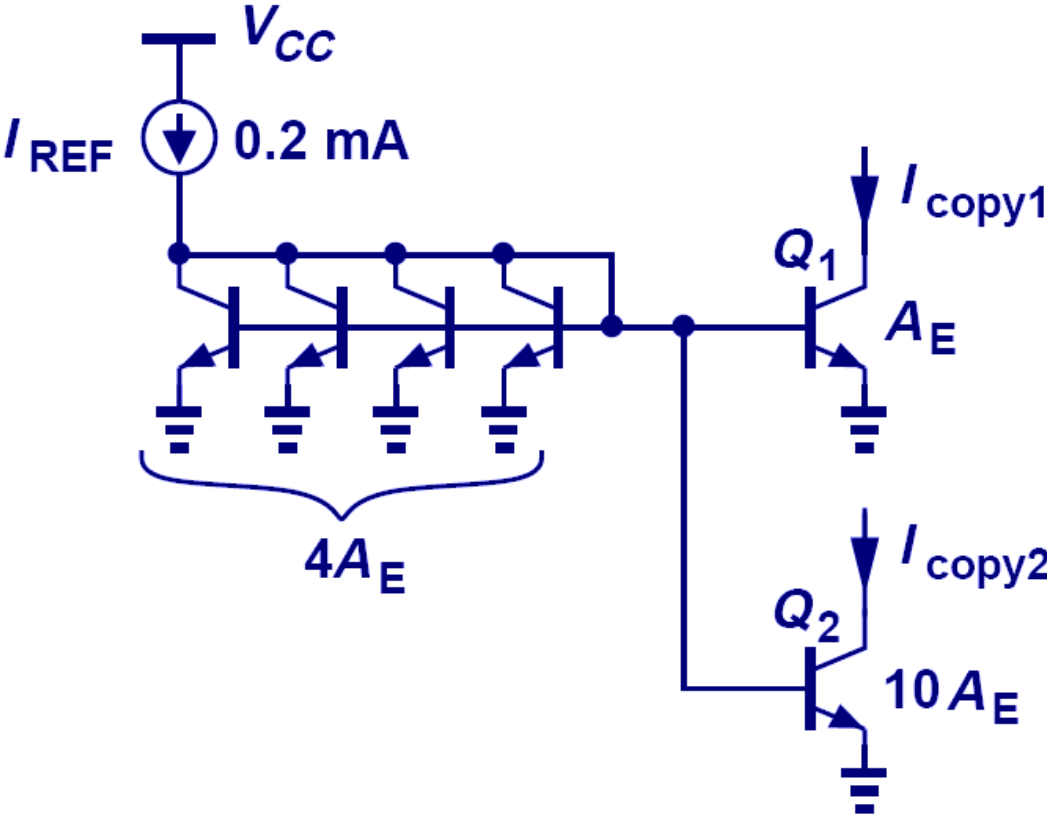
Frakciono skaliranje



$$I_{copy} = \frac{1}{3} I_{REF}$$

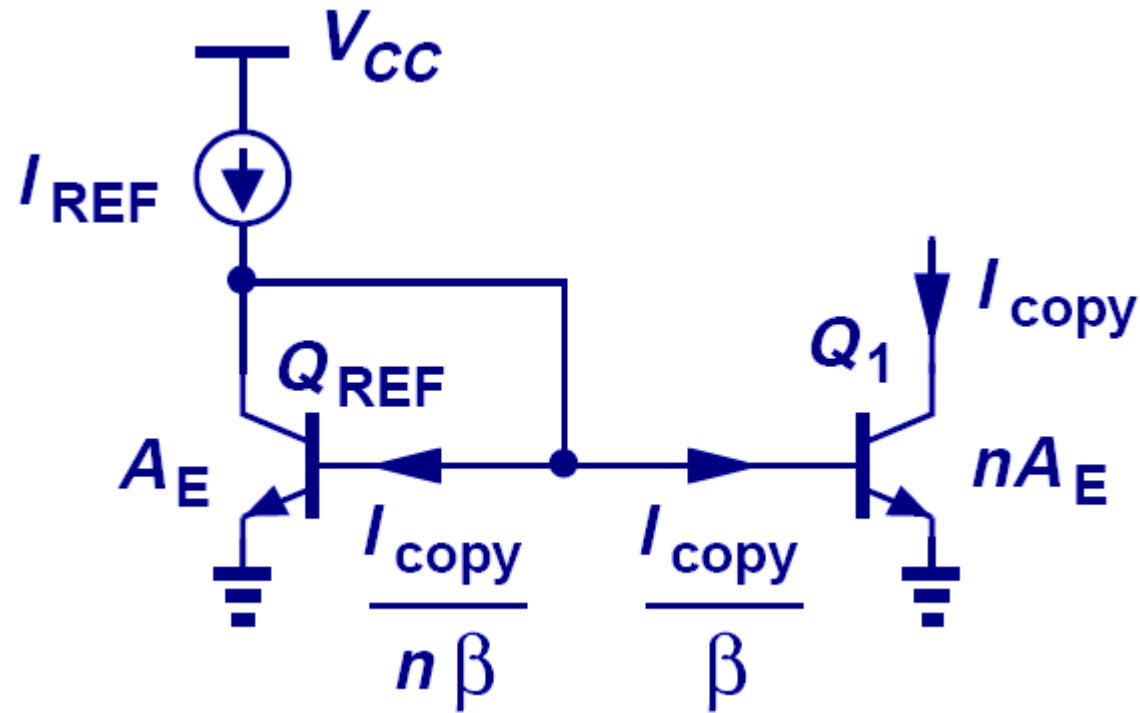
- Skaliranjem emitorske oblasti od Q_{REF} , frakcija struje I_{REF} može se generisati kroz Q_1 .

Primjer: različiti ogledalni odnos



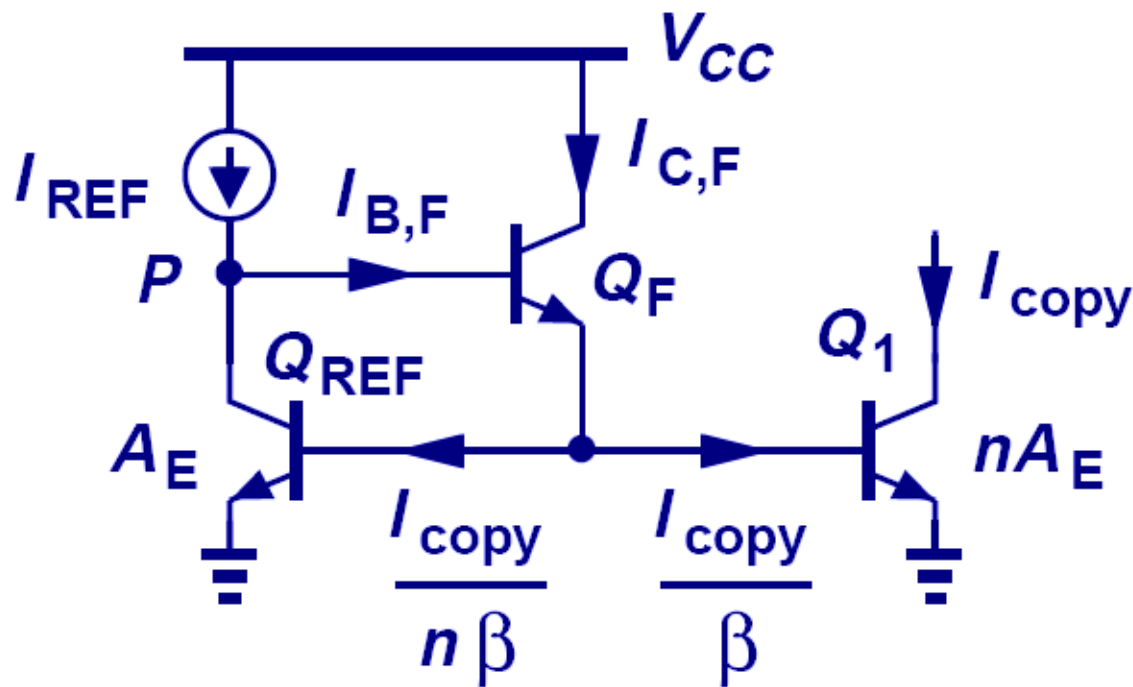
- I_{copy2} je 0.5mA i I_{copy1} je 0.05mA.
- Obije struje su podešene izvorom 0.2mA.

Greška ogledala usljed baznih struja



$$I_{copy} = \frac{nI_{REF}}{1 + \frac{1}{\beta}(n+1)}$$

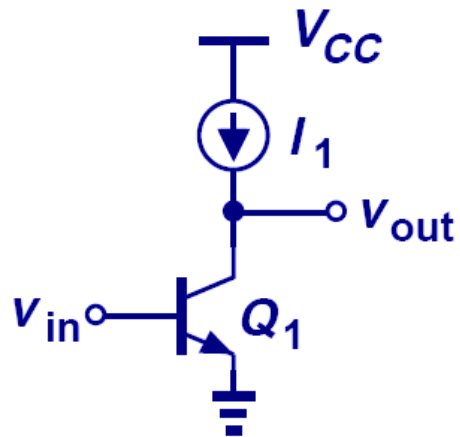
Poboljšanje tačnosti preslikavanja



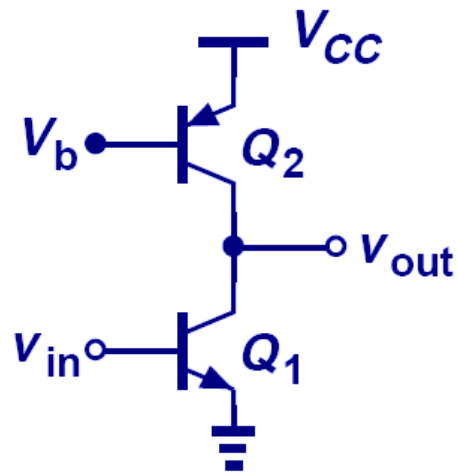
$$I_{copy} = \frac{nI_{REF}}{1 + \frac{1}{\beta^2}(n+1)}$$

- Umetanjem Q_F , bazne struje Q_{REF} i Q_1 dominantno obezbjeđuje Q_F umjesto I_{REF} . Greška preslikavanja se umanjuje β puta.

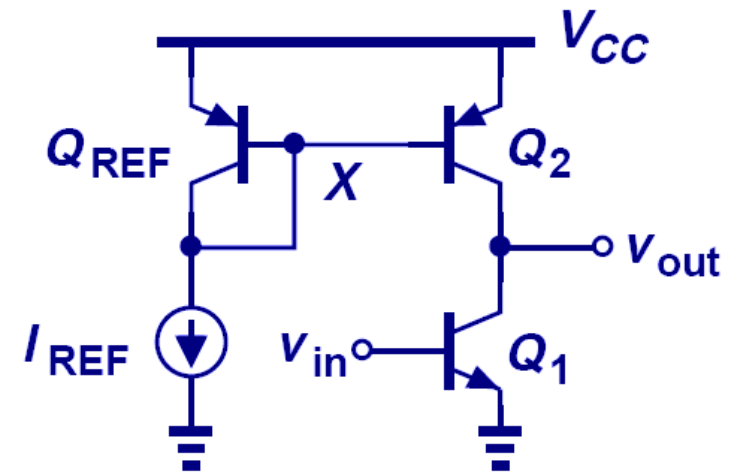
PNP Strujno ogledalo



(a)



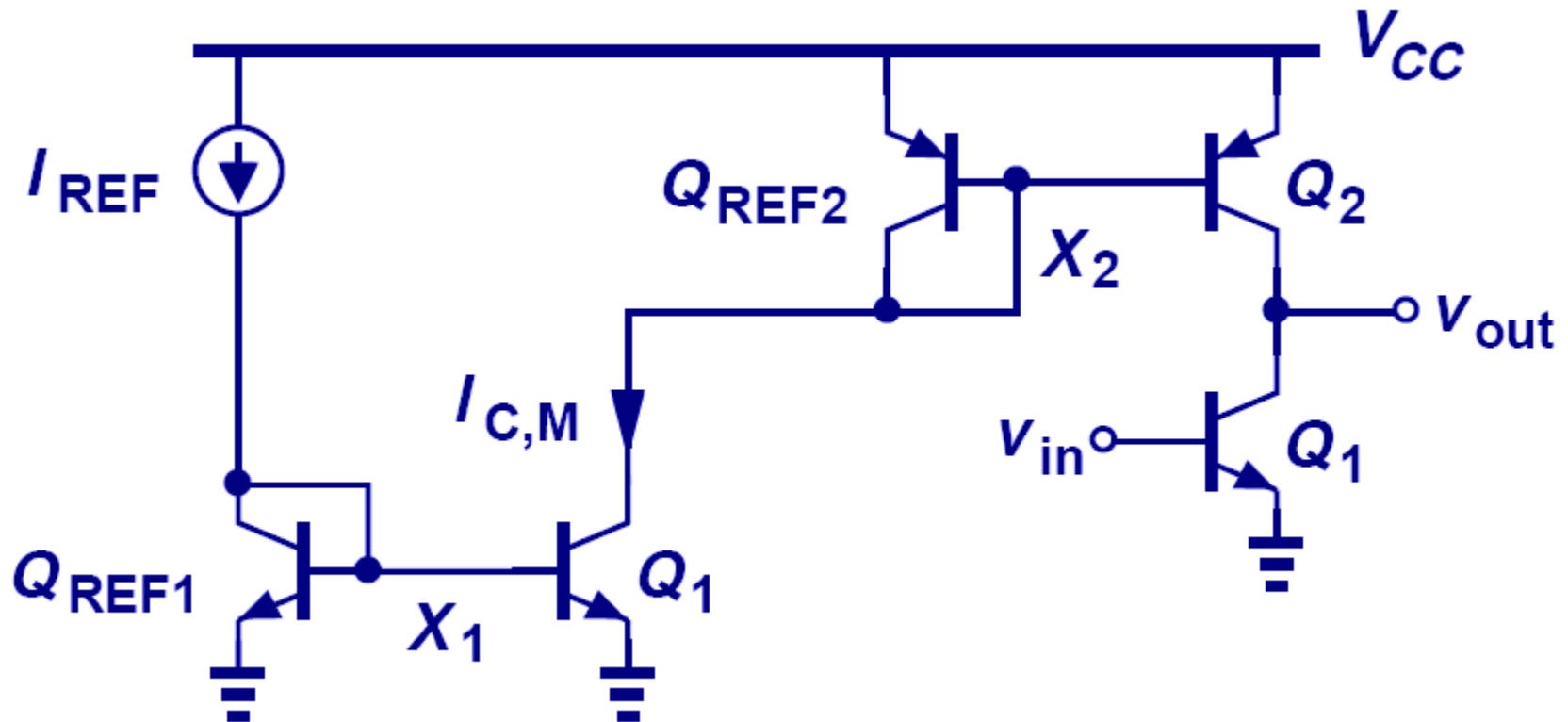
(b)



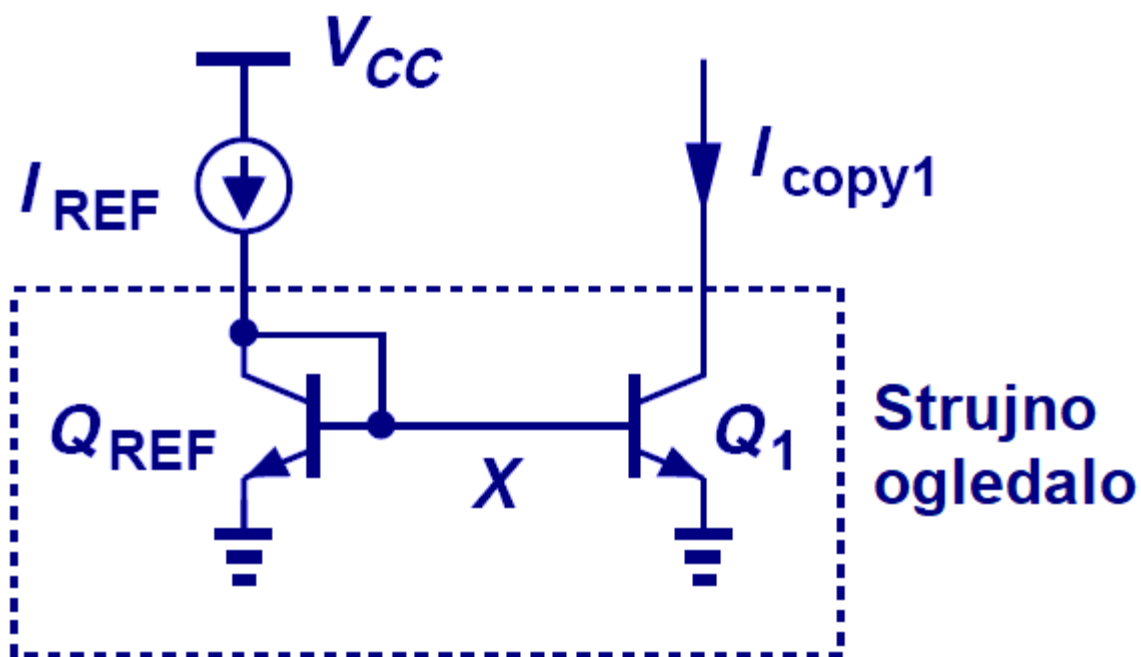
(c)

- PNP strujno ogledalo upotrijebljeno je kao opterećenje NPN pojačavača.

Generisanje I_{REF} za PNP stujno ogledalo

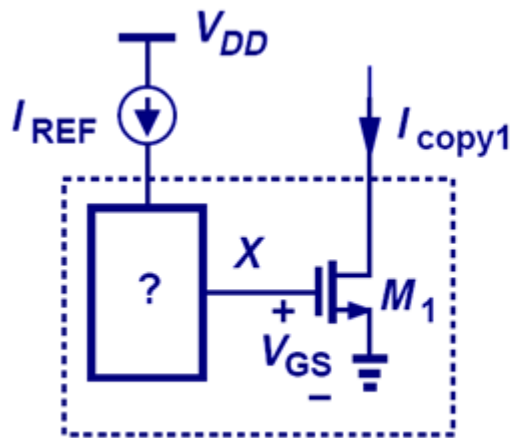


Primjer: Stujno ogledalo sa diskretnim komponentama

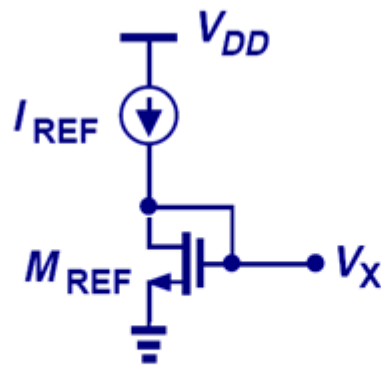


- Naka su Q_{REF} i Q_1 diskretni NPN tranzistori.
- I_{REF} i I_{copy1} se mogu značajno razlikovati usljed različitih I_S .

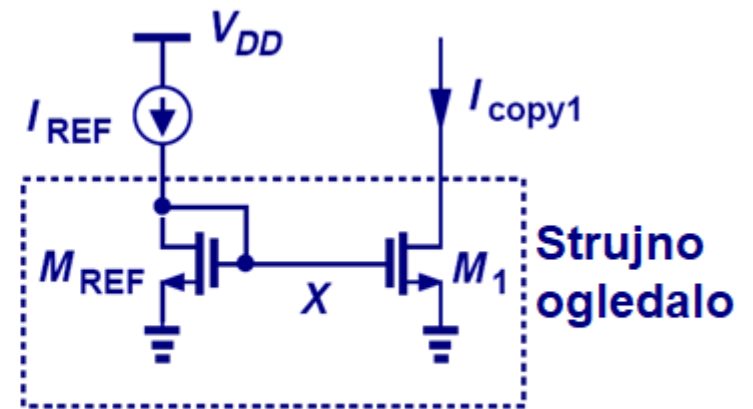
MOS strujna ogledala



(a)



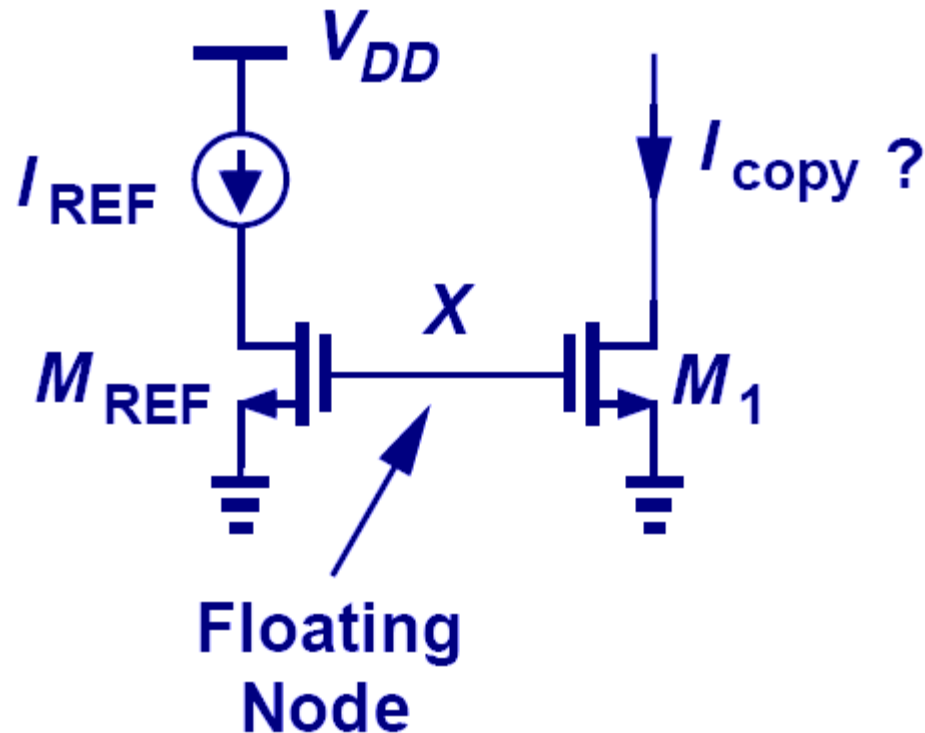
(b)



(c)

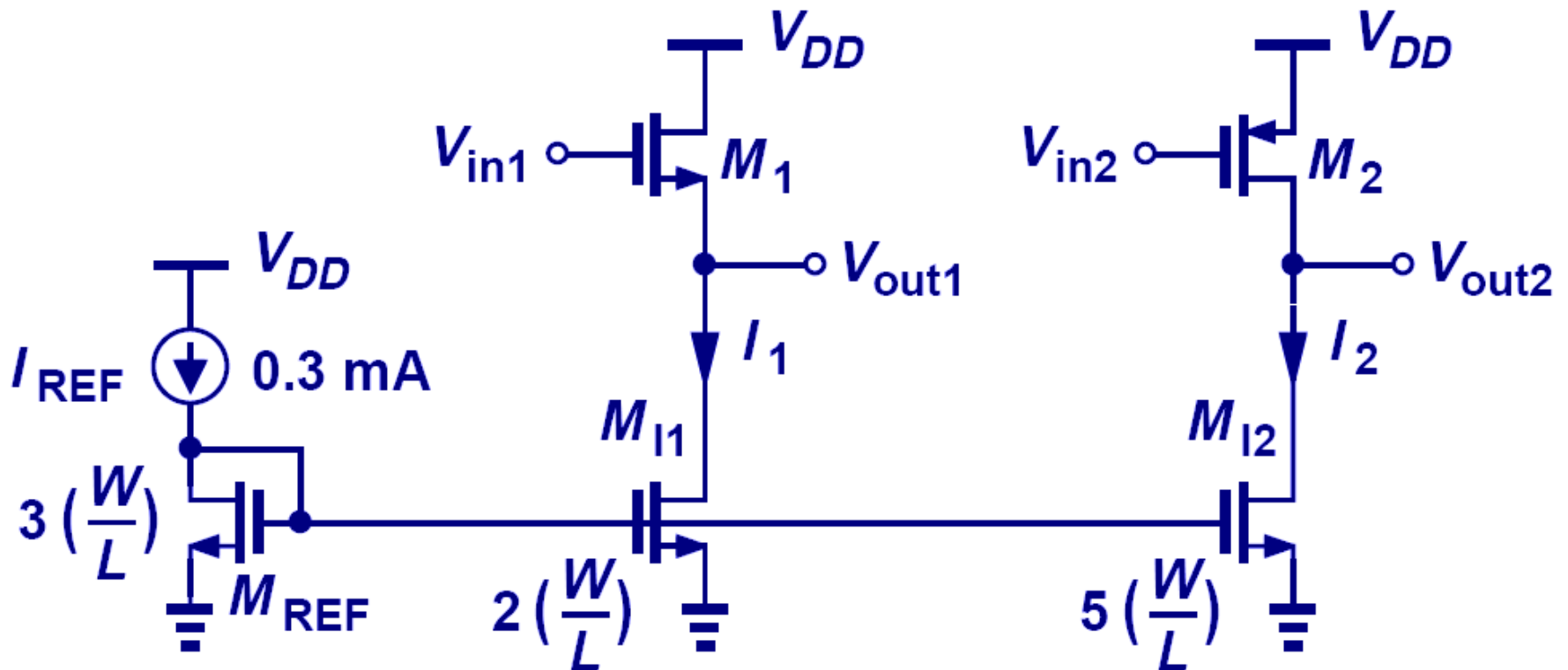
- Isti koncept preslikavanja struja može se primijeniti i kod MOS tranzistora.

Primjer lošeg strujnog ogledala



- Ovo nije strujno ogledalo jer relacija između V_X i I_{REF} nije jasno definisana.
- Način da se definiše V_X sa I_{REF} je upotreba diodno povezanog MOSFET-a jer to obezbjeđuje kvadratnu I-V zavisnost.

Primjer: Skaliranje struja

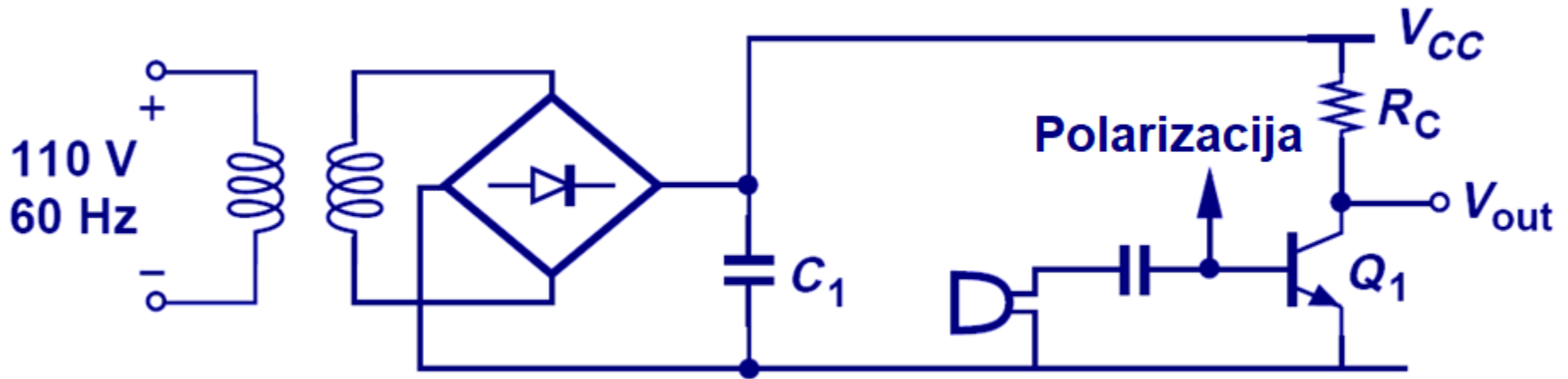


- Slično BJT, MOS stujna ogledala takođe mogu skalirati I_{REF} ($I_1 = 0.2 \text{ mA}$, $I_2 = 0.5 \text{ mA}$).

Diferencijalni pojačavači

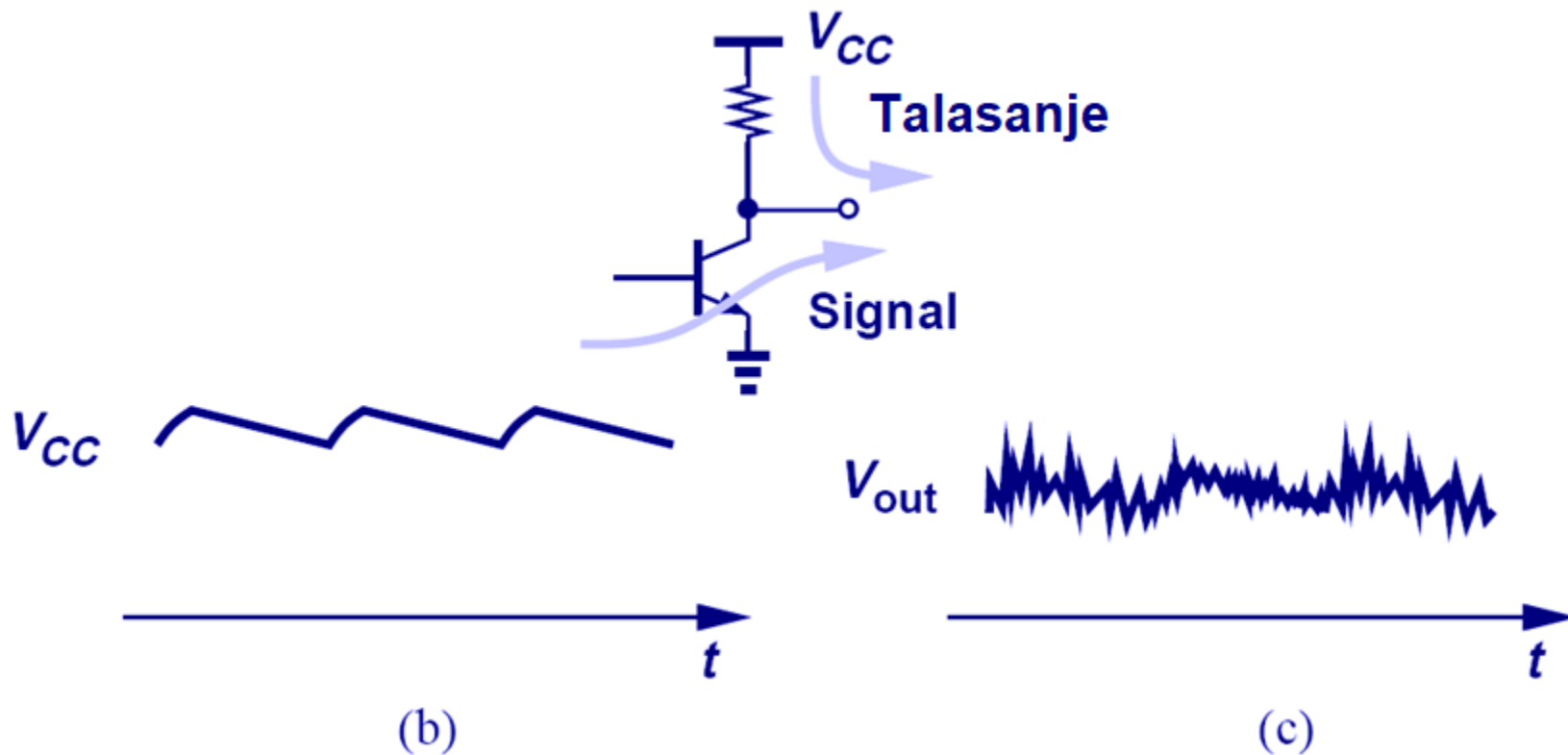
- **Opša razmatranja**
- **Bipolarni diferencijalni pojačavači**
- **MOS diferencijalni pojačavači**
- **Diferencijalni pojačavač i aktivno opterećenje**

Primjer napajanja pojačavača



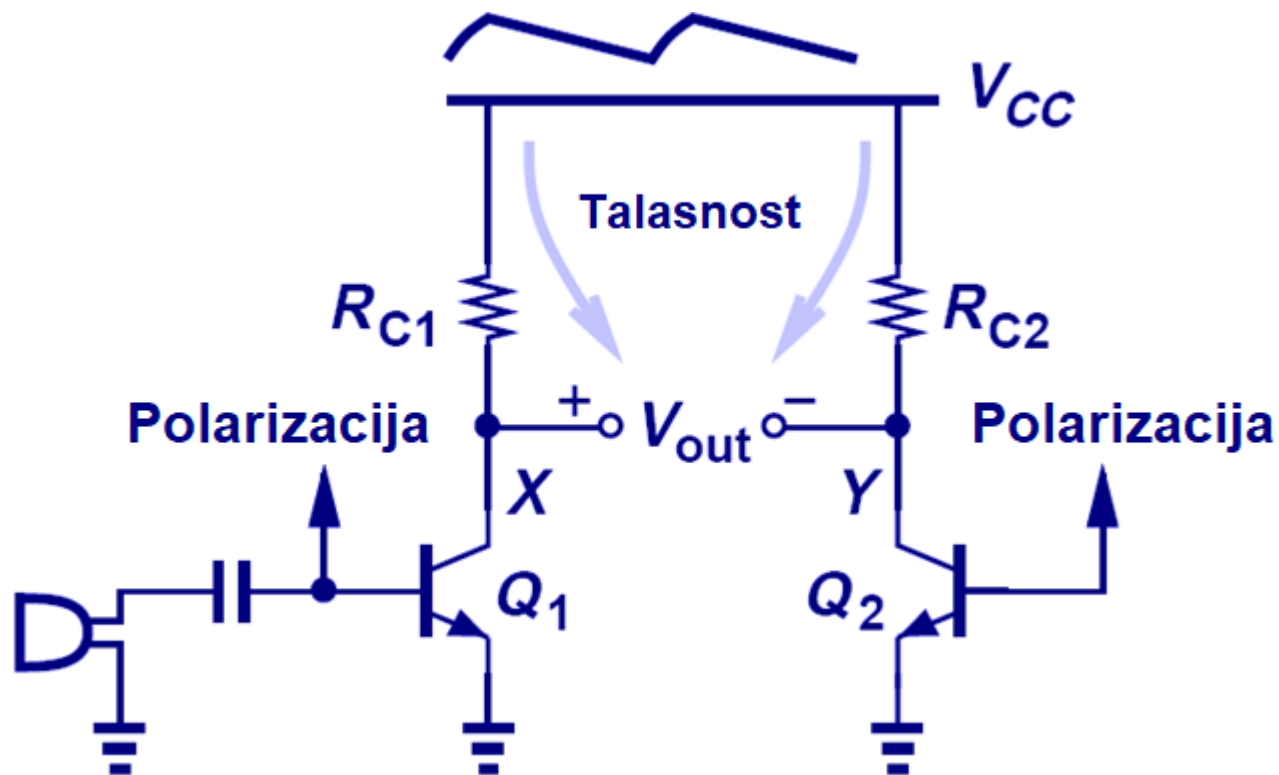
- Na slici je prikazana uprošćena šema audio pojačavača.
- Pojačavač koristi ispravljeni i filtrirani AC napon kao svoje napajanje i pojačava signal sa mikrofona.

“Zujanje” u audio pojačavaču



- Kako V_{CC} talasa, to se prenosi na izlaz i, od strane korisnika, opaža se kao “zujanje”.

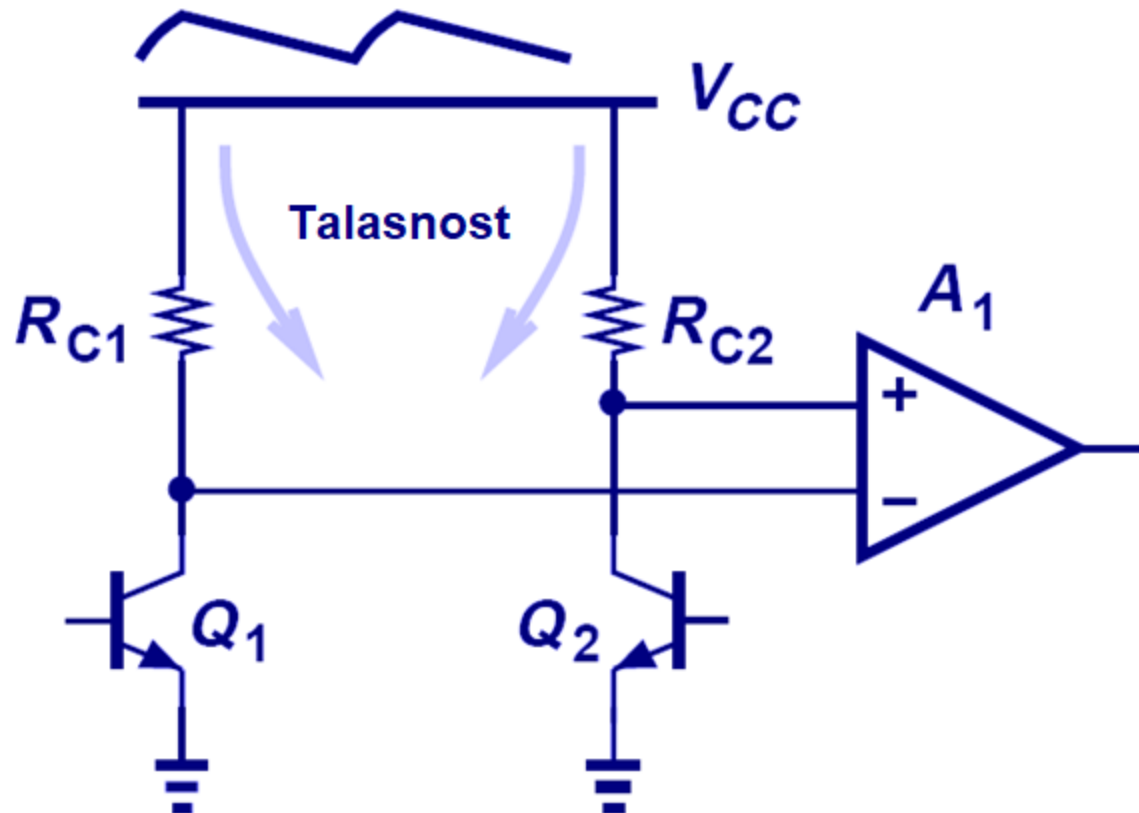
Eliminisanje talasnosti napajanja



$$\begin{aligned}v_X &= A_v v_{in} + v_r \\v_Y &= v_r \\v_X - v_Y &= A_v v_{in}\end{aligned}$$

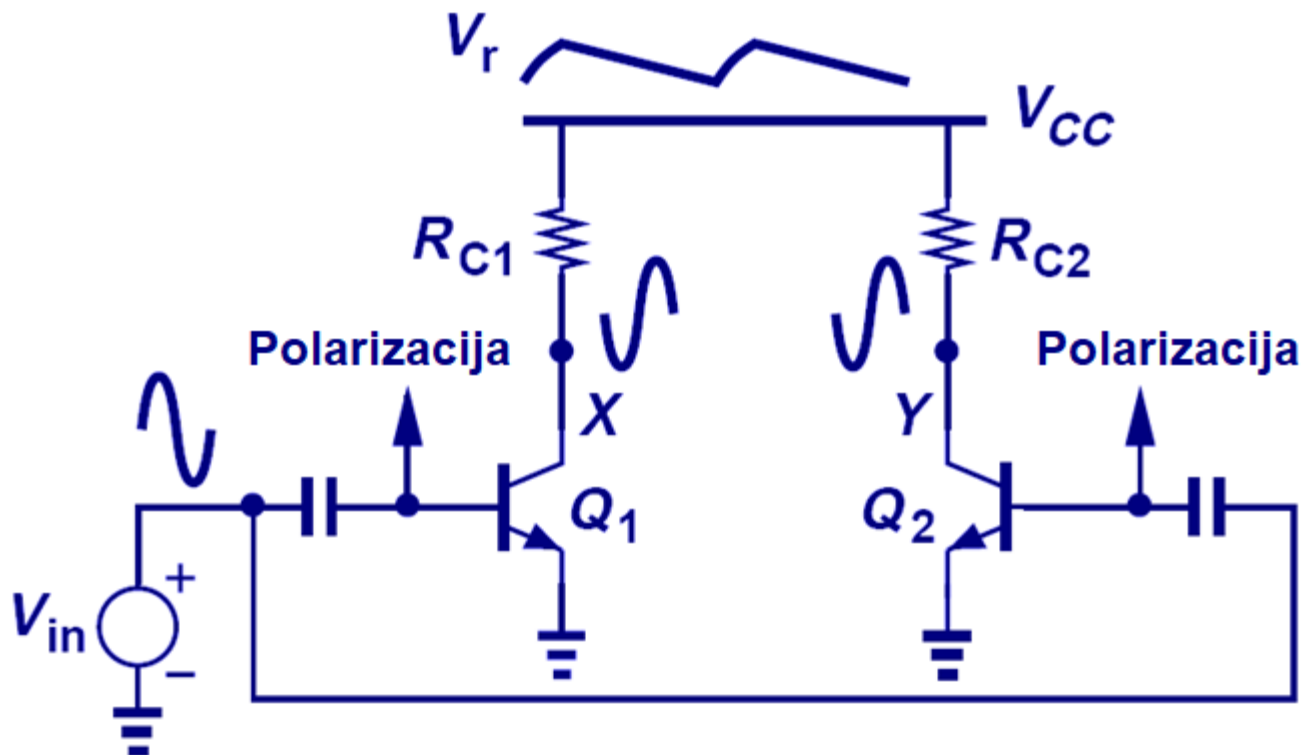
- Kako oba izlaza X i Y sadrže talasnost, njihova razlika može biti bez talasnosti.

Diferencijalni izlaz oslobođen talasnosti



- Kako je signal uzet kao razlika između dva izlaza, potreban je pojačavač koji pojačava diferencijalni signal.

Diferencijalni pojačavač sa zajedničkim ulazima



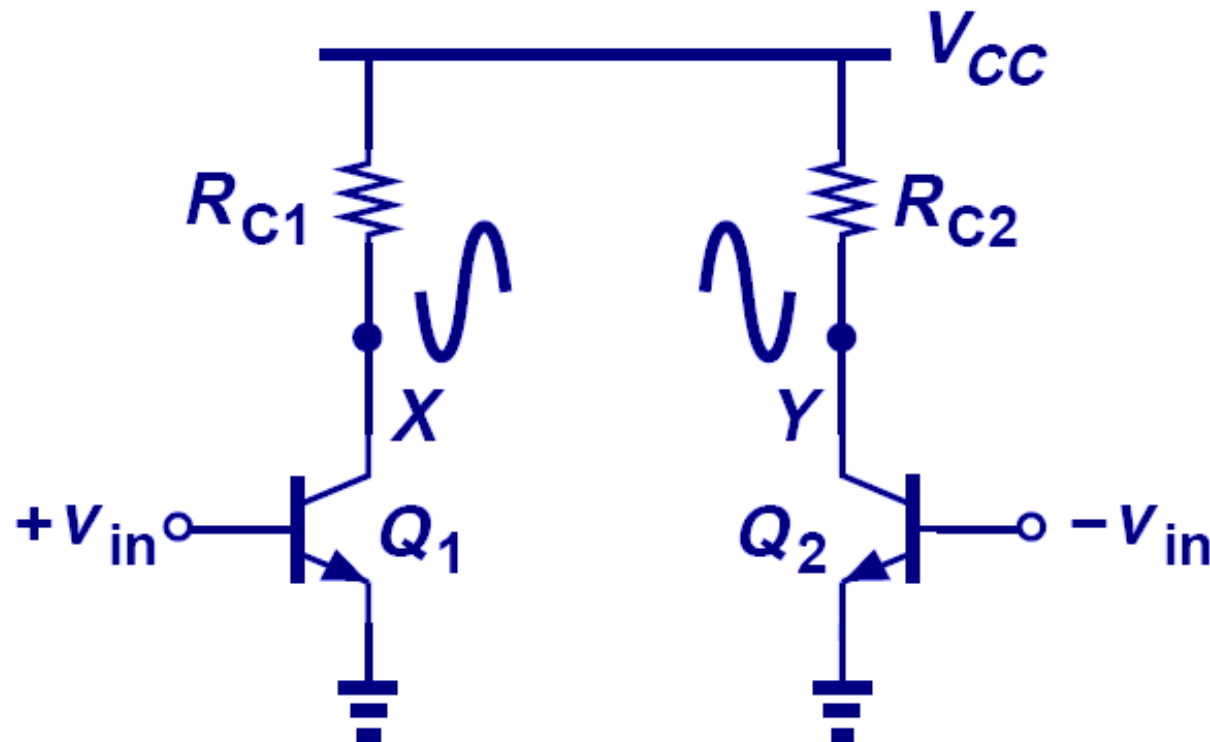
$$v_X = A_v v_{in} + v_r$$

$$v_Y = A_v v_{in} + v_r$$

$$v_X - v_Y = 0$$

- Na ulazima diferencijalnog pojačavača ne mogu se primijeniti signali koji su u fazi.
- Izlazi će takođe biti u fazi i proizvesti nulti izlazni diferencijalni signal.

Diferencijalni pojačavač sa diferencijalnim ulazima



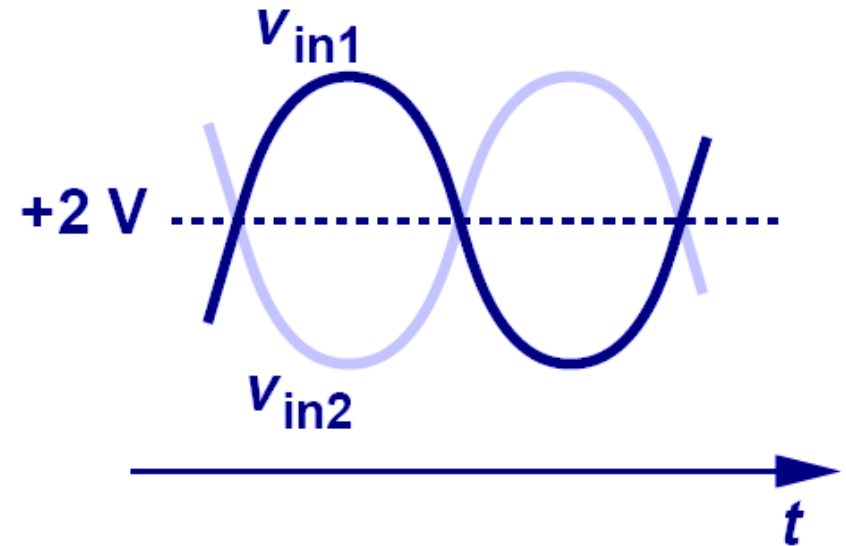
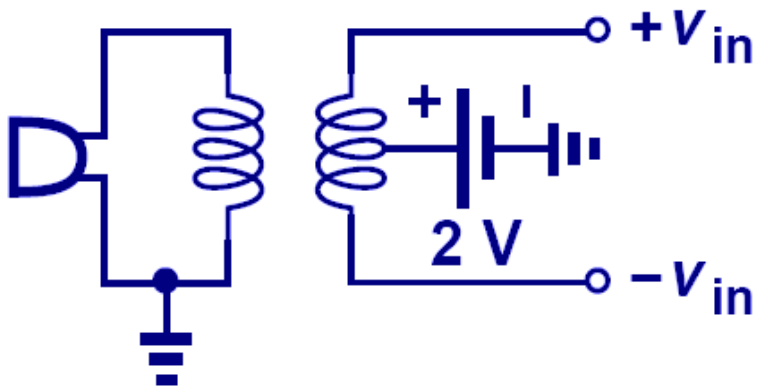
$$v_X = -A_v v_{in} + v_r$$

$$v_Y = A_v v_{in} + v_r$$

$$v_X - v_Y = -2A_v v_{in}$$

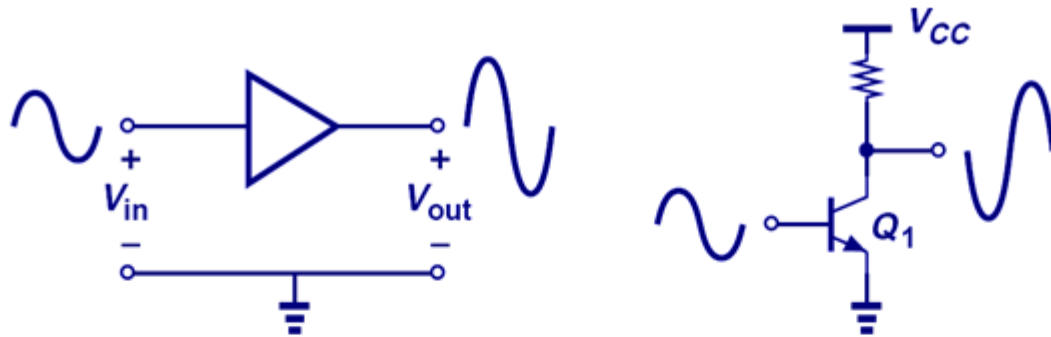
- Kada se primijene ulazi u protiv-fazi, izlazi su takođe u protiv fazi, što povećava njihovu razliku.

Diferencijalni signali

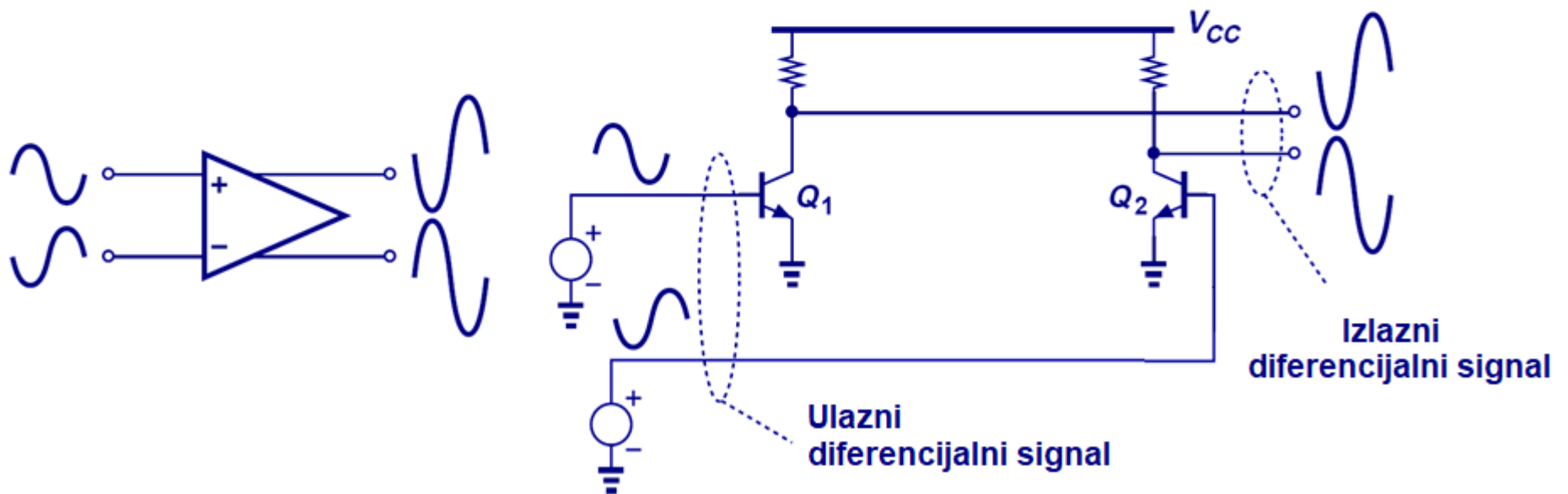


- Jedan od načina generisanja diferencijalnih signala je pomoću transformatora.
- Diferencijalni signali imaju istu srednju vrijednost prema masi, jednake su amplitude ali suprotne faze.

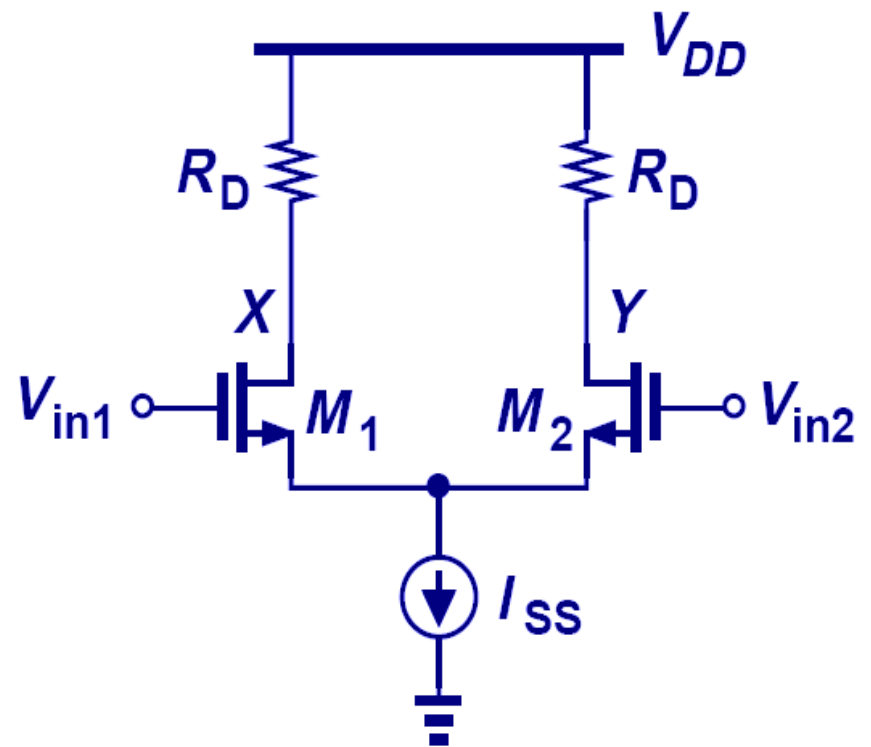
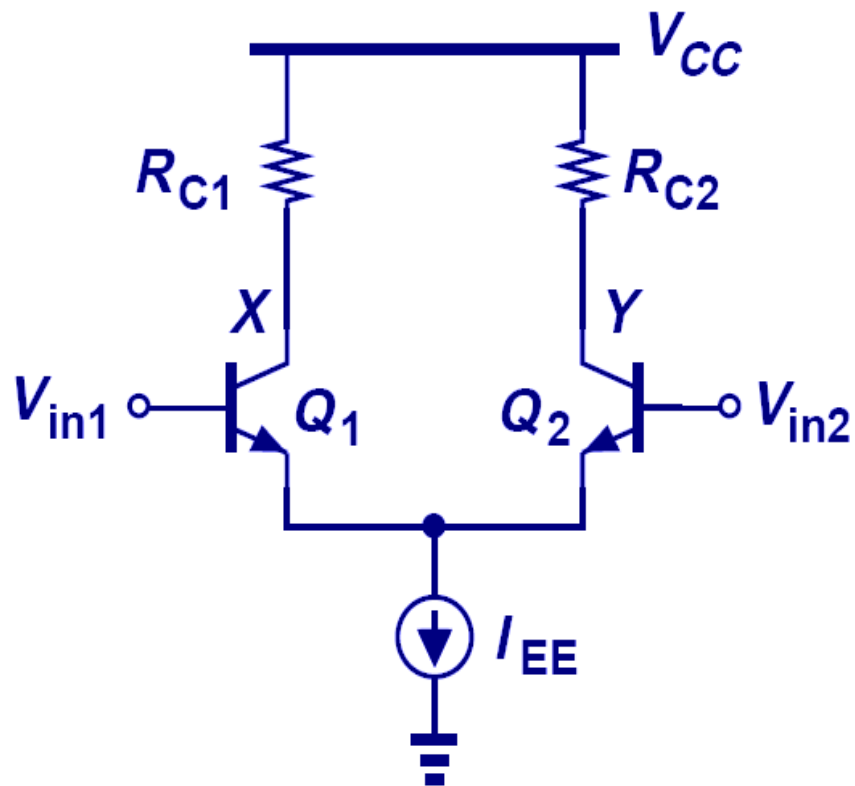
Jednostruki vs. diferencijalni signali



(a)

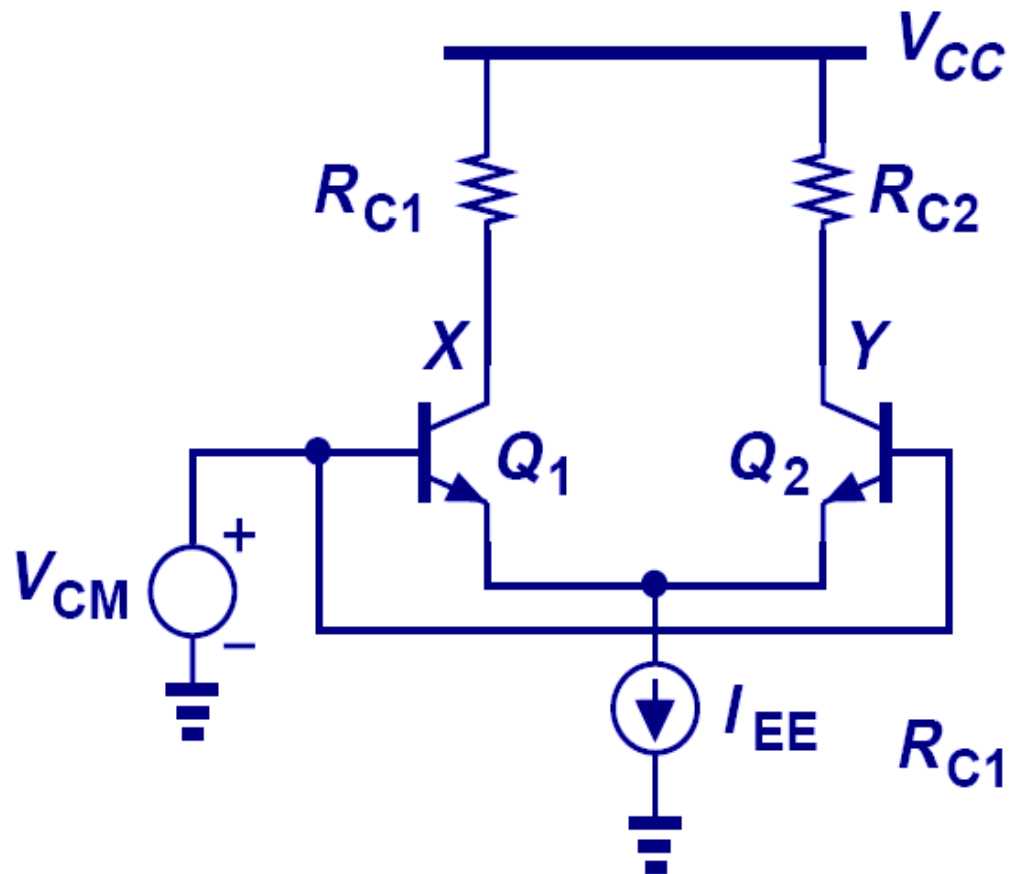


Diferencijalni par



- Dodavanjem strujnog izvora, prikazana kola rade kao diferencijalni par.

Odziv na zajednički ulaz



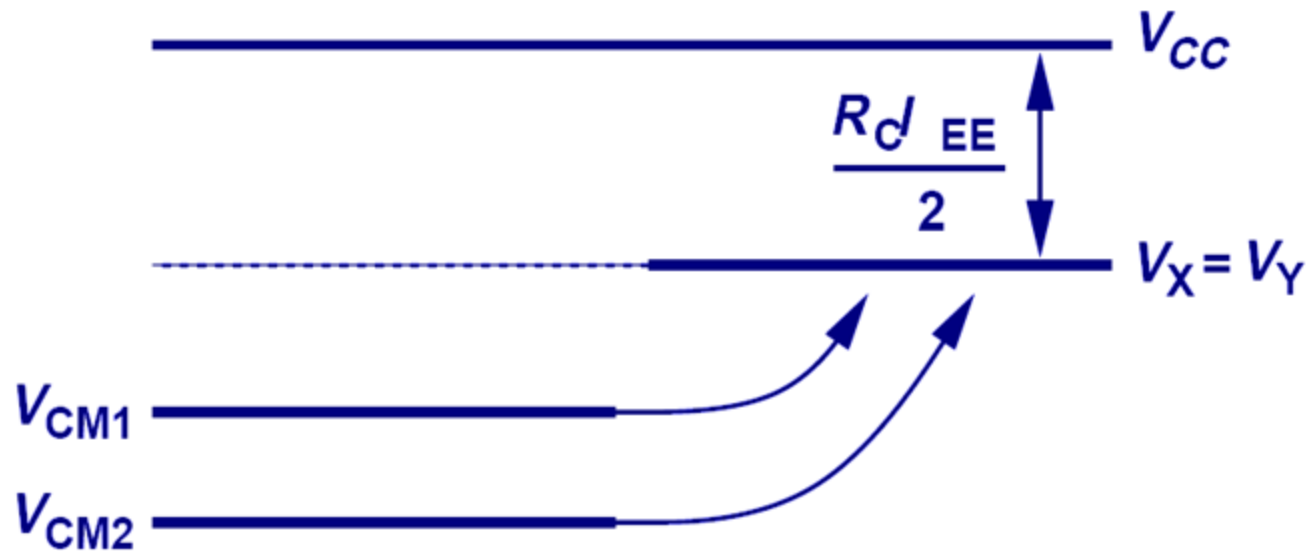
$$V_{BE1} = V_{BE2}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{EE}}{2}$$

$$V_X = V_Y = V_{CC} - R_C \frac{I_{EE}}{2}$$

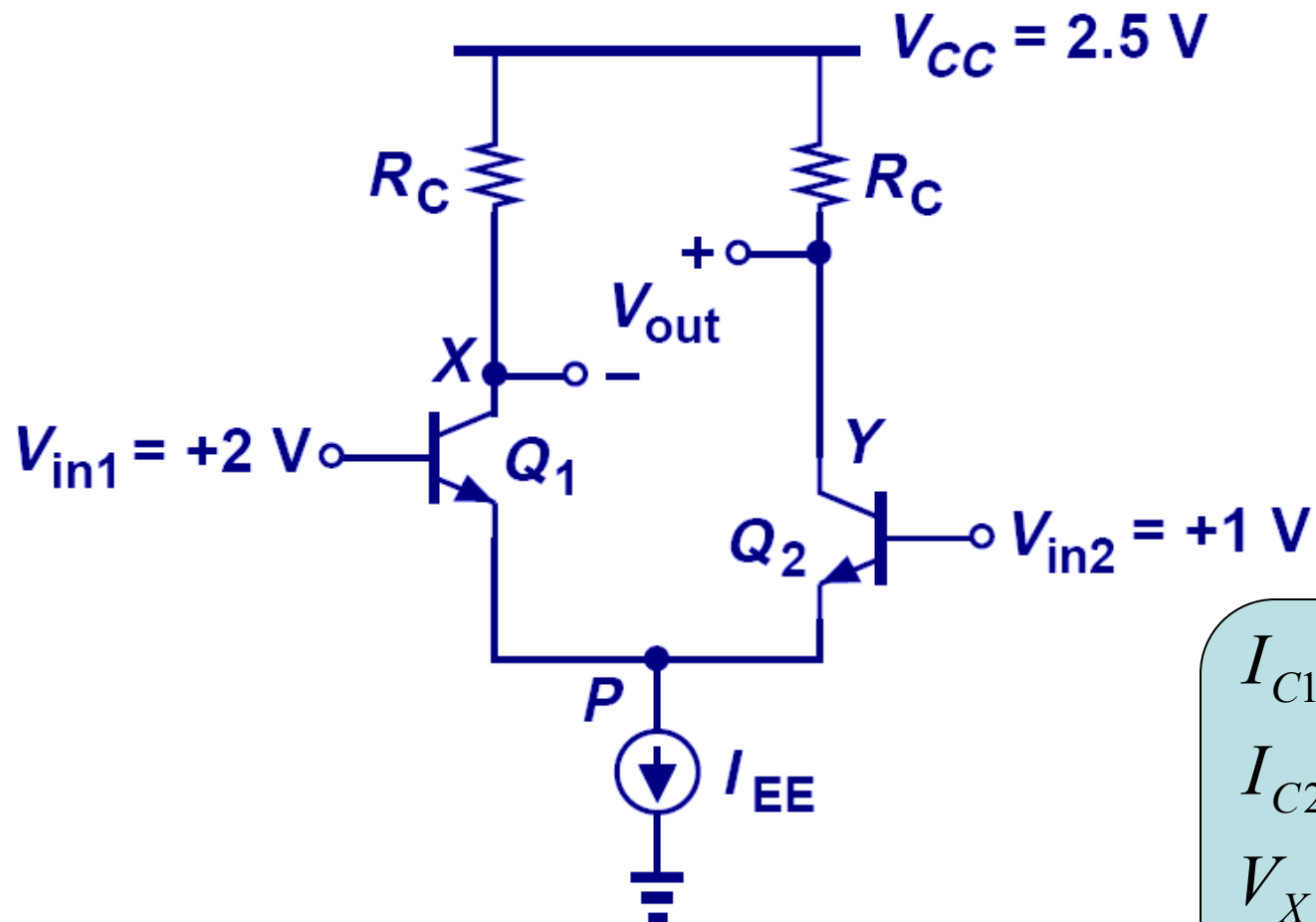
$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

Odbacivanje zajedničkog ulaza



- Uslijed konstantnosti struje strujnog izvora, zajednička ulazna vrijednost može da se mijenja, ali to nema uticaja na izlaznu zajedničku vrijednost.

Diferencijani odziv 1



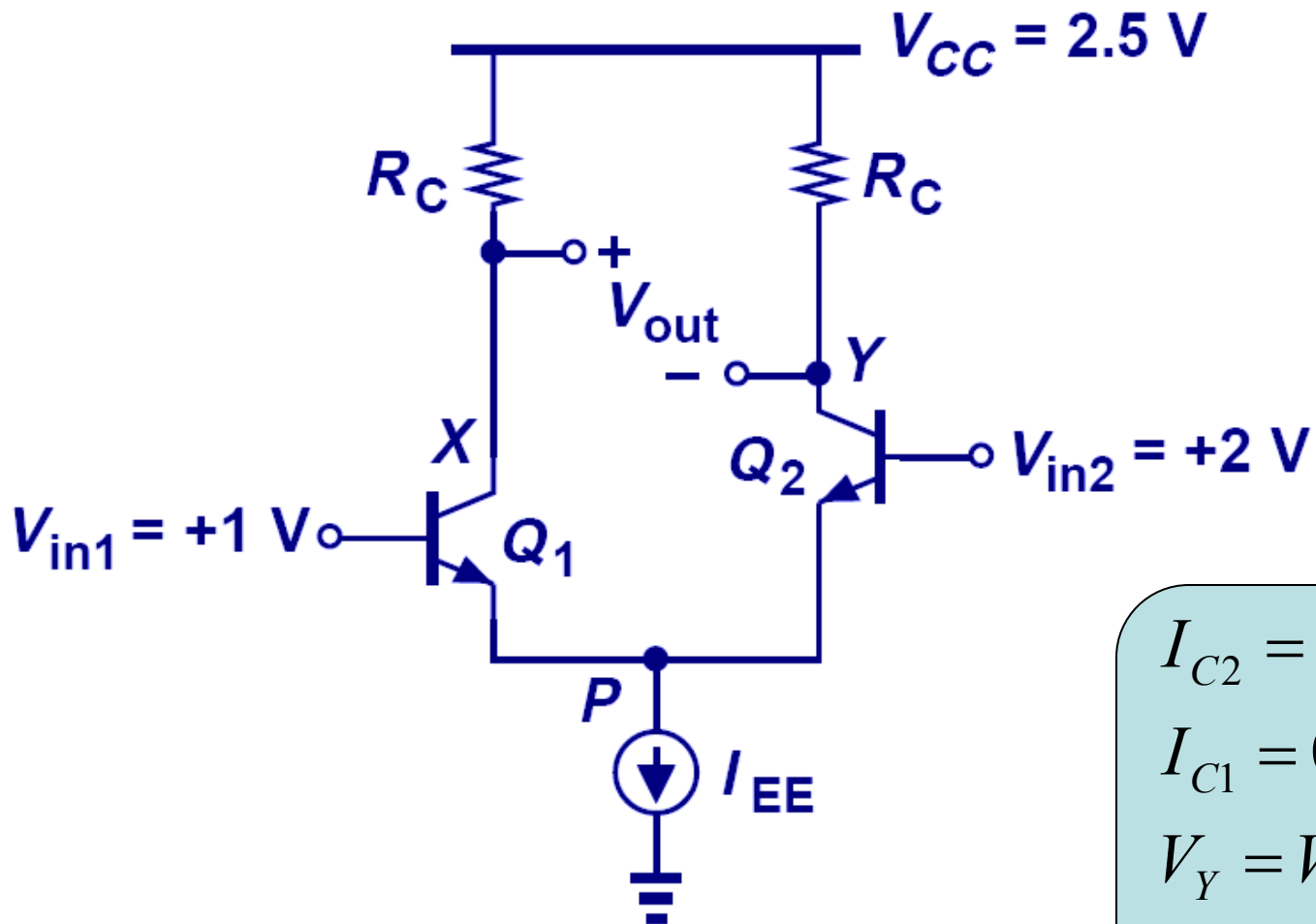
$$I_{C1} = I_{EE}$$

$$I_{C2} = 0$$

$$V_X = V_{CC} - R_C I_{EE}$$

$$V_Y = V_{CC}$$

Diferencijani odziv 2



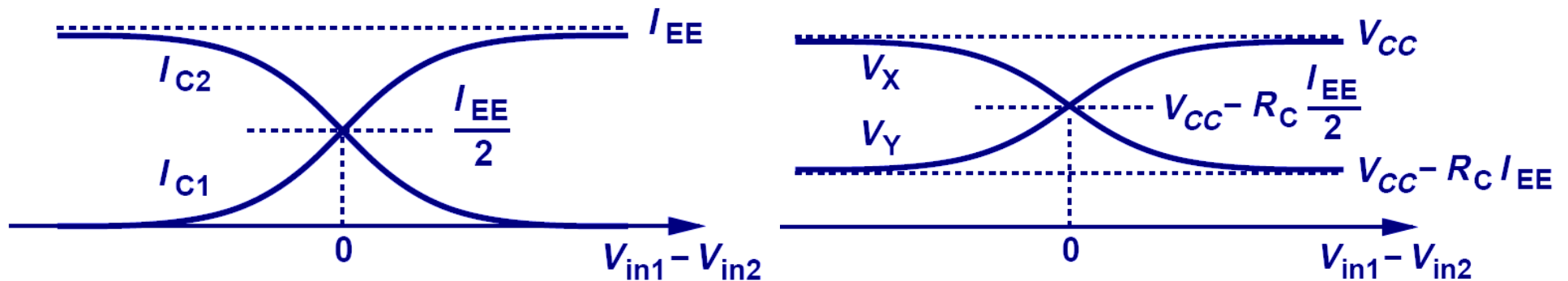
$$I_{C2} = I_{EE}$$

$$I_{C1} = 0$$

$$V_Y = V_{CC} - R_C I_{EE}$$

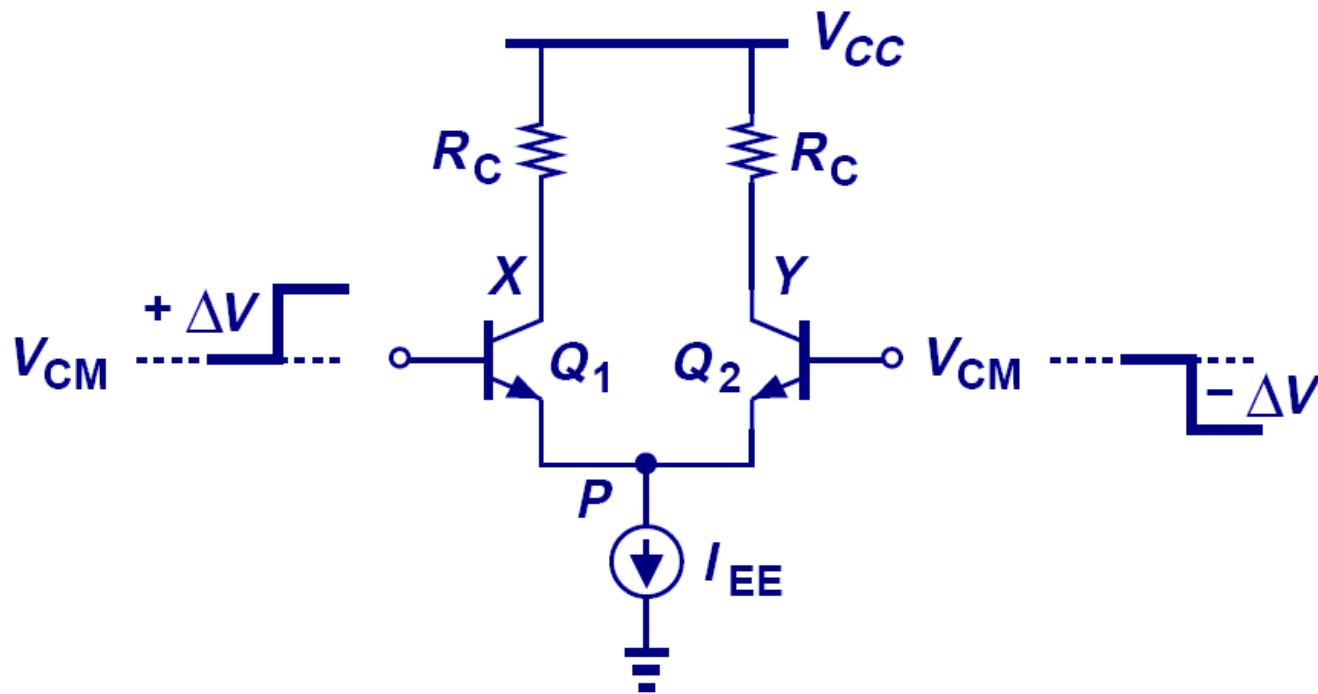
$$V_X = V_{CC}$$

Karakteristike diferencijalnog para



- Nenulti diferencijani ulaz izaziva razliku u izlaznim strujama i naponima, dok zajednički ulaz ne izaziva razliku.

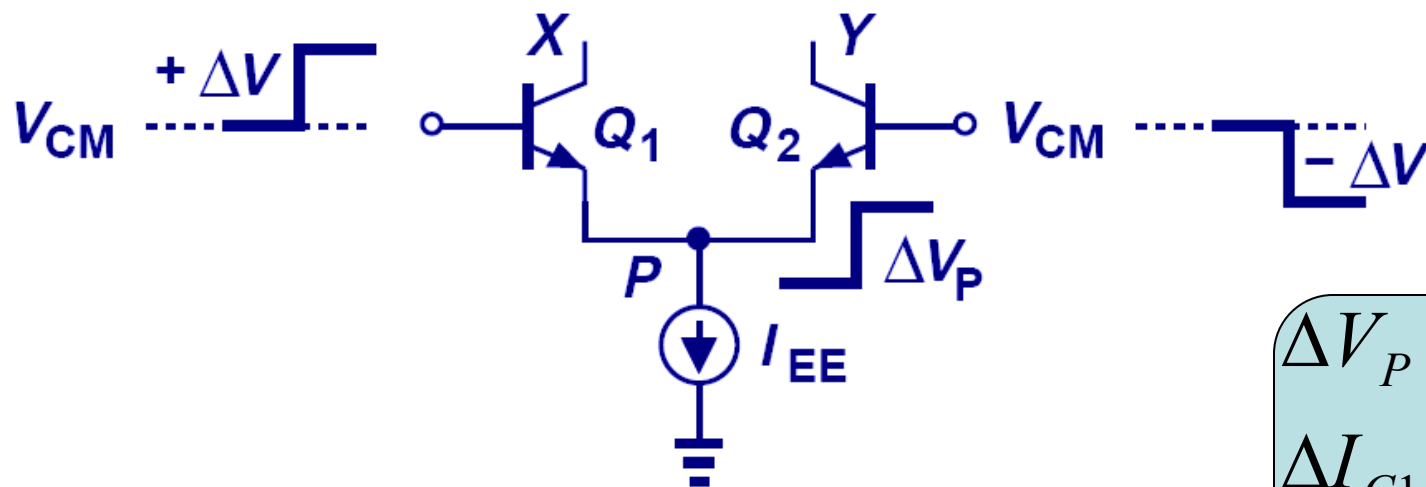
Analiza za male signale



$$I_{C1} = \frac{I_{EE}}{2} + \Delta I$$
$$I_{C2} = \frac{I_{EE}}{2} - \Delta I$$

- Pošto ulazi na Q_1 i Q_2 rastu i opadaju za istu veličinu, struja I_{C1} se povećava jednako koliko se I_{C2} smanjuje.

Vitruelna masa



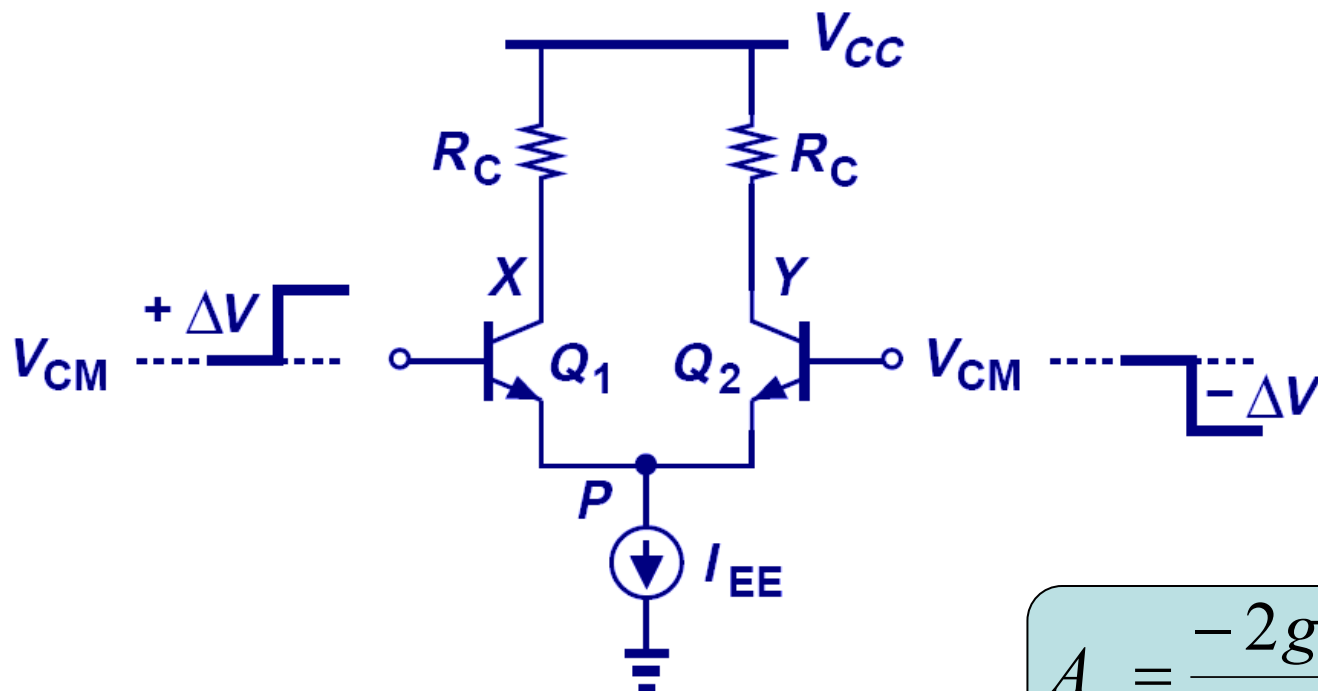
$$\Delta V_P = 0$$

$$\Delta I_{C1} = g_m \Delta V$$

$$\Delta I_{C2} = -g_m \Delta V$$

- Za male promjena na ulazima, rast i opadanje I_{C1} i I_{C2} su jednaki, naponski signal u tački P je nula.
- Prema tome, tačka P se može uzeti kao AC masa.

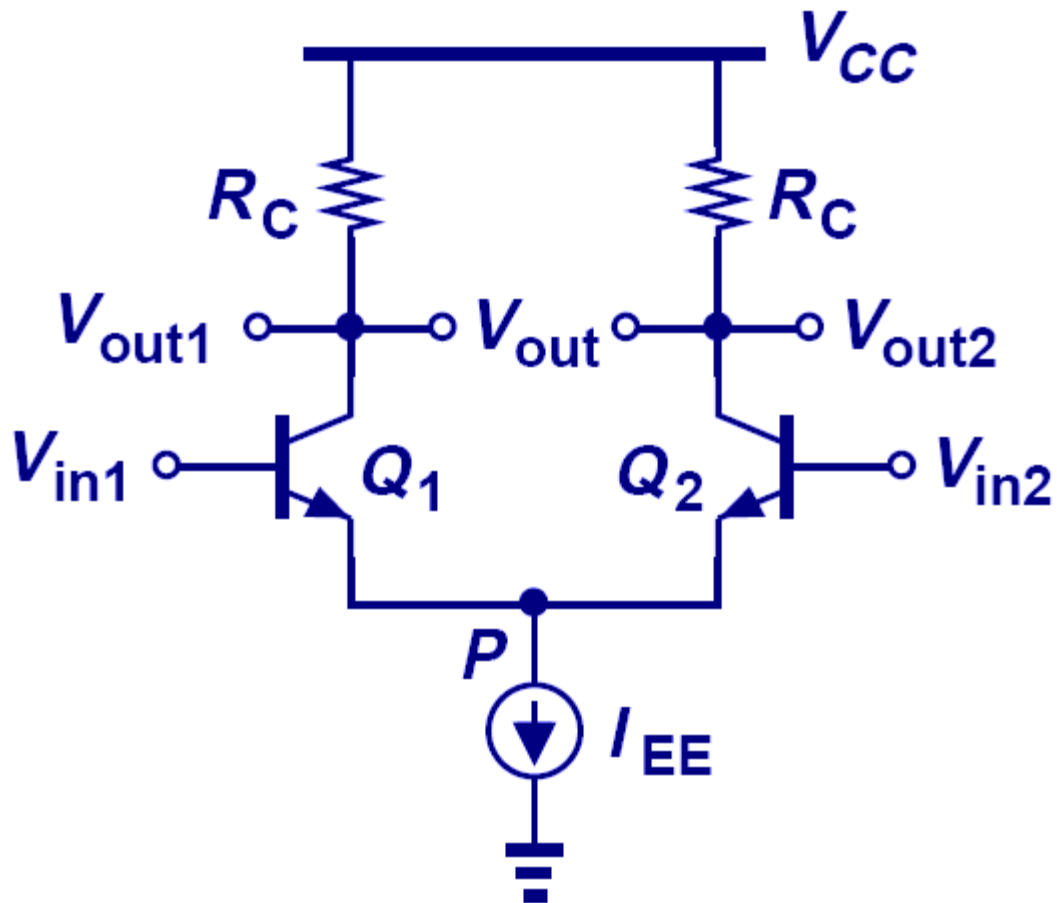
Diferencijano pojačanje malog signala



$$A_v = \frac{-2g_m \Delta V R_C}{2\Delta V} = -g_m R_C$$

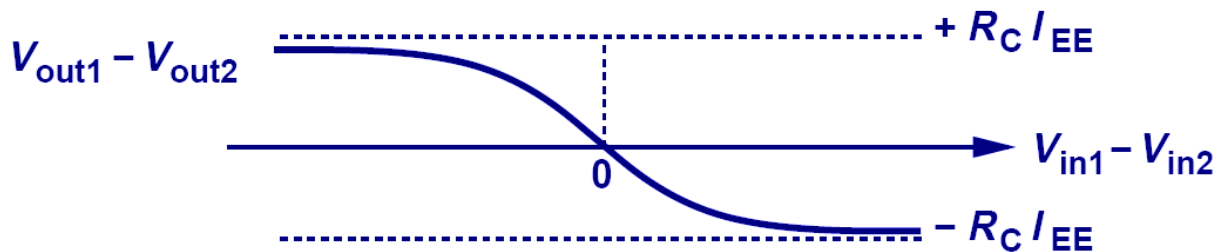
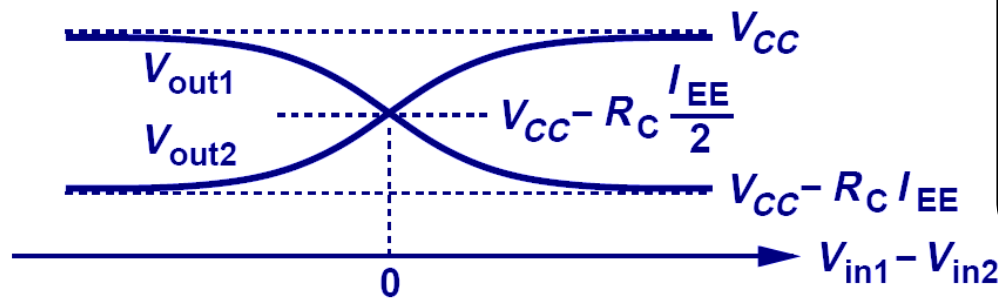
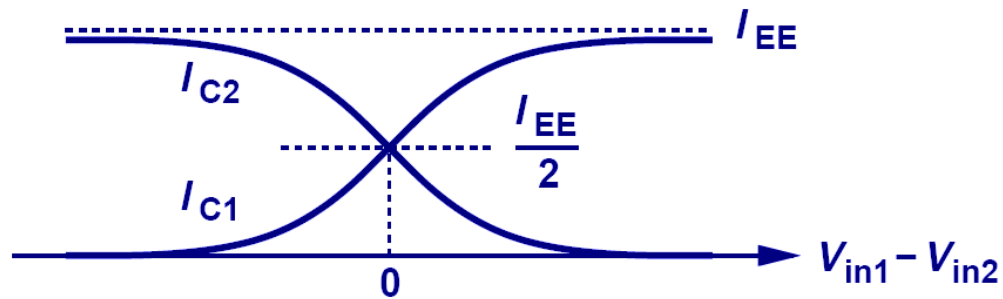
- Kako je promjena napona na izlazu $\Delta V_{xy} = -2g_m \Delta V R_C$ i napona na ulazu $2\Delta V$, pojačanje malog signala je $-g_m R_C$, slično kao kod ZE pojačavača.
- Međutim, za dobijanje istog pojačanja kao kod ZE pojačavača, disipacija snage je duplirana.

Analiza za velike signale



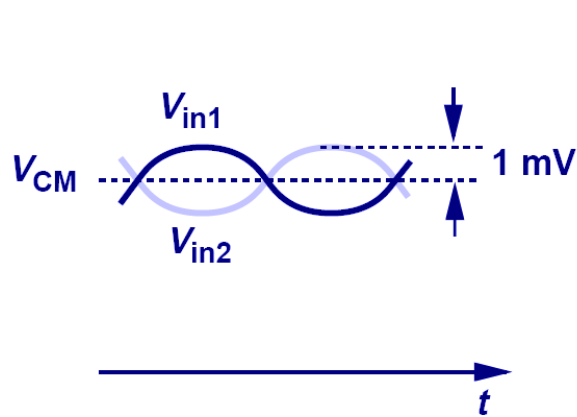
$$I_{C1} = \frac{I_{EE} \exp \frac{V_{in1} - V_{in2}}{V_T}}{1 + \exp \frac{V_{in1} - V_{in2}}{V_T}}$$
$$I_{C2} = \frac{I_{EE}}{1 + \exp \frac{V_{in1} - V_{in2}}{V_T}}$$

Ulazno/Izlazne karakteristike

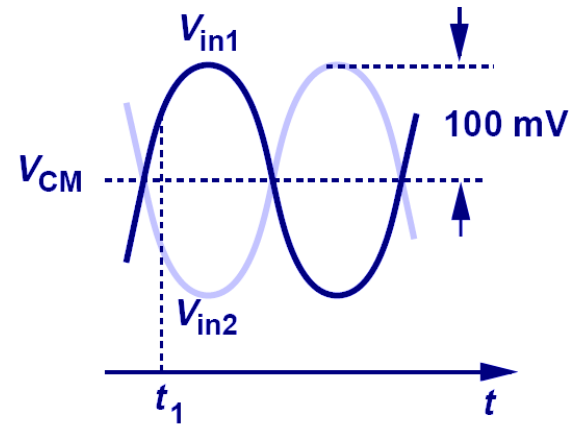


$$V_{out1} - V_{out2} = -R_C I_{EE} \tanh \frac{V_{in1} - V_{in2}}{2V_T}$$

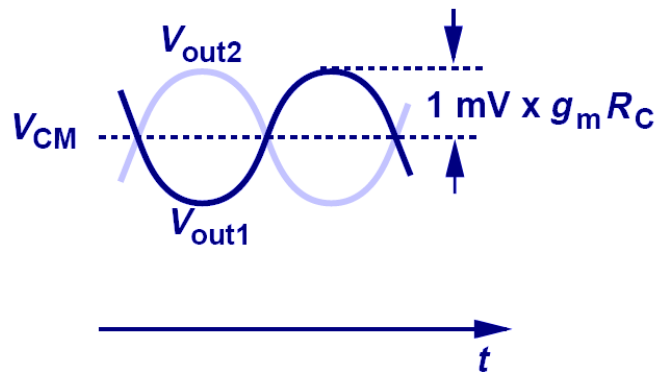
Linearne/Nelinearne oblasti



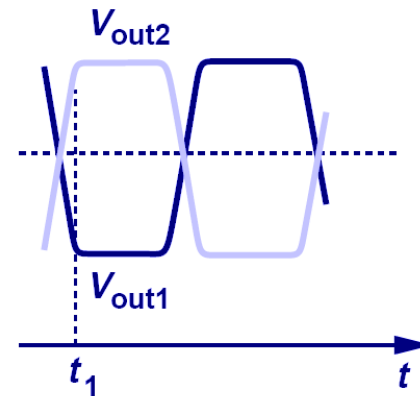
(b)



(c)

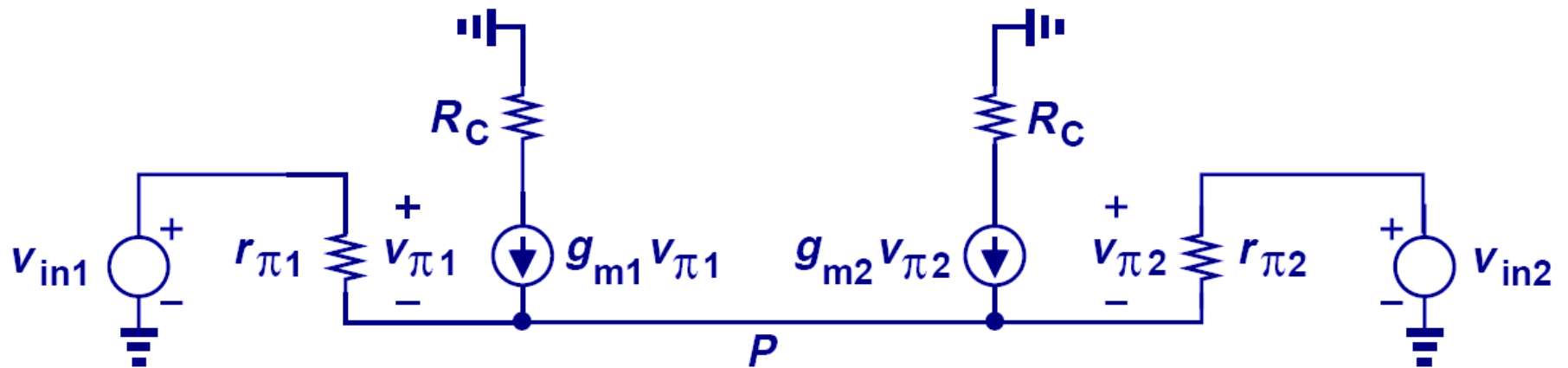
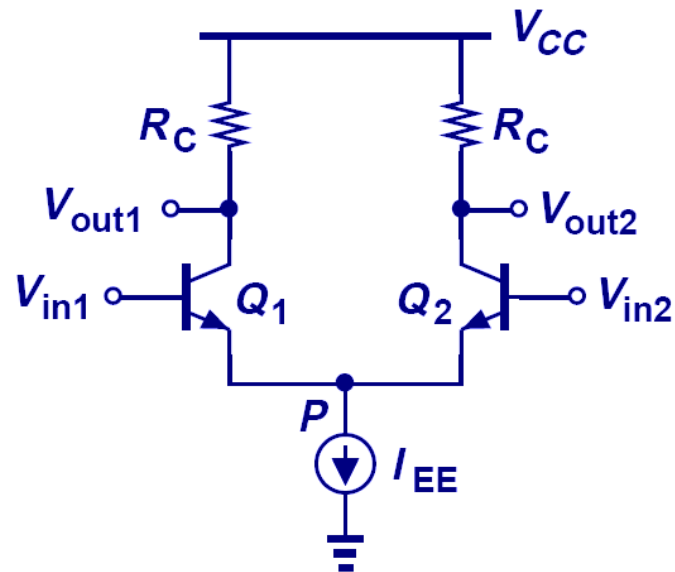


(d)

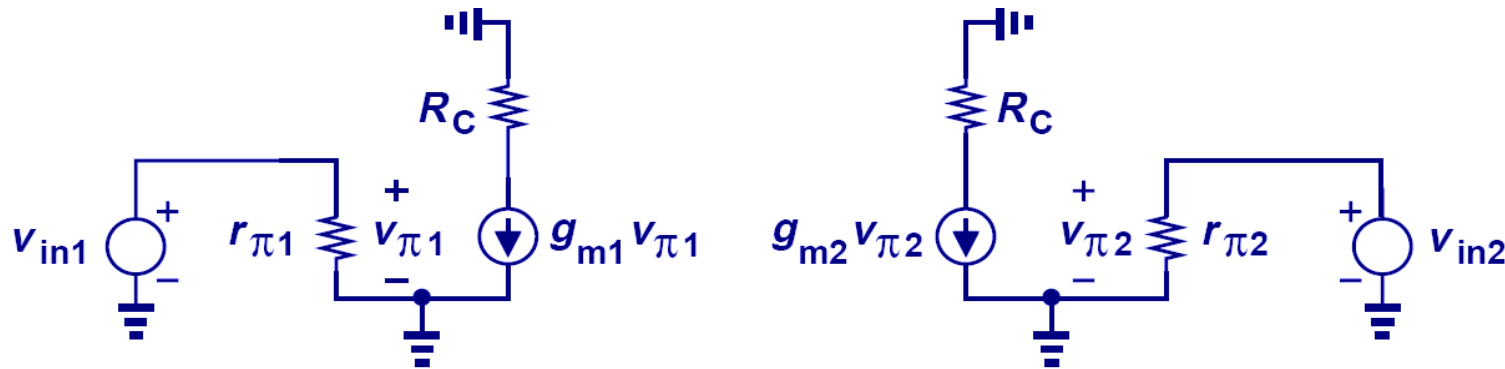


(e)

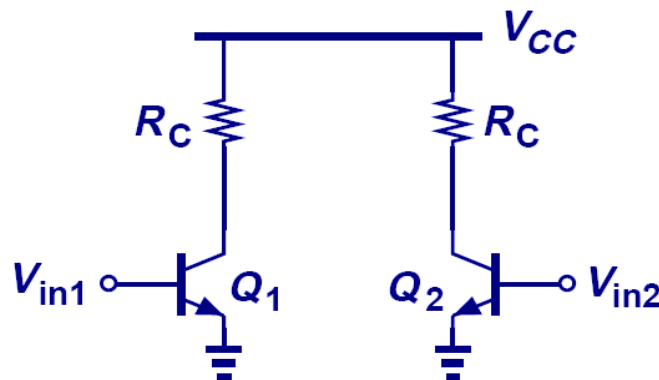
Model za male signale



Polovljenje



(b)



(c)

$$\frac{v_{out1} - v_{out2}}{v_{in1} - v_{in2}} = -g_m R_C$$

- Kako je V_P konstantno (AC masa), diferencijalni par se može analizirati kao dva ZE “polu kola”.

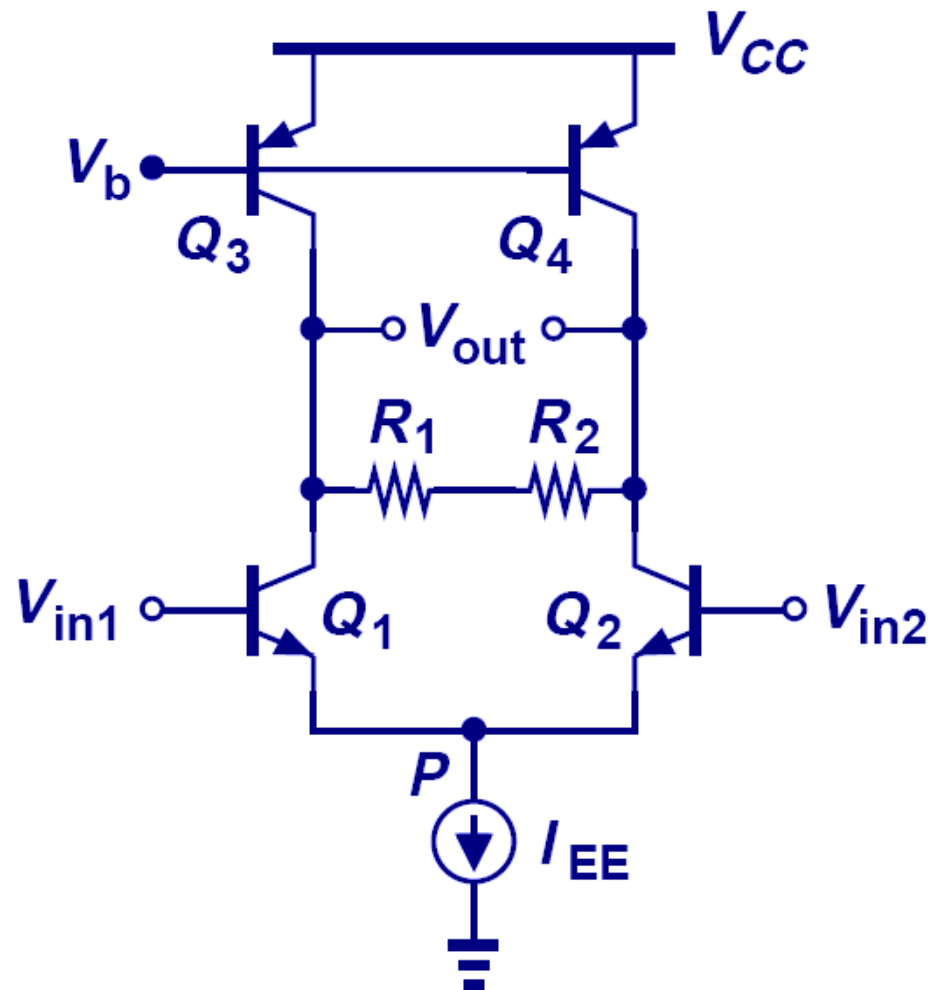
Virtuelna masa - proširenje



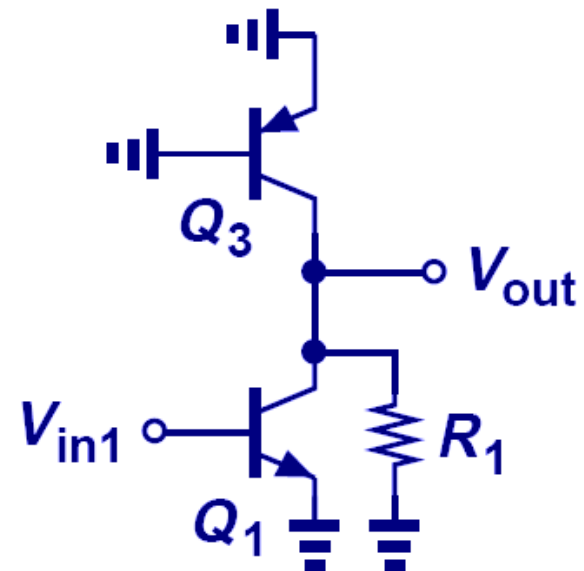
$$V_X = 0$$

- Može se pokazati da ako je $R_1 = R_2$, i napon u tačkama A i B se poveća i smanji za istu vrijednost respektivno, V_X se ne mijenja.

Primjer I: Provjeriti!

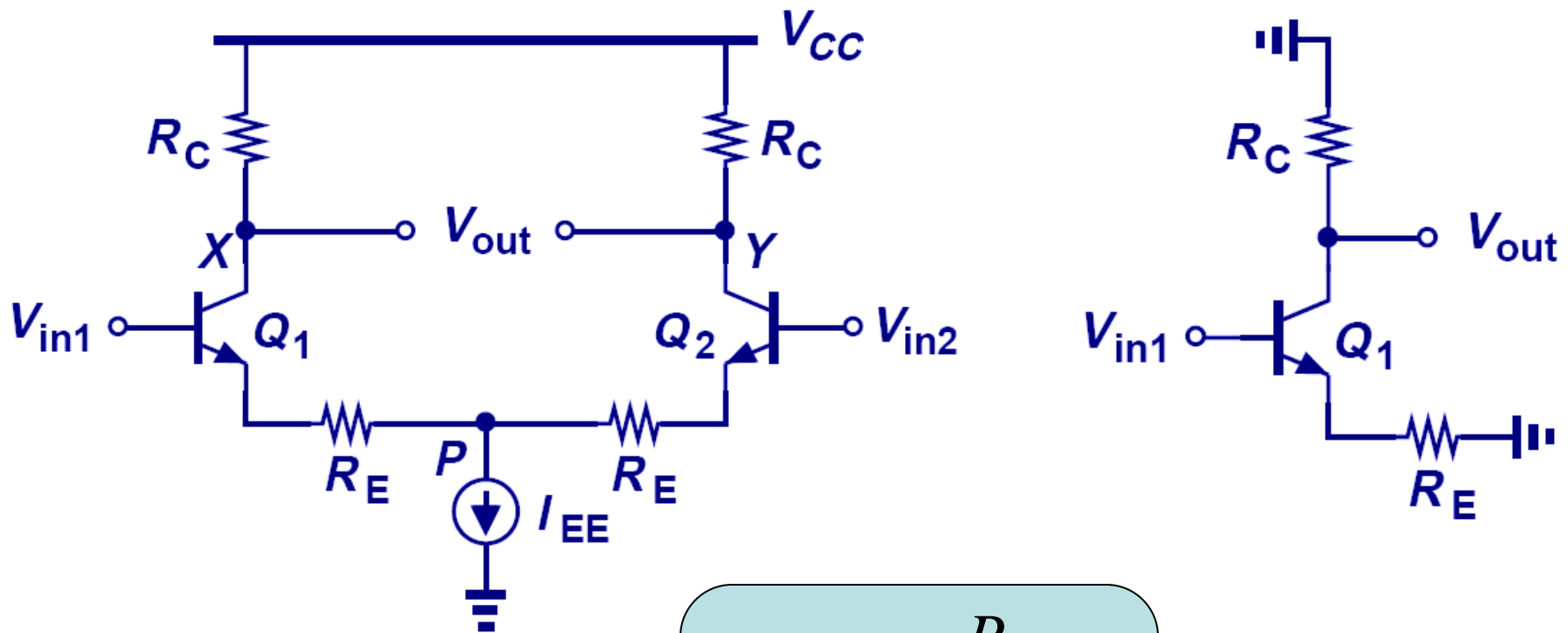


Uzeti da je $R_1=R_2$



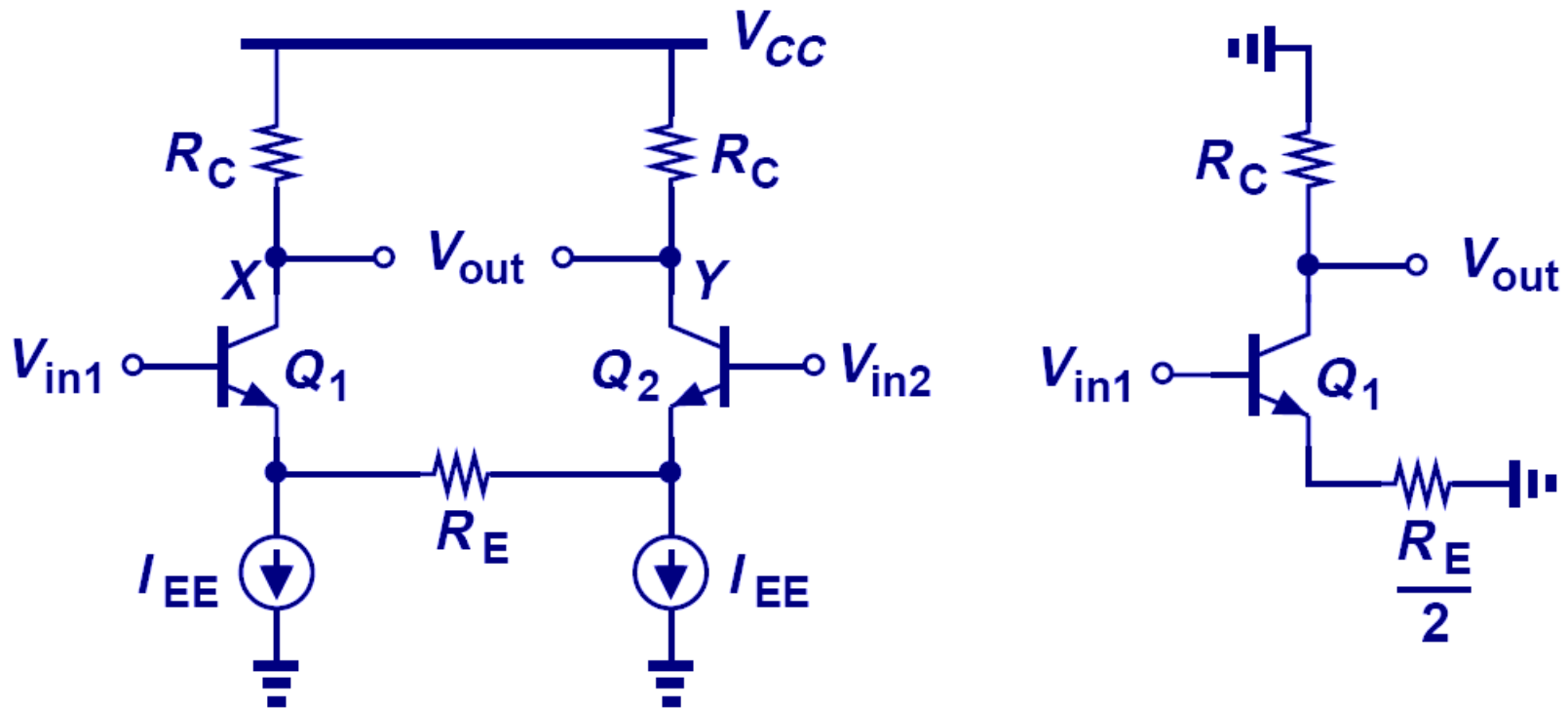
$$A_v = -g_{m1}(r_{O1} \parallel r_{O3} \parallel R_1)$$

Primjer II: Provjeriti!



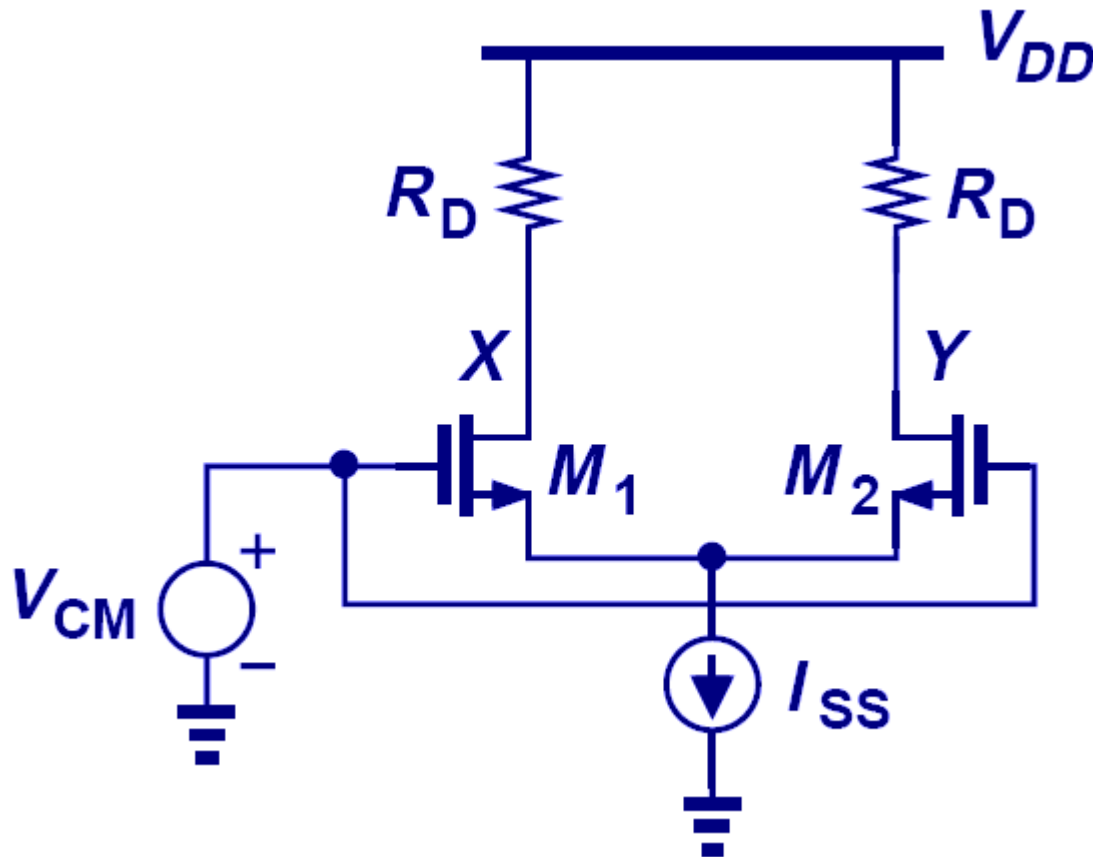
$$A_v = - \frac{R_C}{R_E + \frac{1}{g_m}}$$

Primjer III: Provjeriti!



$$A_v = - \frac{R_C}{\frac{R_E}{2} + \frac{1}{g_m}}$$

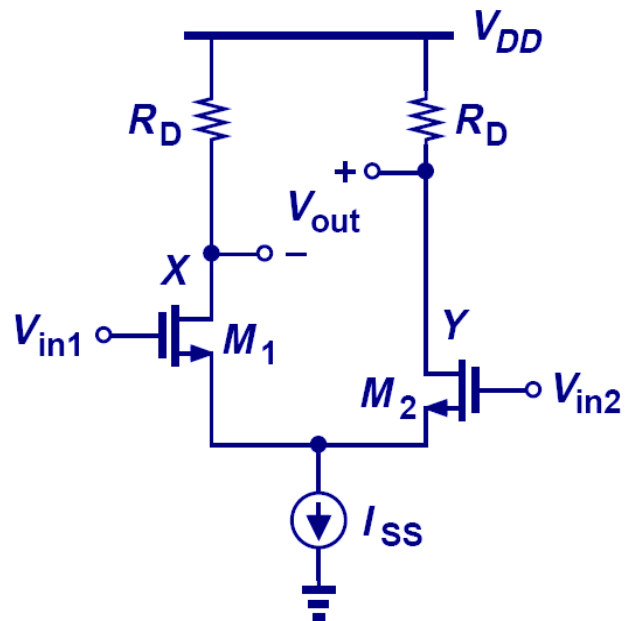
MOS Diferencijalni par – Odziv na zajednički signal



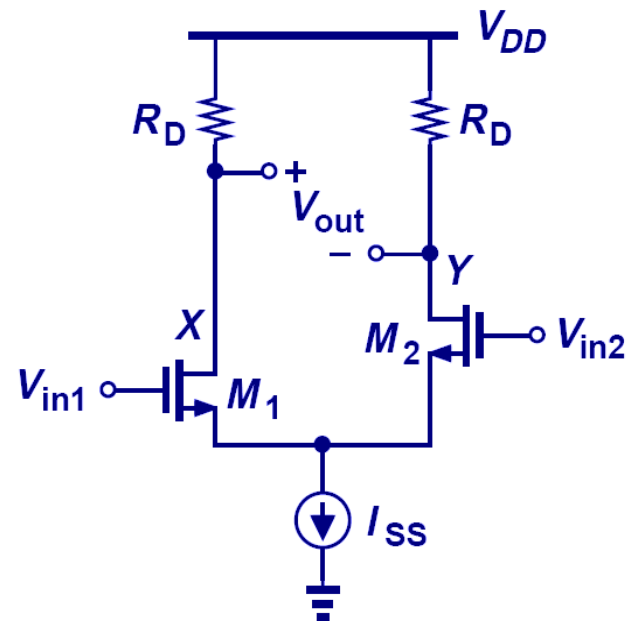
$$V_X = V_Y = V_{DD} - R_D \frac{I_{SS}}{2}$$

- Slično kao kod BJT, MOS diferencijalni par daje nulu na izlazu za zajednički ulazni signal.

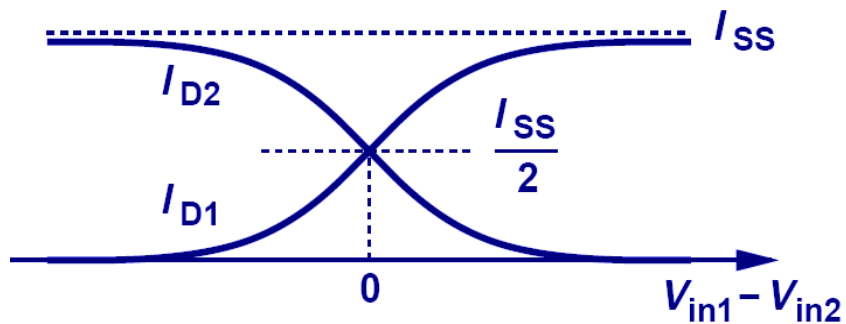
Odziv na diferencijalni signal



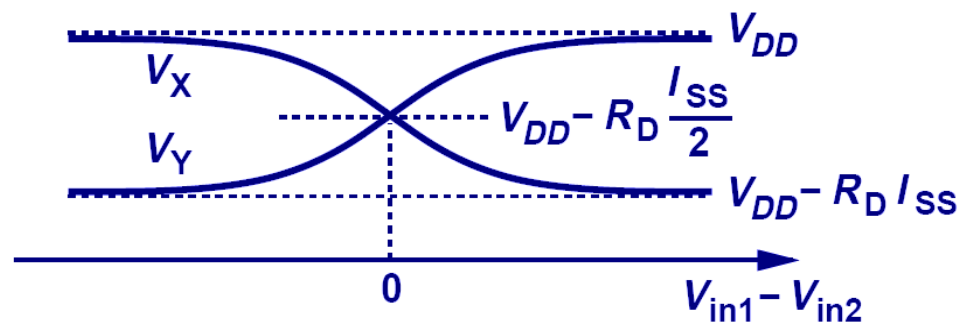
(a)



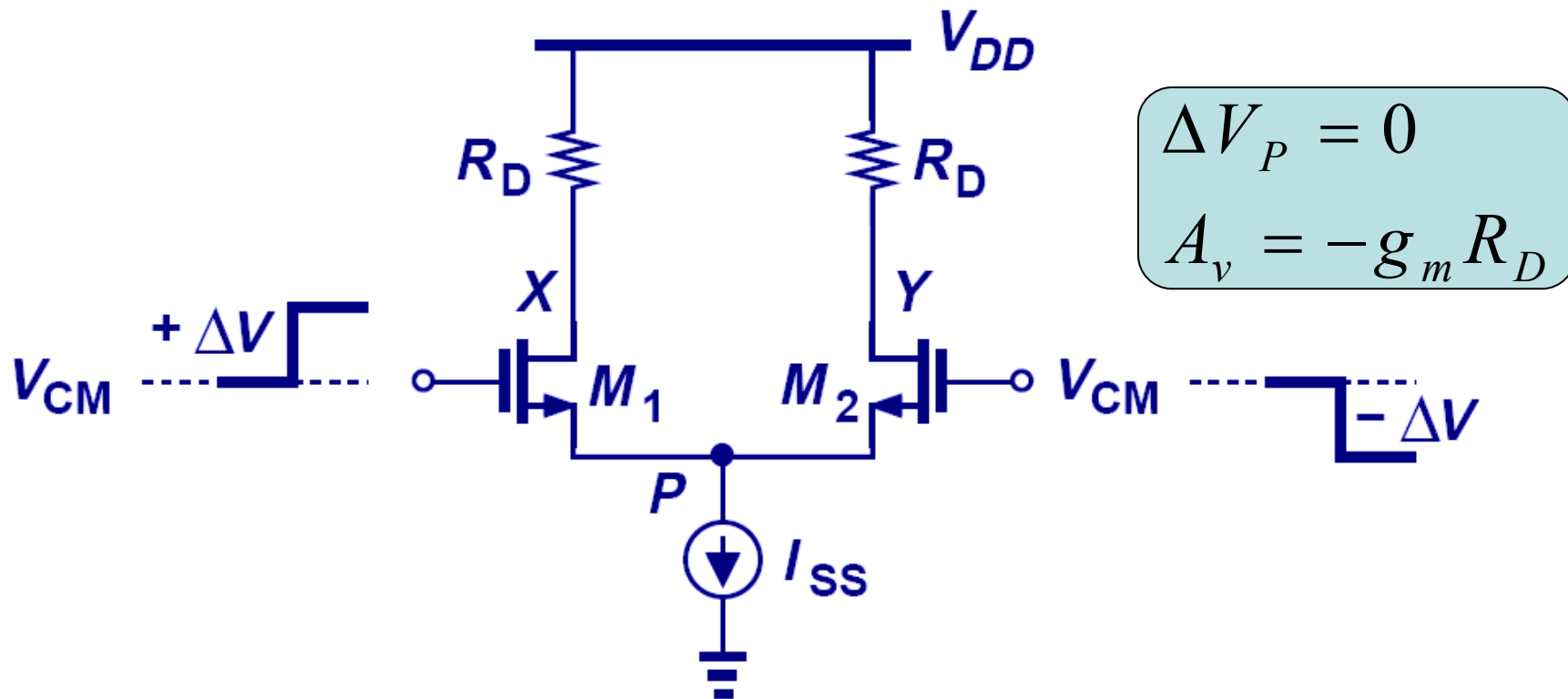
(b)



(c)

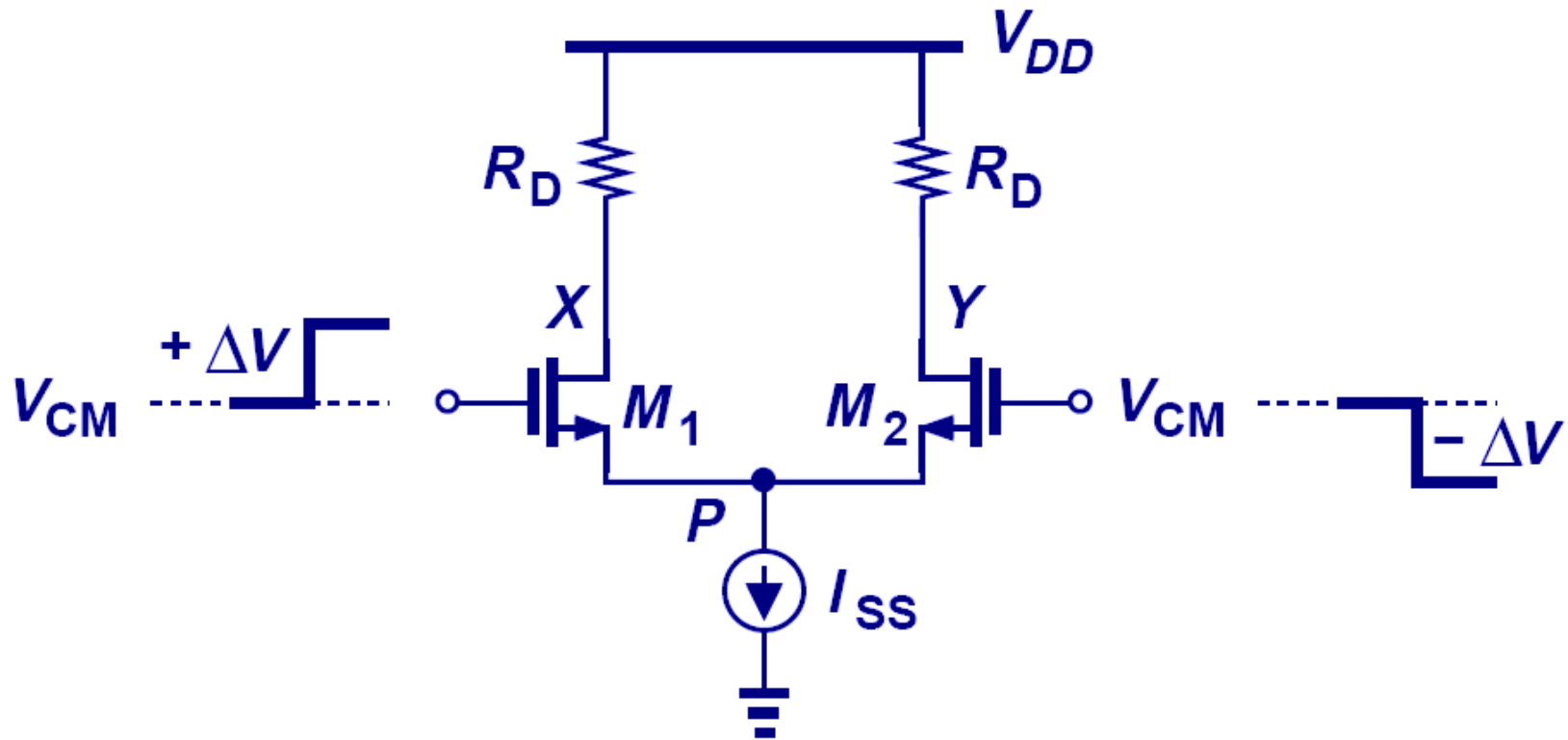


Odziv na mali signal



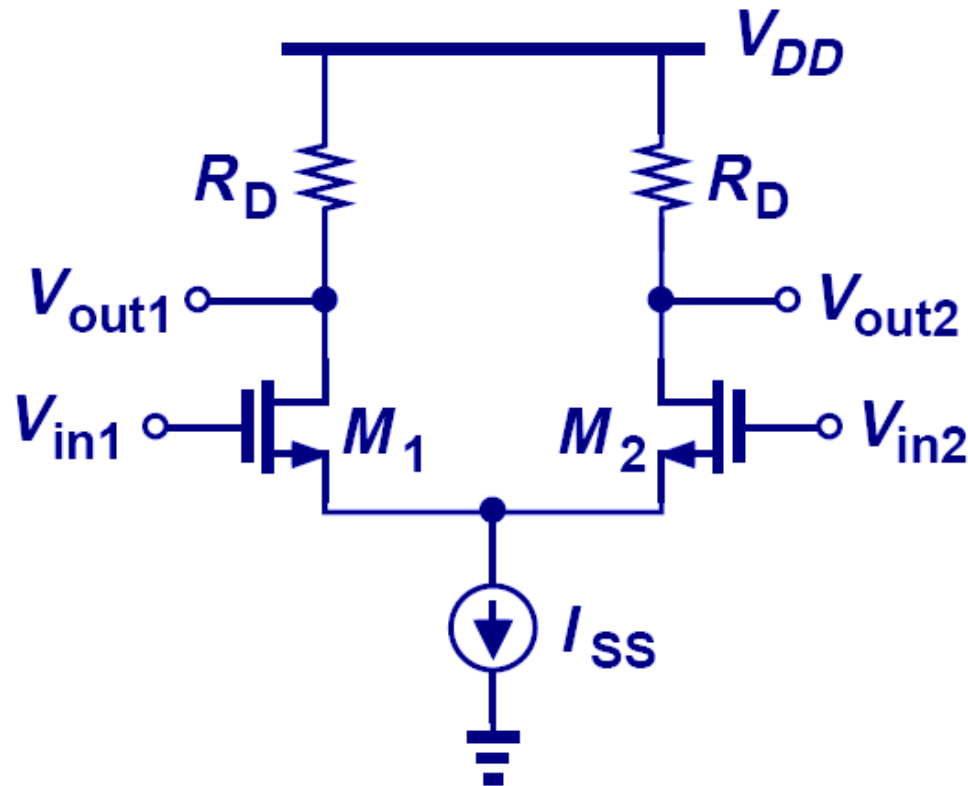
- Slično kao kod BJT pandana, MOS diferencijalni par ima istu tačku virtuelne mase i isto pojačanje.

Snaga i pojačanje



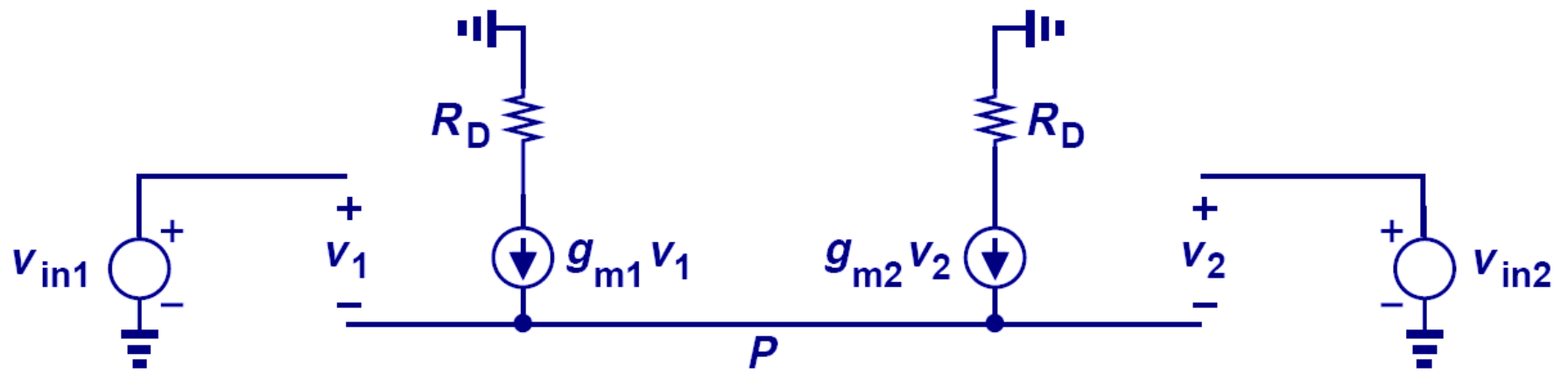
- Da bi se dobilo pojačanje kao kod ZS pojačavača, MOS diferencijalni par mora disipirati dvostruku snagu.

Odziv na veliki signal

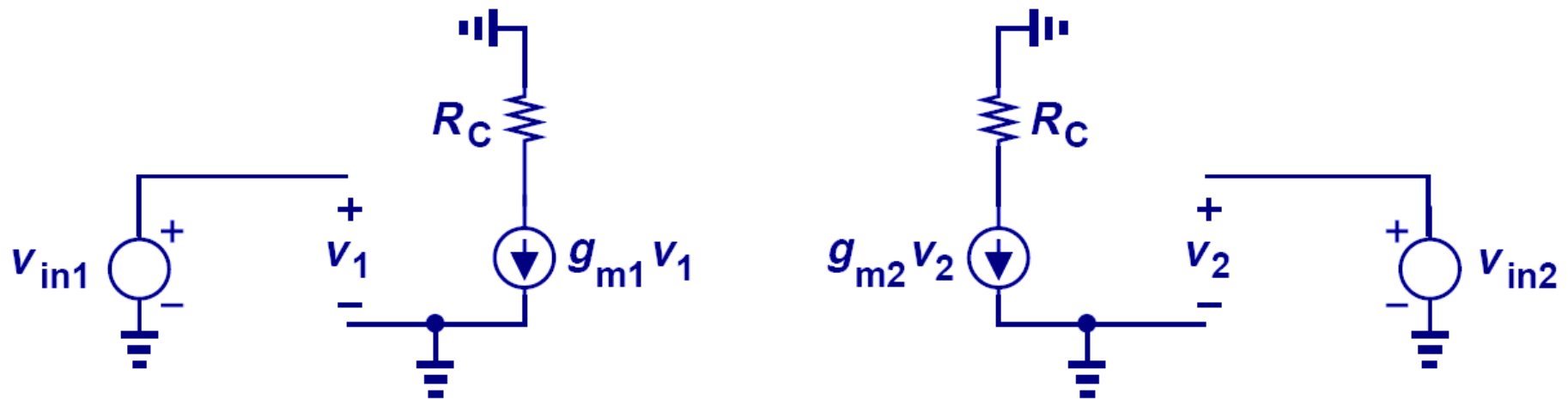


$$I_{D1} - I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{in2}) \sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} - (V_{in1} - V_{in2})^2}$$

Analiza za male signale



Virtuelna masa i polovljenje

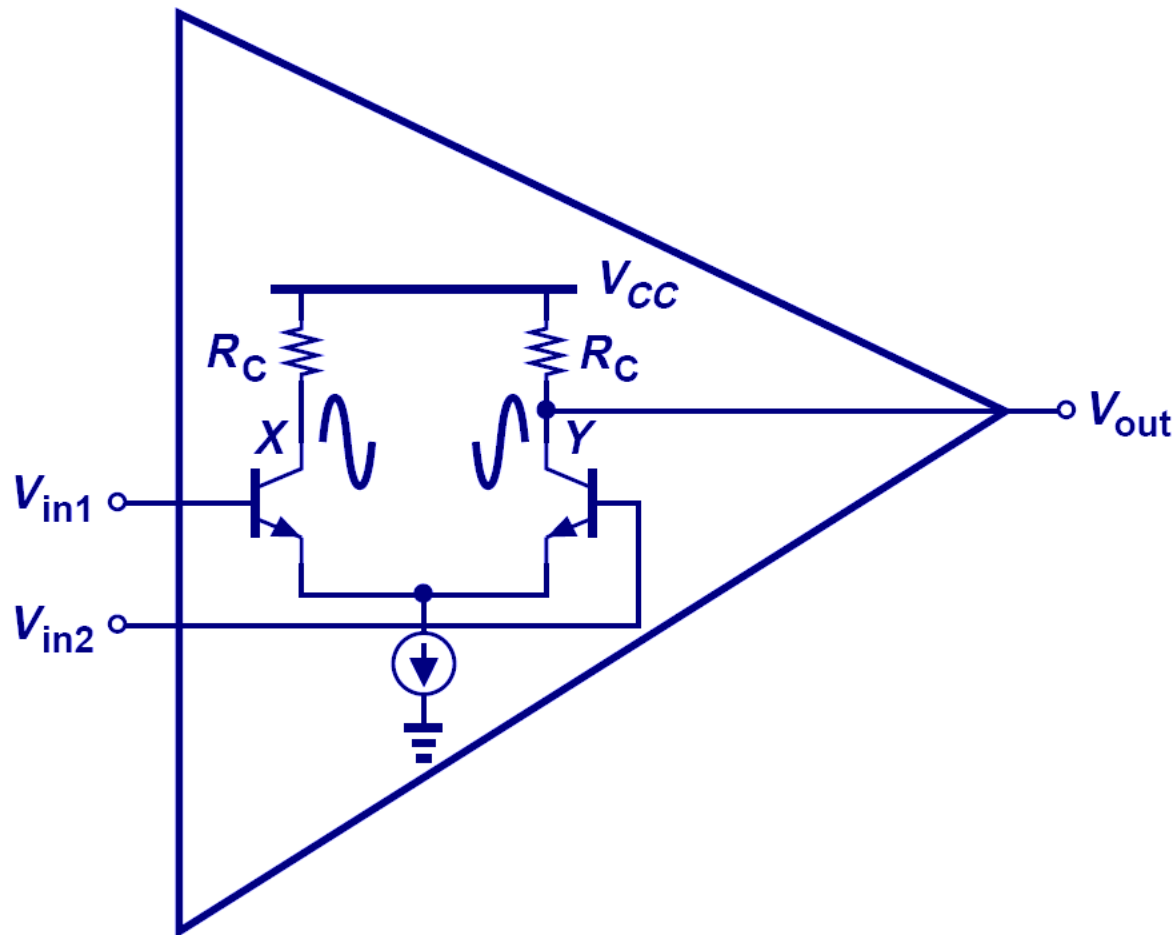


$$\Delta V_P = 0$$

$$A_v = -g_m R_C$$

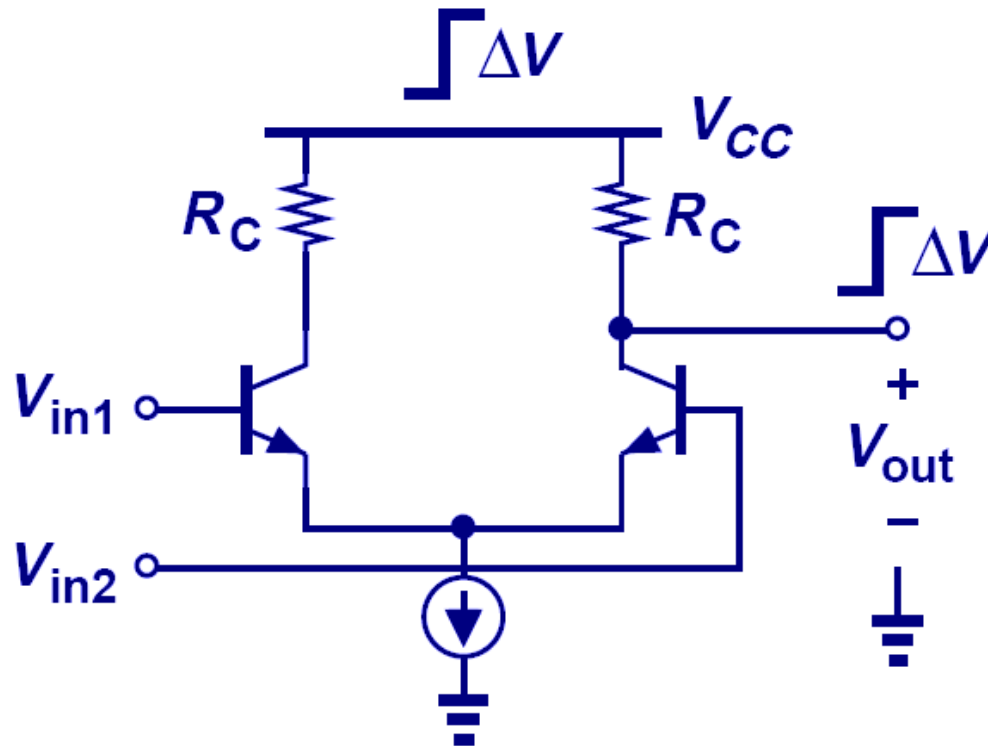
- Primjenjujući istu analizu kao kod bipolarnog tranzistora, dolazi se do istog zaključka da napon u tački P se neće mijenjati pod uticajem signala, pa se može poloviti.

Konverzija diferencijalnog u jednostruki signal



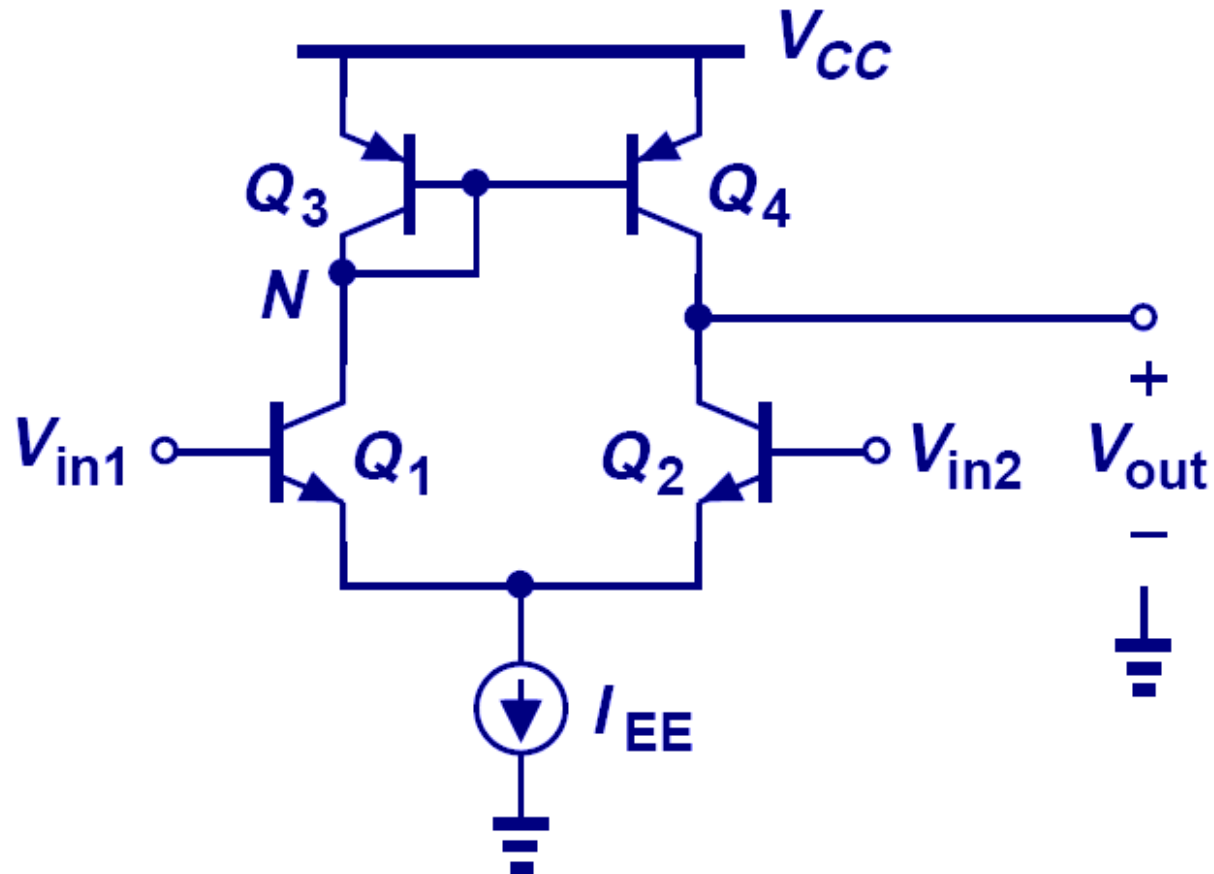
- Mnoga kola zahtijevaju konverziju diferencijalnog u jednostruki signal.

Zahvaćenost šumom napajanja



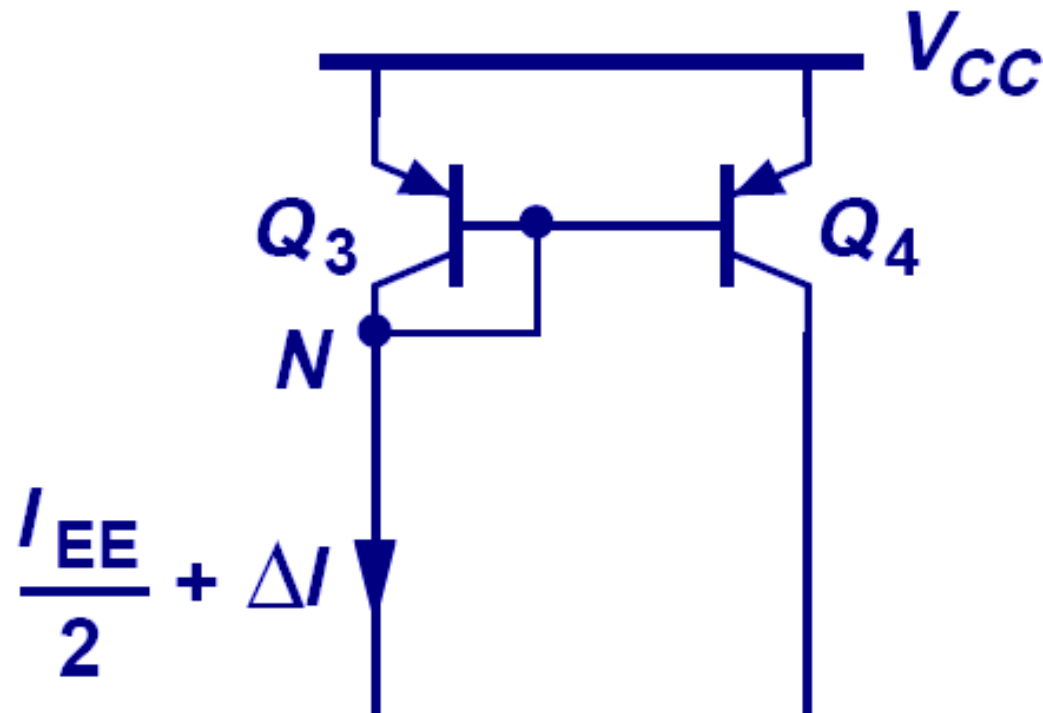
- Najkritičniji nedostatak ove topologije je to što se šum iz napona napajanja prenosi na izlaz, jer ne postoji mehanizam za uklanjanje uticaja zajedničkog signala.
- Takođe se gubi i pola izlaznog signala.

Bolje rješenje



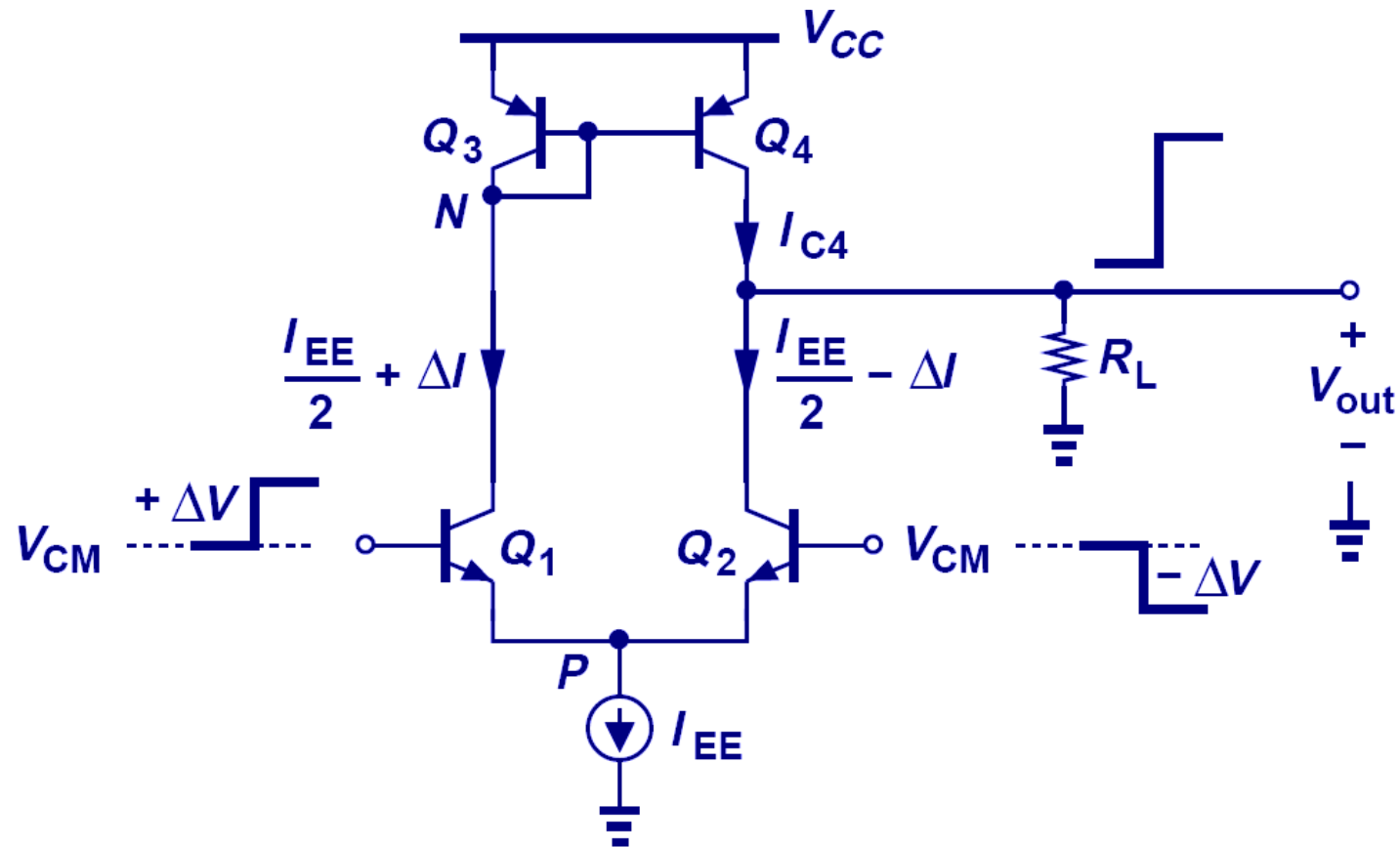
- Ovakva realizacija predstavlja bolje rješenje za konvertovanje diferencijalnog u jednostruki signal.
- Nema gubitka pojačanja.

Aktivno opterećenje

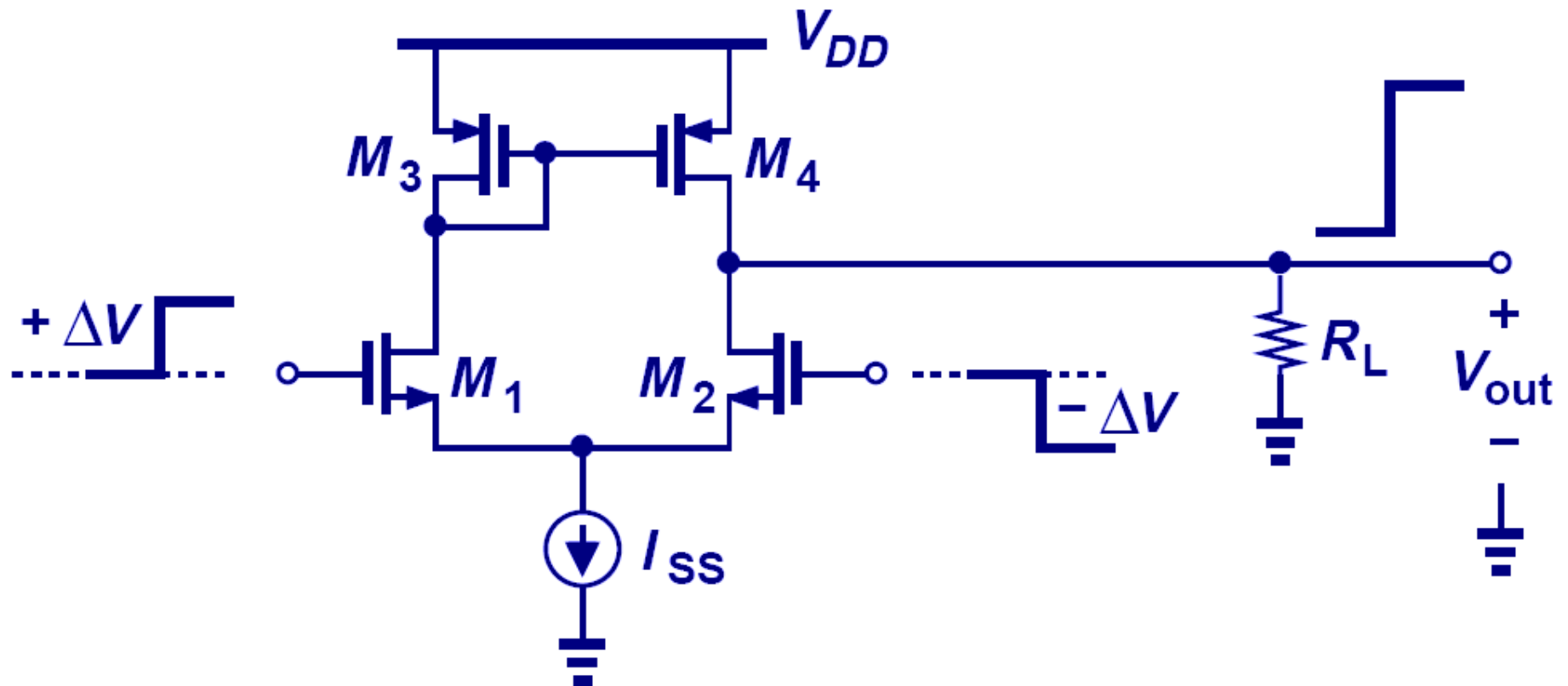


- Upotrebom strujnog ogledala kao opterećenja, strujni signal generisan u Q_3 replicira se u Q_4 .
- Ovaj tip opterećenja različit je od konvencionalnog “statičkog opterećenja” i poznato je kao “aktivno opterećenje”.

Diferencijalni par sa aktivnim opterećenjem



MOS diferencijalni par sa aktivnim opterećenjem



- Slično kao BJT, MOS diferencijalni par može imati aktivno opterećenje u cilju unapređenja konverzije u jednostruki izlaz.