

ANALOGNA ELEKTRONIKA

5

5

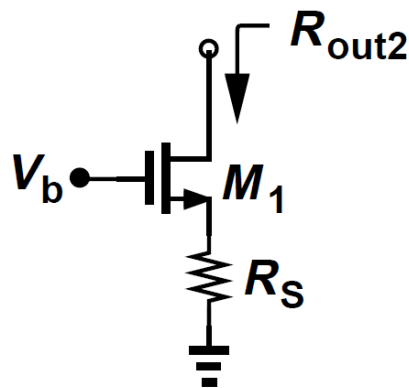
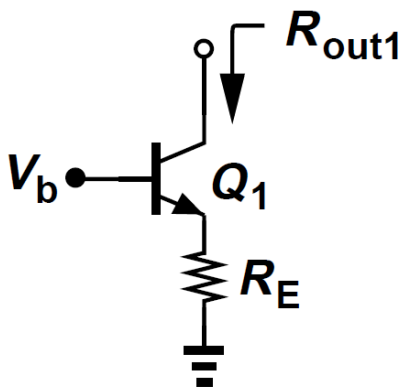
Kaskodni pojačavači i strujna ogledala

Uvod

- Kaskodni stepen je modifikacija topologije sa zajedničkim emitorom, tj. sorsom, i korisna je u projektovanju kola sa visokim performansama
- Strujna ogledala se dosta koriste u integrisanim kolima

Kaskodni stepen

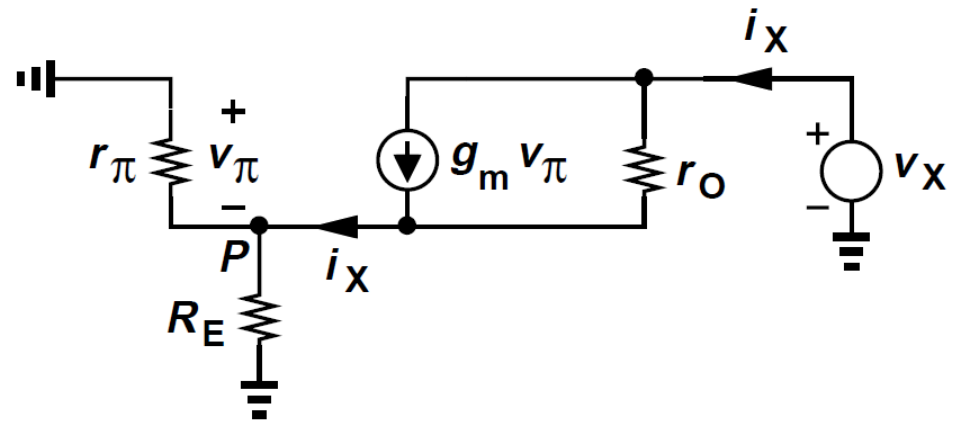
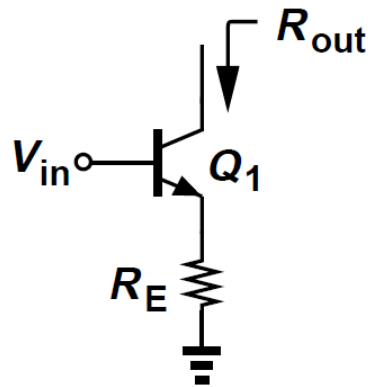
- Pojedinačni tranzistor može da radi kao strujni izvor, ali je njegova izlazna impedansa ograničena zbog Early-jevog efekta (bipolarni) ili modulacije kanala (MOS).
- Kako možemo da povećamo izlaznu impedansu tranzistora koji radi kao strujni izvor?
- **Otpornik u emitoru ili sorsu „pojačava“ impedansu koja se vidi od kolektora ili drejna.**
Nažalost, i pad napona na tom otporniku se proporcionalno povećava.



$$R_{out1} = (1 + g_m r_O)(R_E \parallel r_\pi) + r_O$$

$$R_{out2} = (1 + g_m r_O)R_S + r_O$$

Kaskodni stepen



$$v_{\pi} = -(R_E \parallel r_{\pi}) i_X$$

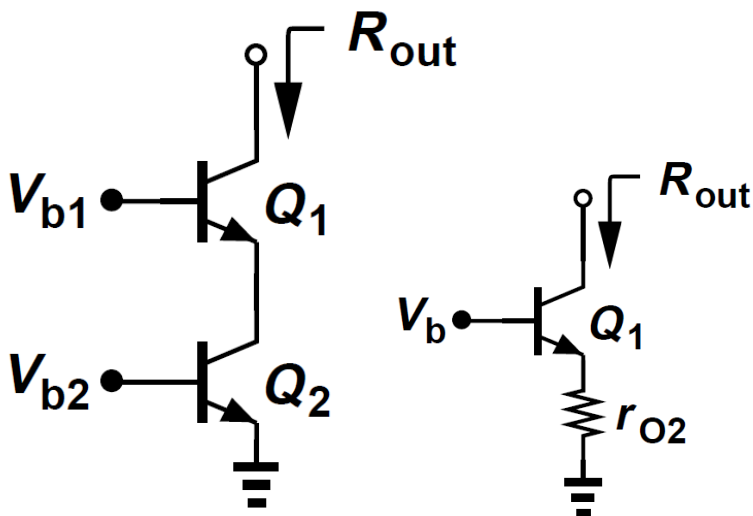
$$v_X = (i_X - g_m v_{\pi}) r_O - v_{\pi}$$

$$v_X = (R_E \parallel r_{\pi})(1 + g_m r_O) i_X + i_X r_O$$

$$R_{out1} = (1 + g_m r_O)(R_E \parallel r_{\pi}) + r_O$$

Bipolarna kaskoda

- Da bi kompromis između izlazne impedanse i pada napona bio što manji, možemo zameniti otpornik tranzistorom. Ideja je da imamo malu otpornost u emitoru Q1 na kojoj je pad napona nezavisan od struje. Na Q2 je u tom slučaju napon od oko 0,4V koji ga drži u zasićenju. Ova konfiguracija se zove kaskodni stepen.
- Q1 i Q2 imaju potpuno različite uloge, pa se Q1 zove kaskodni tranzistor, a Q2 degenerativni.
- Pošto je napon V_{b2} konstantan, ovaj tranzistor se ponaša kao otpornost r_{O2} .



$$R_{out} = (1 + g_{m1}r_{O1})(r_{O2} \parallel r_{\pi1}) + r_{O1}$$

$$R_{out} = [1 + g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{\pi1})]r_{O1} + r_{O2} \parallel r_{\pi1}$$

$$g_{m1}(r_{O2} \parallel r_{\pi1}) \gg 1$$

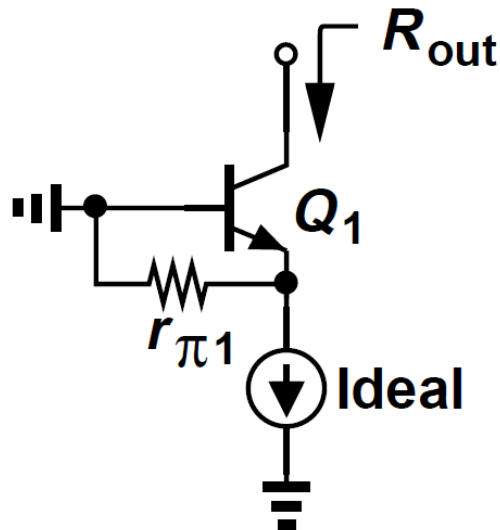
$$R_{out} = g_{m1}r_{O1}(r_{O2} \parallel r_{\pi1})$$

Bipolarna kaskoda

- Ako r_{O2} postane mnogo veće od $r_{\pi1}$, R_{out} postaje:

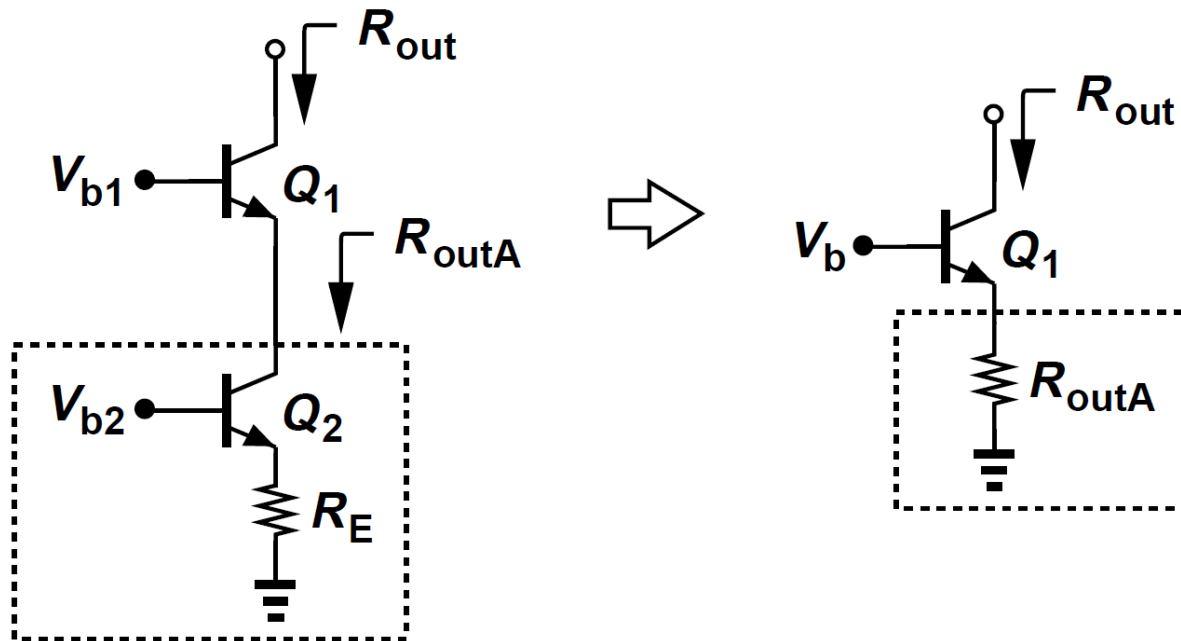
$$R_{out,max} \approx g_{m1} r_{O1} r_{\pi1} \approx \beta_1 r_{O1}$$

- ovo je maksimalna izlazna impedansa bipolarne kaskode



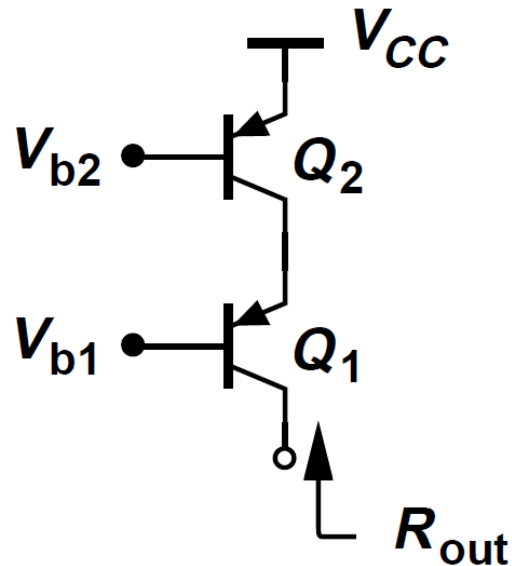
Primer 1

- Potrebno je povećati izlaznu otpornost bipolarnе kaskode 2 puta korišćenjem degenerativnog otpornika u emitoru Q_2 . Odrediti traženu vrednost otpornika ako su Q_1 i Q_2 identični.



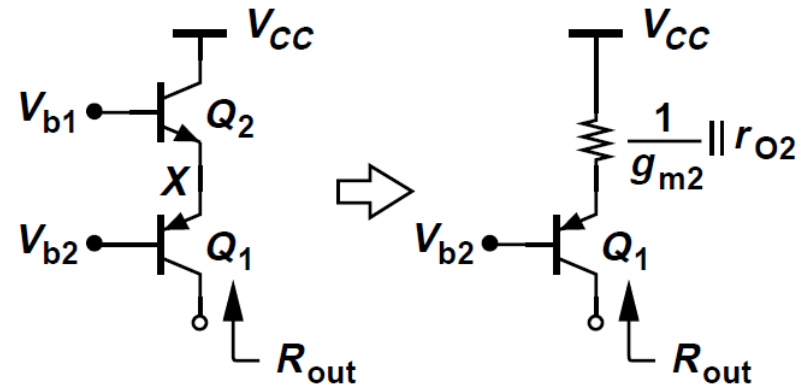
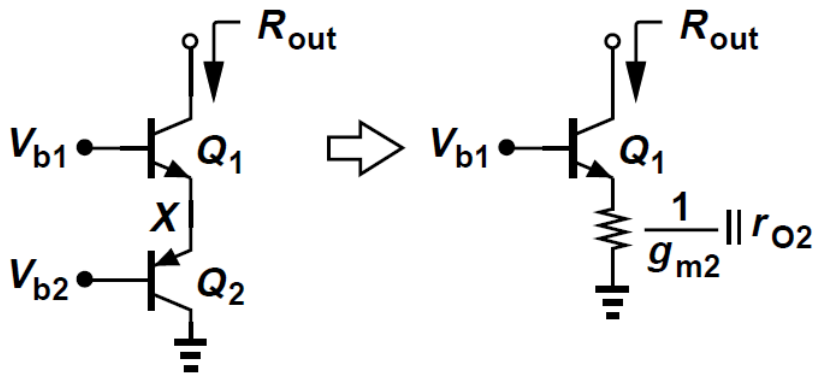
Bipolarna pnp kaskoda

- pnp kaskoda, Q1 je kaskodni tranzistor, a Q2 degeneracioni.

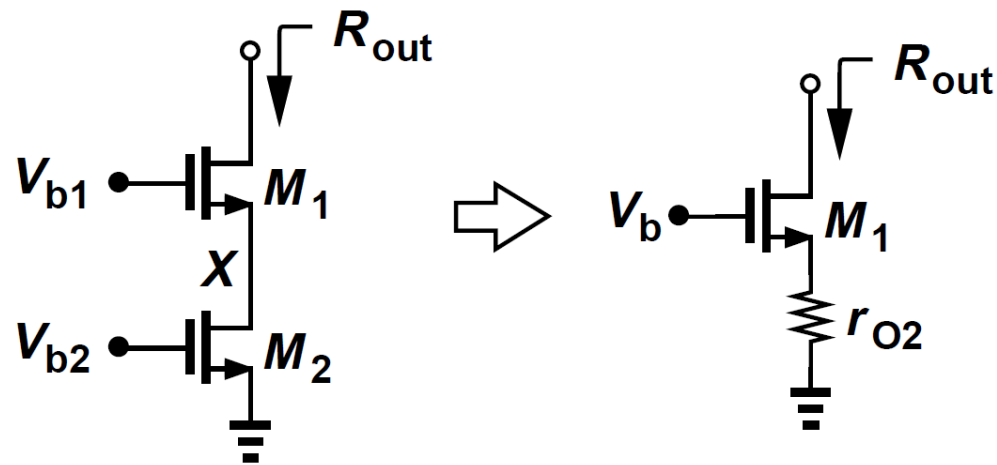


Primer 2

- Objasniti zašto sledeće topologije nisu kaskode.



MOS kaskoda



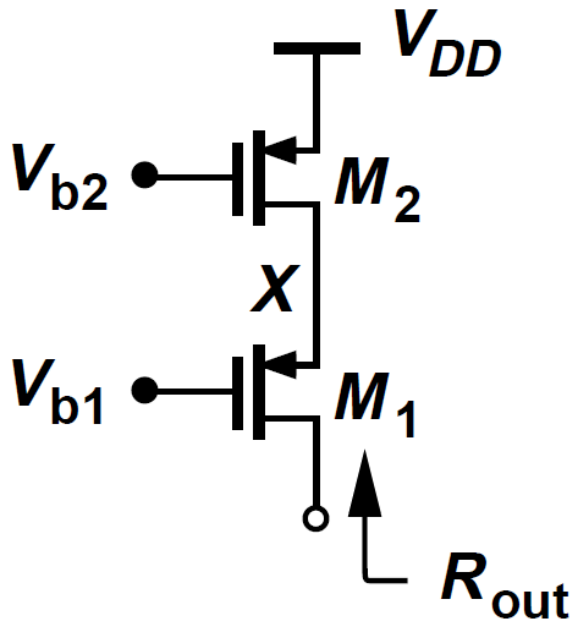
$$R_{out} = (1 + g_{m1}r_{O2}) \cdot r_{O1} + r_{O2}$$

$$R_{out} \approx g_{m1}r_{O1}r_{O2}$$

Primer 3

- Projektovati NMOS kaskodu izlazne impedanse $500\text{k}\Omega$ i struje 0.5mA . Pretpostaviti da su tranzistori M1 i M2 identični. Pretpostaviti $\mu_n C_{ox} = 100 \mu\text{A}/\text{V}^2$ i $\lambda = 0.1\text{V}^{-1}$.

PMOS kaskoda

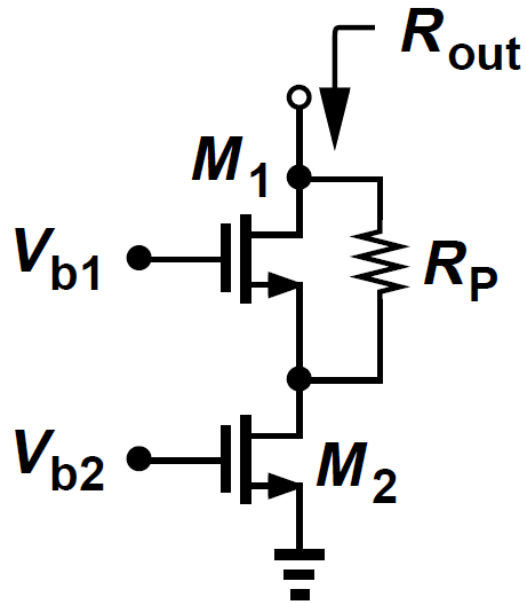


$$R_{out} = (1 + g_{m1}r_{O2})r_{O1} + r_{O2}$$

$$R_{out} \approx g_{m1}r_{O1}r_{O2}$$

Primer 4

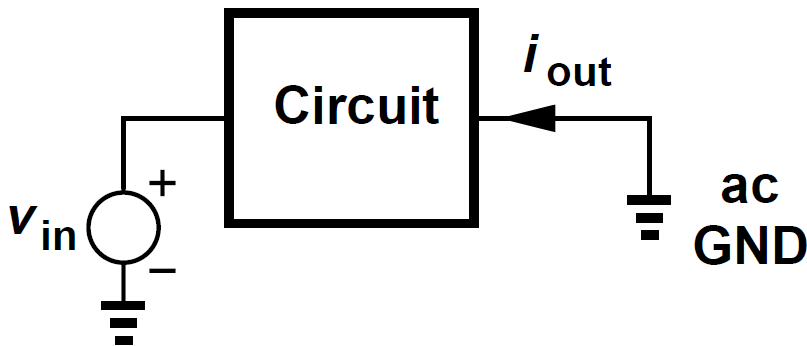
- U toku procesa proizvodnje pojavila se velika parazitna otpornost R_p u kaskodi prikazanoj na slici. Pronaći izlaznu otpornost.



Kaskoda kao pojačavač

Kaskoda može da bude i pojačavač sa velikim pojačanjem.

Transkonduktansa tranzistora je promena u struji kolektora ili drejna podeljena promenom napona baza-emitor ili gej-t-sors. Ovaj koncept se može primeniti i na kola.



$$G_m = \left. \frac{i_{out}}{V_{in}} \right|_{v_{out}=0}$$

Transkonduktansa predstavlja „jačinu“ kola u konvertovanju ulaznog napona u struju.

Kaskoda kao pojačavač

LEMA:

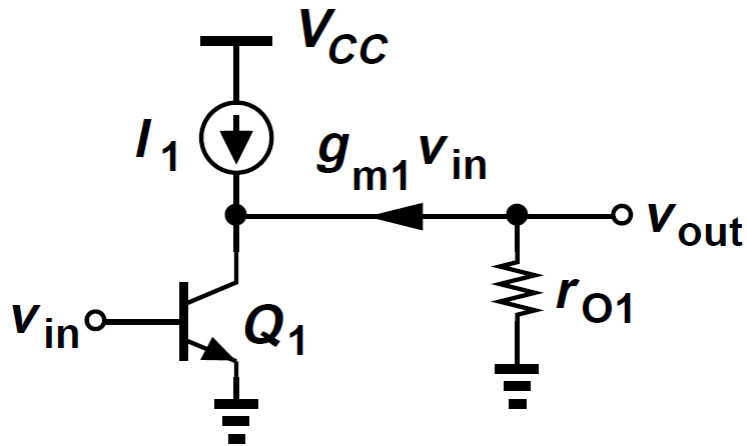
Naponsko pojačanje linearnog kola može se izraziti kao:

$$A_v = -G_m R_{out}$$

R_{out} je izlazna otpornost kola (kada je ulazni napon 0)

Bipolarni kaskodni pojačavač

Da bi se dobilo maksimalno naponsko pojačanje stepena sa zajedničkim emitorom, mora se maksimizovati opterećenje kolektora.

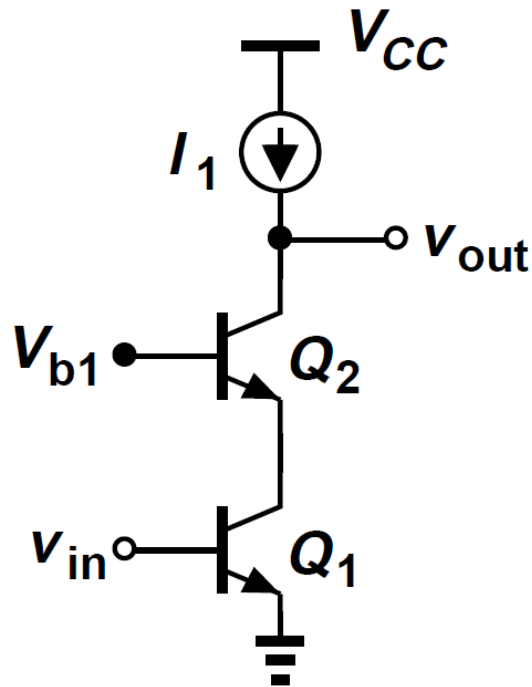


$$A_v = -g_{m1}r_{O1}$$

izlazni napon: $-g_{m1}v_{in}r_{O1}$

Bipolarni kaskodni pojačavač

dodajemo tranzistor Q2 da bismo povećali izlaznu impedansu i dobili veliko naponsko pojačanje



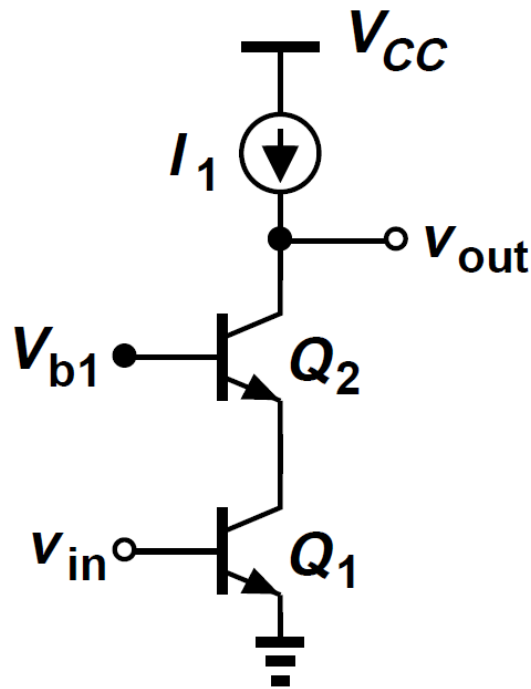
$$A_v \approx -g_{m1} r_{O1} g_{m1} (r_{O1} \parallel r_{\pi 2})$$

dobijamo pojačanje veće za ovaj faktor, što je vrlo veliko:

$$g_{m1} (r_{O1} \parallel r_{\pi 2})$$

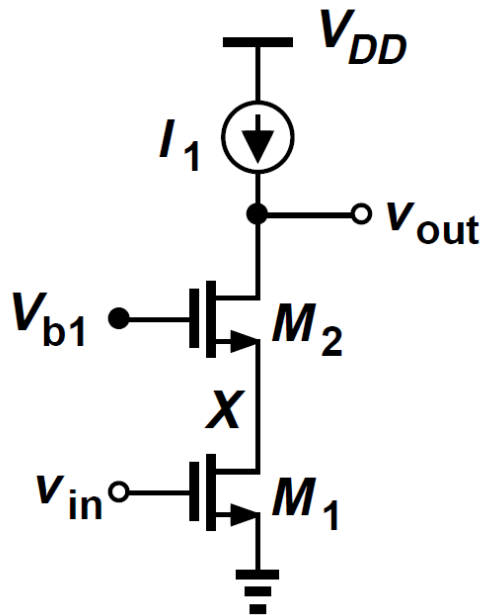
Primer 5

- Bipolarna kaskoda se pobuđuje strujom od 1mA. Ako je $V_A=5V$ i $\beta=100$ za oba tranzistora, odrediti naponsko pojačanje kaskode.



CMOS kaskodni pojačavač

dodajemo tranzistor M2 da bismo dobili veliko naponsko pojačanje



$$A_v \approx -g_{m1}r_{O1}g_{m2}r_{O2}$$

dobijamo pojačanje veće za ovaj faktor, što je vrlo veliko:

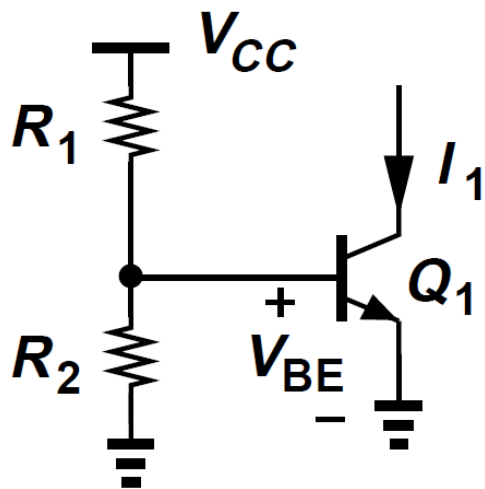
$$g_{m2}r_{O2}$$

Strujna ogledala

uvod

Pobudne struje u stepenima sa zajedničkim emitorom i sorsom su funkcija napona napajanja – koji nije uvek stabilan.

Takođe, temperatura utiče na karakteristike struje (mobilni telefon).



$$V_{BE} = V_T \ln \frac{I_1}{I_S}$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = V_T \ln \frac{I_1}{I_S}$$

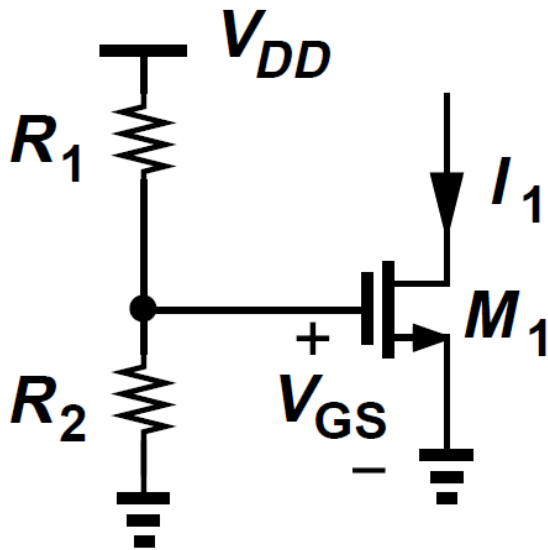
$$V_T = \frac{kT}{q} \quad I_S = f(T)$$

Struja I_1 nije konstantna čak i ako je V_{BE} konstantno

Strujna ogledala

uvod

Slično je i kod MOS tranzistora



$$I_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - V_{TH} \right)^2$$

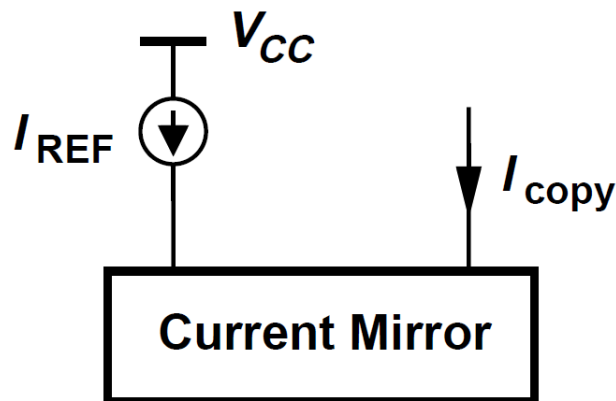
Mobilnost elektrona i napon praga zavise od temperature, pa struja I_1 nije konstantna čak i ako je V_{GS} konstantno

Strujna ogledala

uvod

Čemu služe strujna ogledala?

- Referentni izvor napona se koristi za dobijanje stabilnog napona
- Nepraktično je koristiti puno takvih izvora jer su suviše složeni
- zato se „stabilna“ struja koja se dobije „kopira“



$$I_{copy} = I_{REF}$$

ili

$$I_{copy} = 2I_{REF}$$

ili

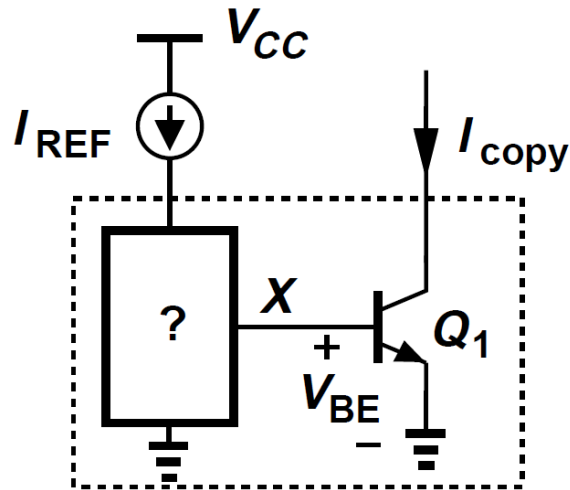
$$I_{copy} = nI_{REF}$$

Bipolarno strujno ogledalo

Kako treba realizovati „crnu kutiju“?

„Crna kutija“ treba da generiše izlazni napon V_X , takav da kroz Q_1 protiče struja jednaka I_{REF}

$$I_{S1} \exp \frac{V_X}{V_T} = I_{REF}$$



Na osnovu toga „crna kutija“ treba da zadovolji uslov:

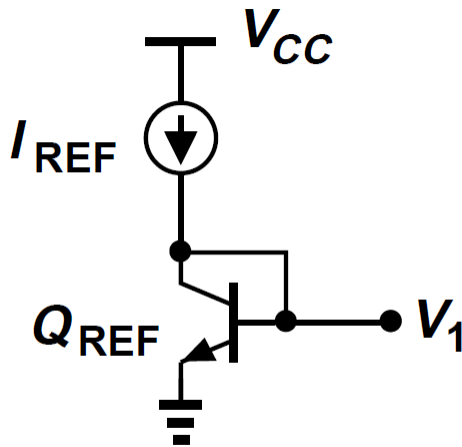
$$V_X = V_T \ln \frac{I_{REF}}{I_{S1}}$$

$$I_{copy} = I_{REF}$$

Bipolarno strujno ogledalo

Tražimo kolo čiji je izlazni napon proporcionalan prirodnom logaritmu njegovog ulaza:

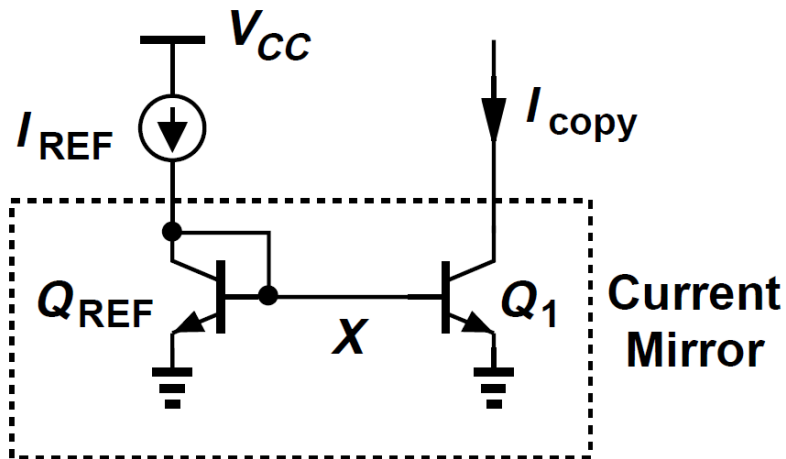
$$V_1 = V_T \ln \frac{I_{REF}}{I_{S,REF}}$$



$I_{S,REF}$ je inverzna struja zasićenja za Q_{REF}

$V_1 = V_X$ ako je $I_{S,REF} = I_S$, i Q_{REF} je identično sa Q_1

Bipolarno strujno ogledalo



$$I_{REF} = I_{S,REF} \exp \frac{V_X}{V_T}$$

$$I_{copy} = I_{S1} \exp \frac{V_X}{V_T}$$

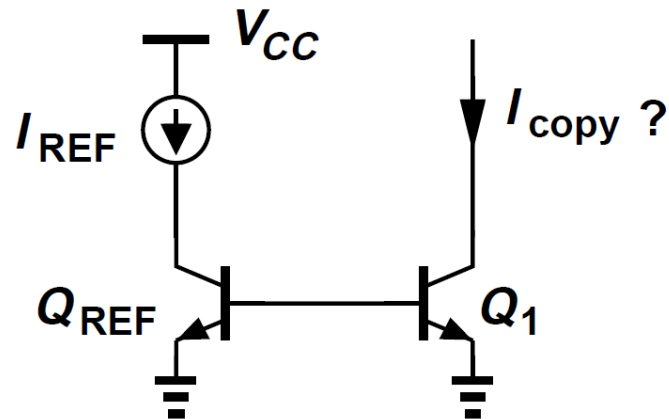
$$I_{copy} = \frac{I_{S1}}{I_{S,REF}} I_{REF}$$

$$I_{copy} = I_{REF}$$

Ovo važi kada su Q_1 i Q_{REF} identični, čak i kada V_T i I_S variraju sa temperaturom. Struje baza su zanemarene.

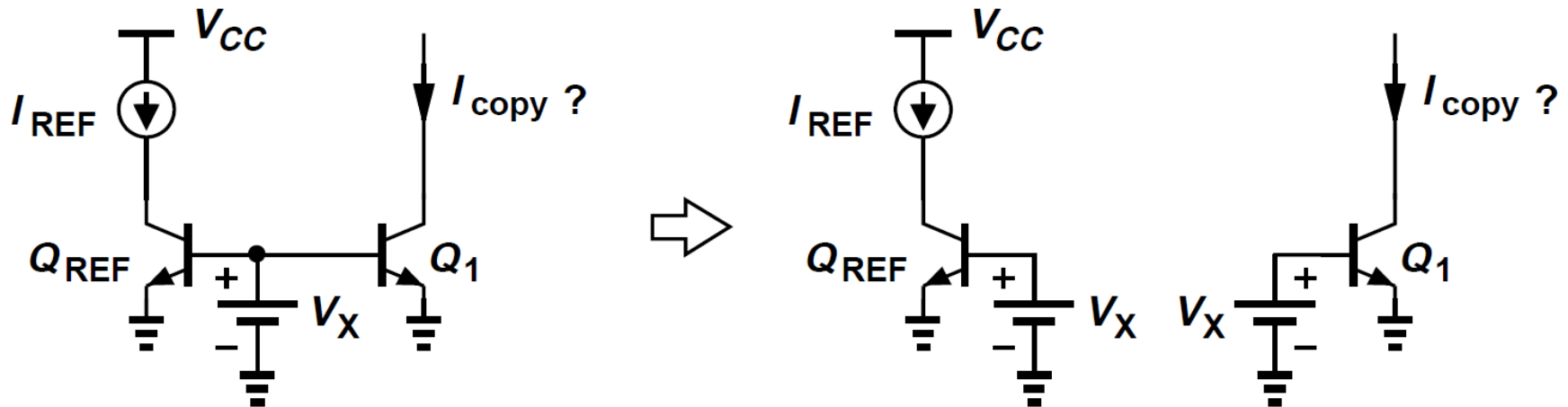
Primer 6

- Student elektronike je zaboravio da poveže bazu tranzistora Q_{REF} sa kolektorom. Objasniti šta se dešava.



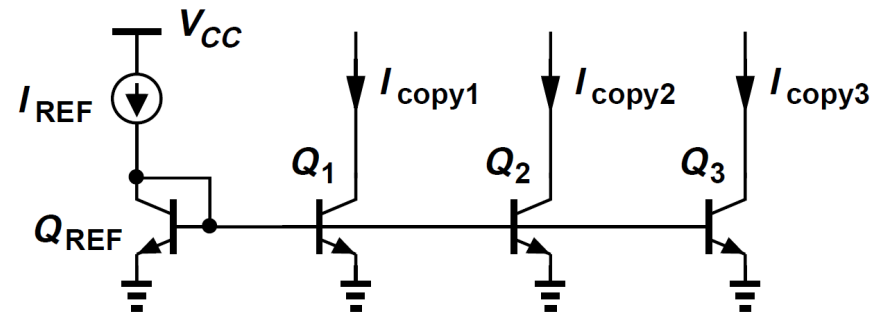
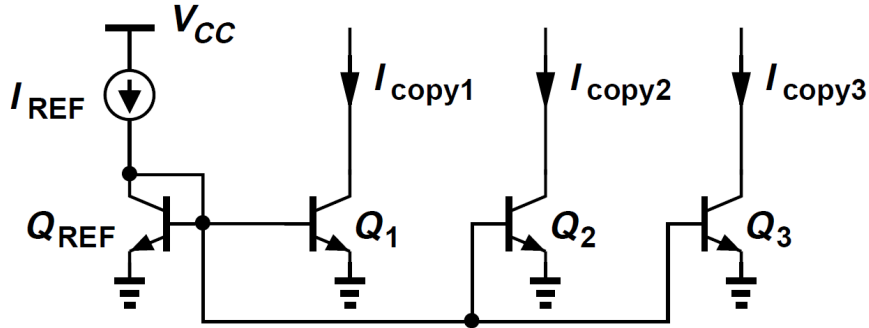
Primer 7

- Pokušavajući da reši grešku iz prethodnog primera, student elektronike je napravio modifikaciju sa slike, nadajući se da će baterija V_X obezbediti baznu struju i definisati napon baza-emitor tranzistora Q_{REF} i Q_1 . Objasniti šta se dešava.



Bipolarno strujno ogledalo

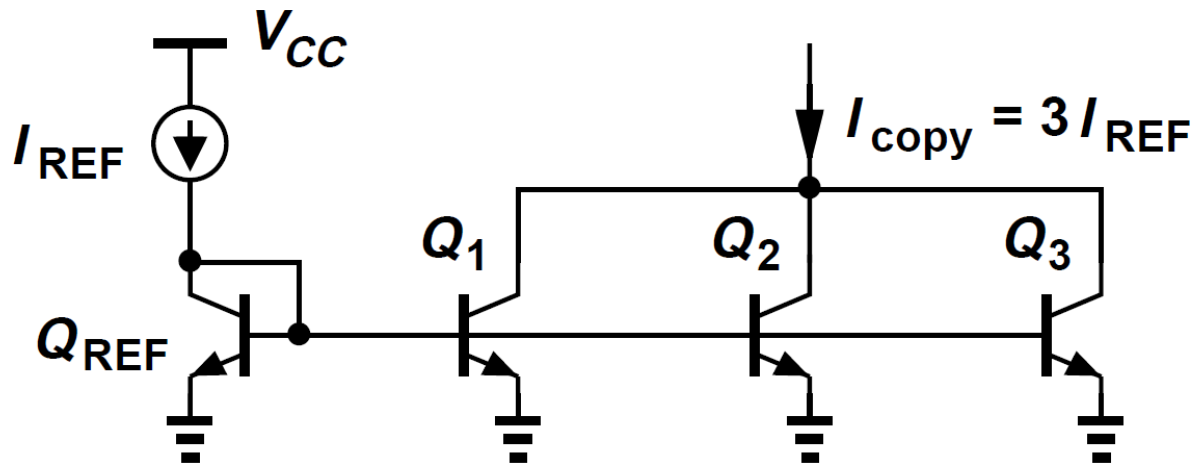
Kako napraviti dodatne kopije struje I_{REF} , i kako dobiti različite vrednosti ovih kopija, npr. $2I_{REF}$, $5I_{REF}$, itd. ???



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

Ove dodatne kopije se prave sa minimalnim dodatnim naporom, jer I_{REF} i Q_{REF} nema potrebe više duplicirati

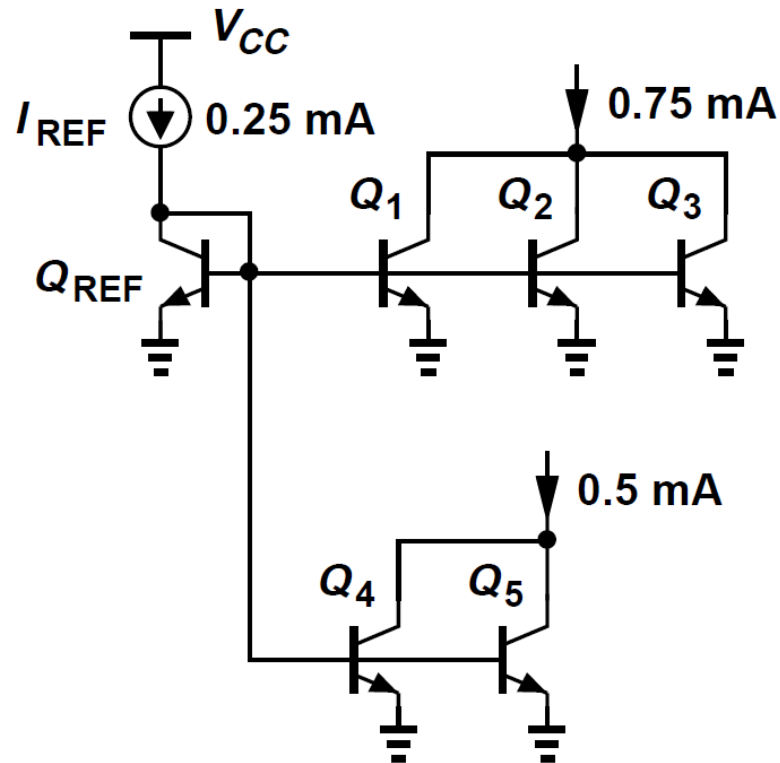
Bipolarno strujno ogledalo



$$I_{copy} = 3 \cdot I_{REF}$$

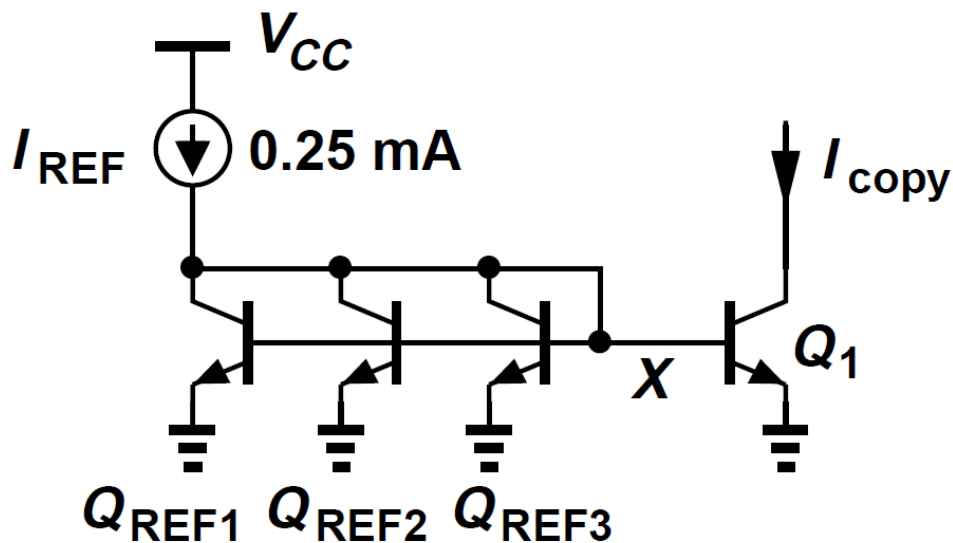
Primer 8

- Višestepeni pojačavač ima dva strujna izvora vrednosti 0.75mA i 0.5mA. Korišćenjem referentne struje od 0.25mA, projektovati željene izvore.



Bipolarno strujno ogledalo

Kako napraviti razlomljene delove kopije struje I_{REF} ???



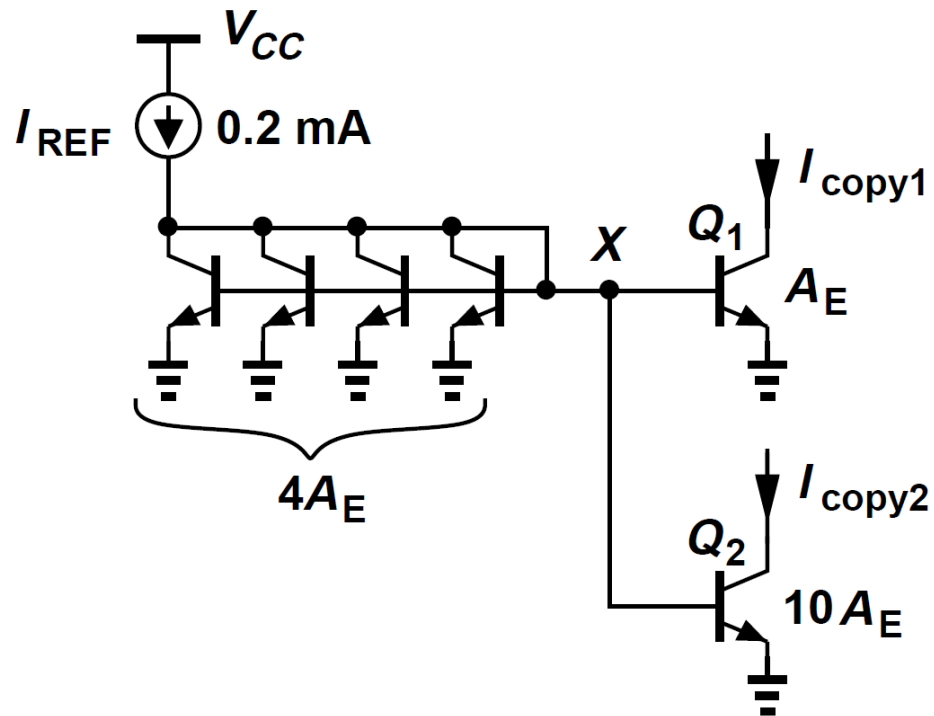
$$I_{REF} = 3I_S \exp \frac{V_X}{V_T}$$

$$I_{copy} = I_S \exp \frac{V_X}{V_T}$$

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

Primer 9

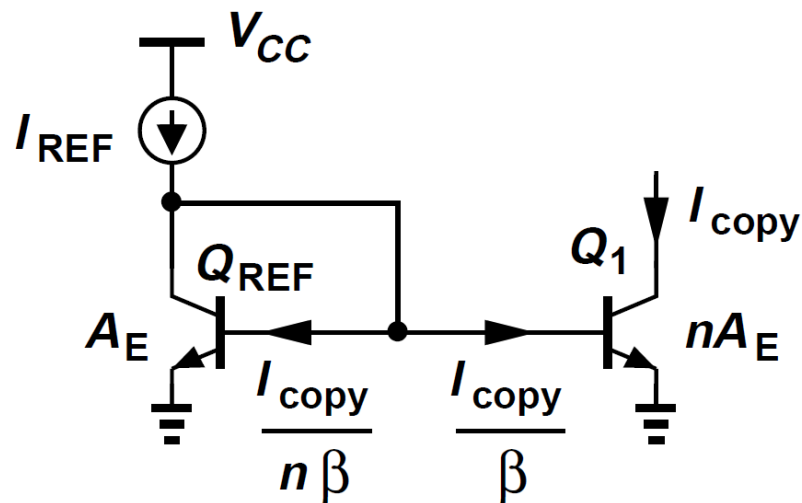
Potrebno je pomoću referentnog izvora od $200\mu\text{A}$ generisati dva izvora od $50\mu\text{A}$ i $500\mu\text{A}$.



Bipolarno strujno ogledalo

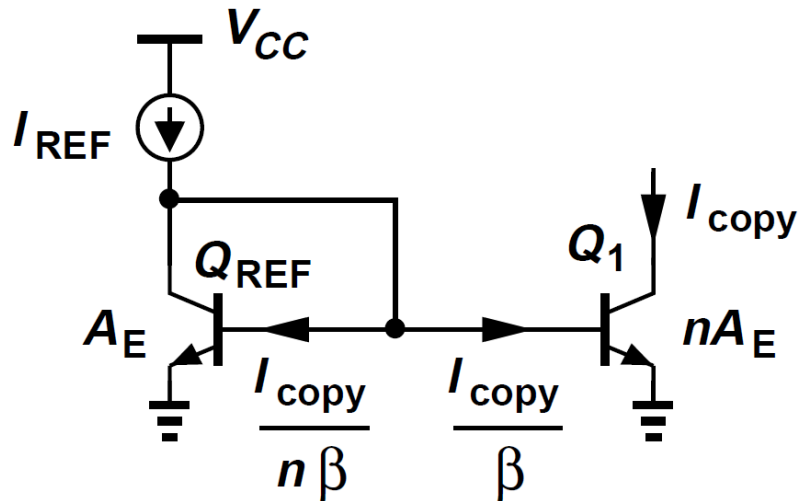
uticaj bazne struje

Do sada smo zanemarivali struju baze koja iz čvora X ide ka svim tranzistorima. Greška je veća što je broj tranzistora veći.



Bipolarno strujno ogledalo

uticaj bazne struje



$$I_{B1} = \frac{I_{copy}}{\beta}$$

$$I_{B,REF} = \frac{I_{copy}}{\beta} \cdot \frac{1}{n}$$

$$I_{REF} = I_{C,REF} + \frac{I_{copy}}{\beta} \cdot \frac{1}{n} + \frac{I_{copy}}{\beta}$$

$$I_{C,REF} = \frac{I_{copy}}{n}$$

→

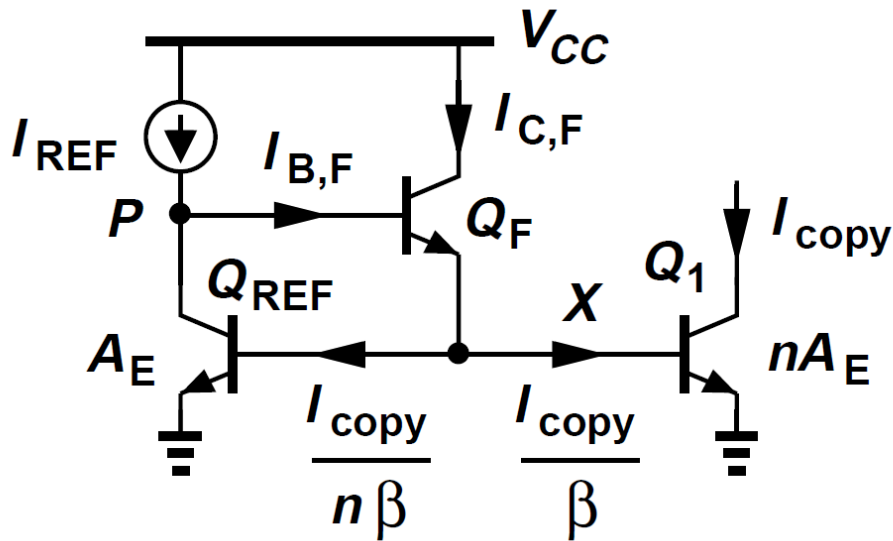
$$I_{copy} = \frac{nI_{REF}}{1 + \frac{1}{\beta}(n+1)}$$

Ako je β veliko, a n malo, drugi član u imeniocu je mnogo manji od 1, pa je: $I_{copy} \approx nI_{REF}$
 Kako se broj kopiranih struja povećava, tako raste i greška.

Bipolarno strujno ogledalo

uticaj bazne struje

Tranzistor Q_F se ubacuje između kolektora Q_{REF} i čvora X, tako smanjujući uticaj bazne struje za faktor β . Ako je $I_{C,F} \approx I_{E,F}$, možemo pisati:

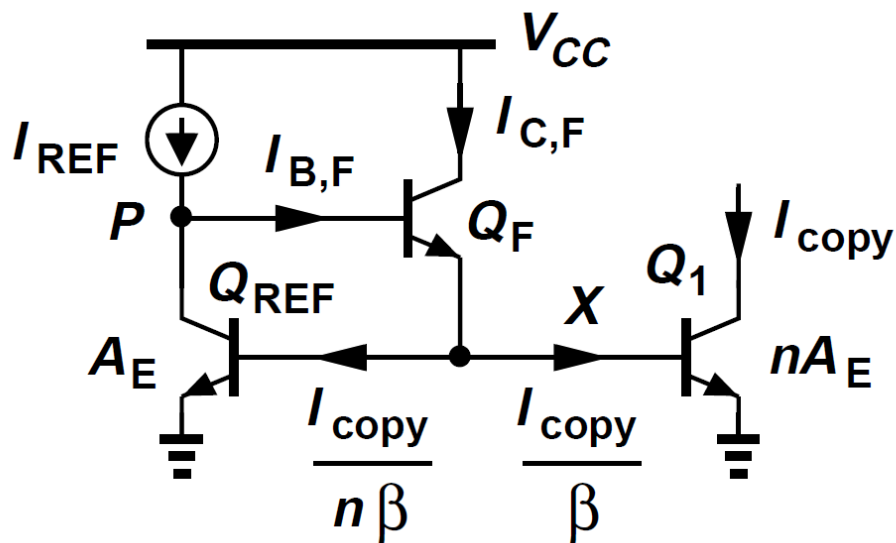


$$I_{C,F} = \frac{I_{copy}}{\beta} + \frac{I_{copy}}{\beta} \cdot \frac{1}{n}$$

$$I_{B,F} = \frac{I_{copy}}{\beta^2} \left(1 + \frac{1}{n} \right)$$

Bipolarno strujno ogledalo

uticaj bazne struje



$$I_{REF} = I_{B,F} + I_{C,REF}$$

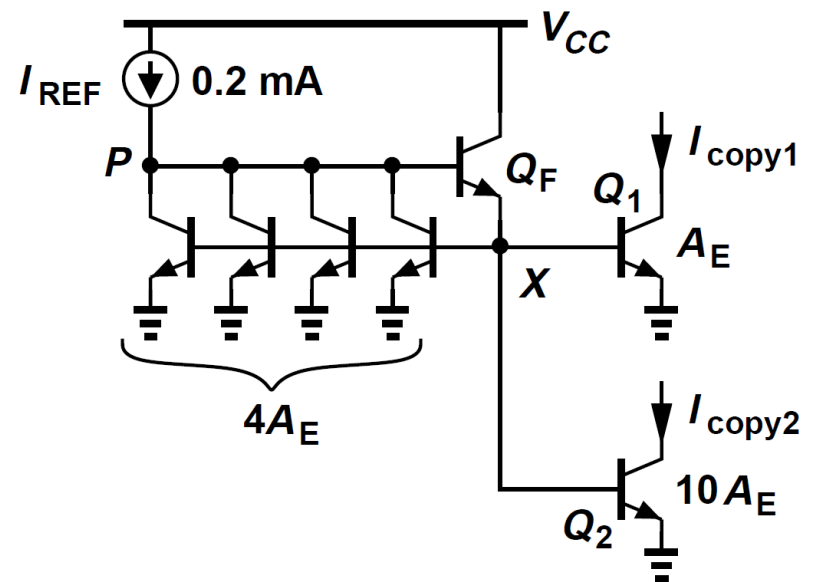
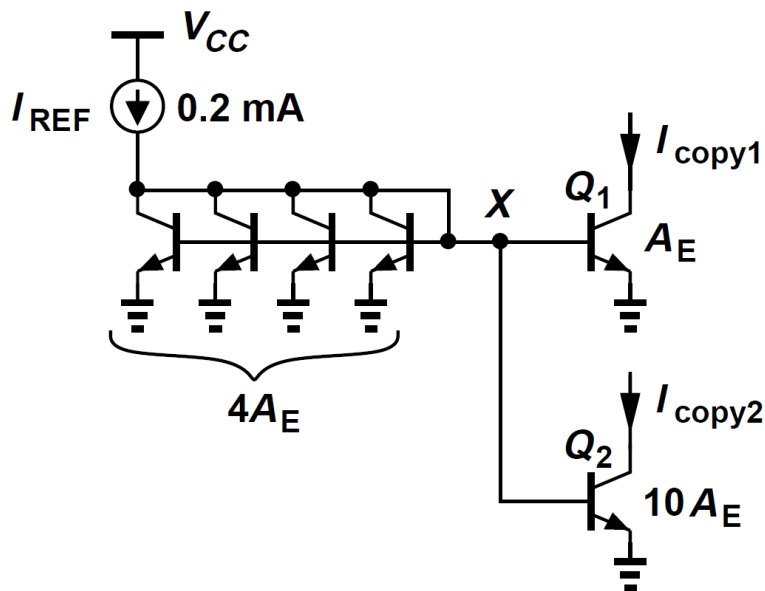
$$I_{REF} = \frac{I_{copy}}{\beta^2} \left(1 + \frac{1}{n} \right) + \frac{I_{copy}}{n}$$

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

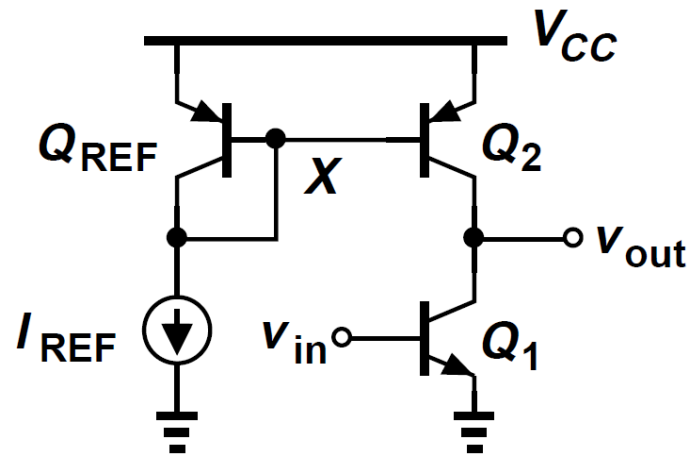
postignuto je da se greška smanjuje za faktor β .

Primer 10

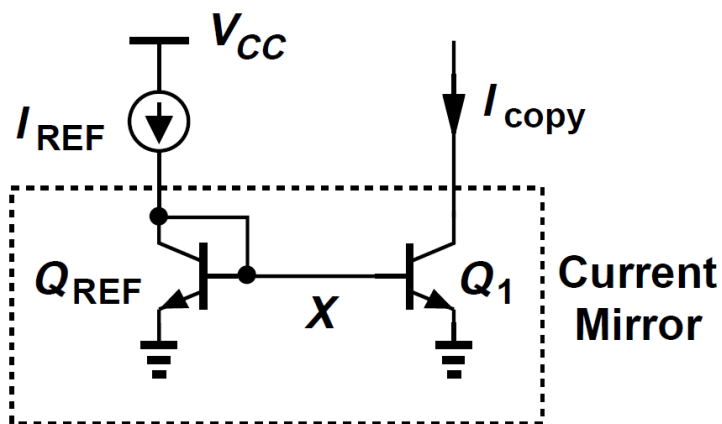
Izračunati grešku za I_{copy1} i I_{copy2} pre i posle dodavanja tranzistora za korekciju.



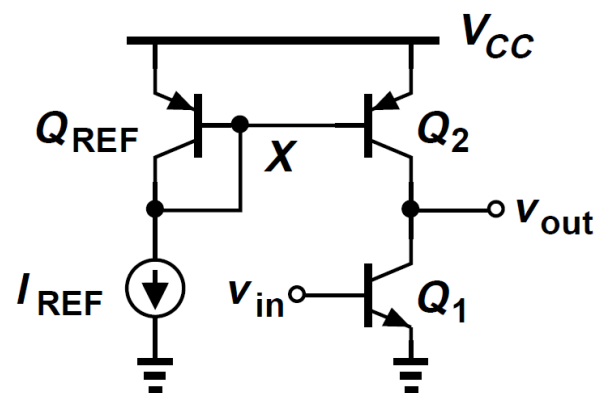
PNP Bipolarno strujno ogledalo



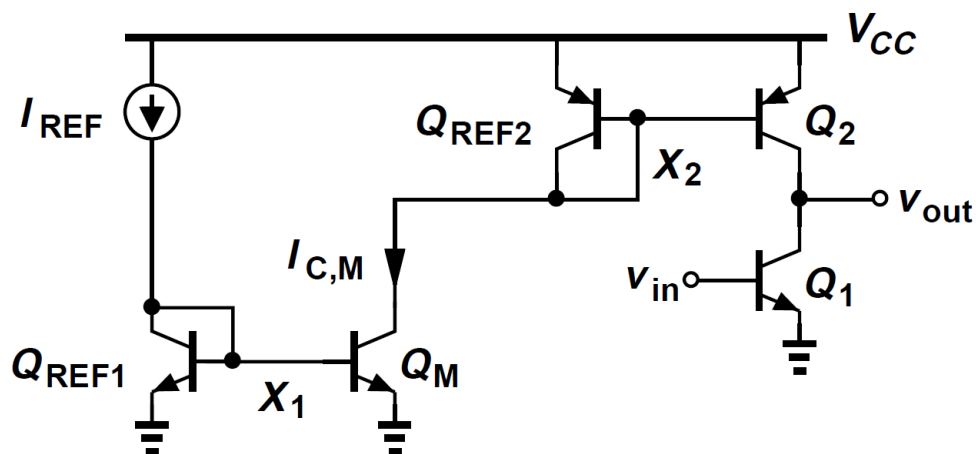
Kombinacija bipolarnih strujnih ogledala



I_{REF} ide od V_{CC} ka čvoru X



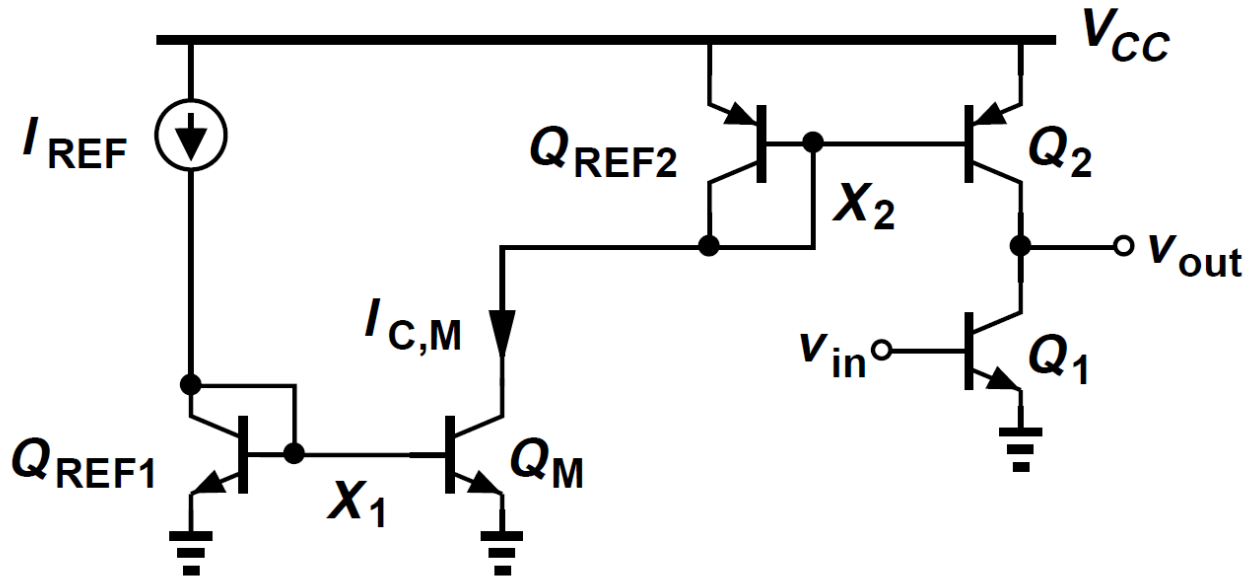
I_{REF} ide od čvora X ka masi



Generisanje struje za *pnp* komponente

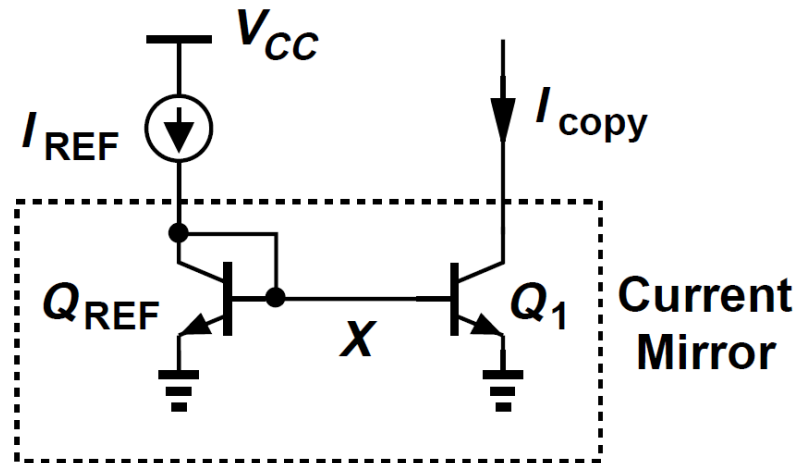
Primer 11

Potrebno je napajati Q_1 i Q_2 kolektorskom strujom od 1mA, ako je $I_{REF}=25\mu A$.
Naći rešenje tako da se ovo realizuje sa minimalnim brojem tranzistora.

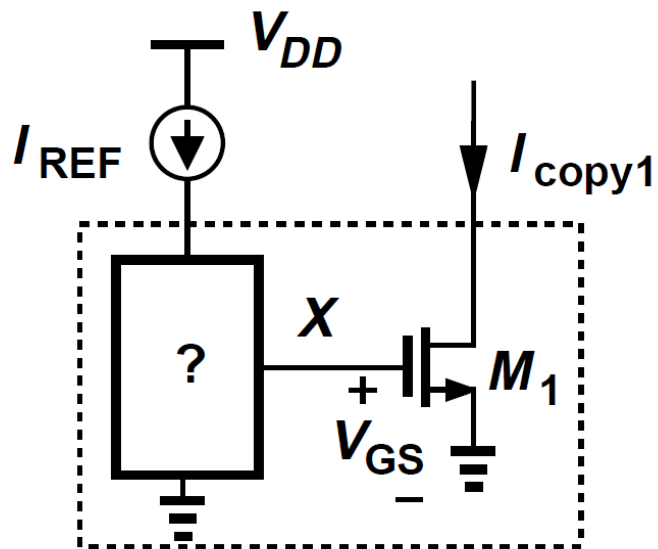


Primer 12

Student naručuje dva nominalno identična diskretna bipolarna tranzistora i pravi strujno ogledalo kao na slici. Nažalost I_{copy} je 30% veće od I_{REF} . Objasniti zašto.



MOS strujna ogledala

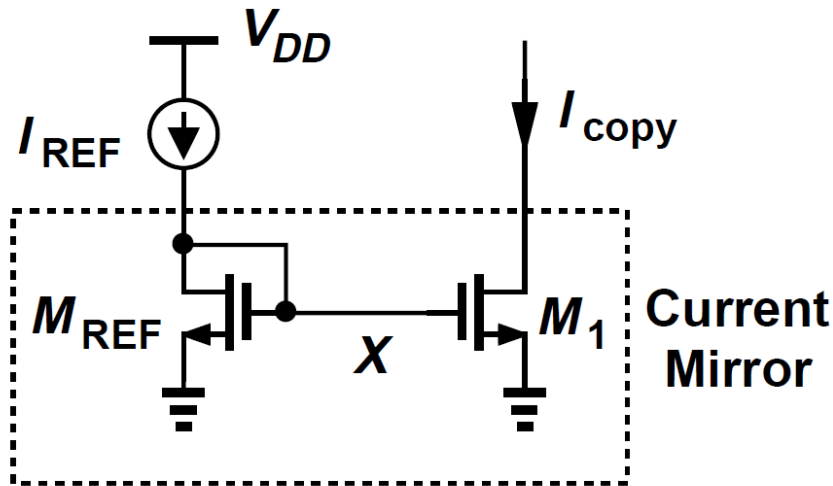


$$I_{REF} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_X - V_{TH1})^2$$

$$V_X = \sqrt{\frac{2I_{REF}}{\mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1}} + V_{TH1}$$

iz poslednje enakosti se vidi da moramo imati kolo koje pravi kvadratni koren

MOS strujna ogledala



$$I_{D,REF} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_{REF} (V_X - V_{TH})^2$$

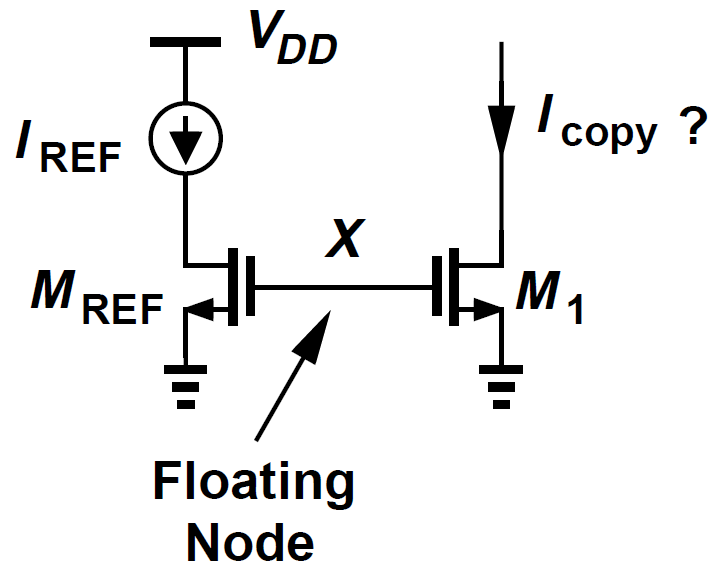
$$I_{copy} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_X - V_{TH})^2$$

$$I_{copy} = \frac{\left(\frac{W}{L} \right)_1}{\left(\frac{W}{L} \right)_{REF}} I_{REF}$$

ako su tranzistori identični, dobija se: $I_{copy} = I_{REF}$

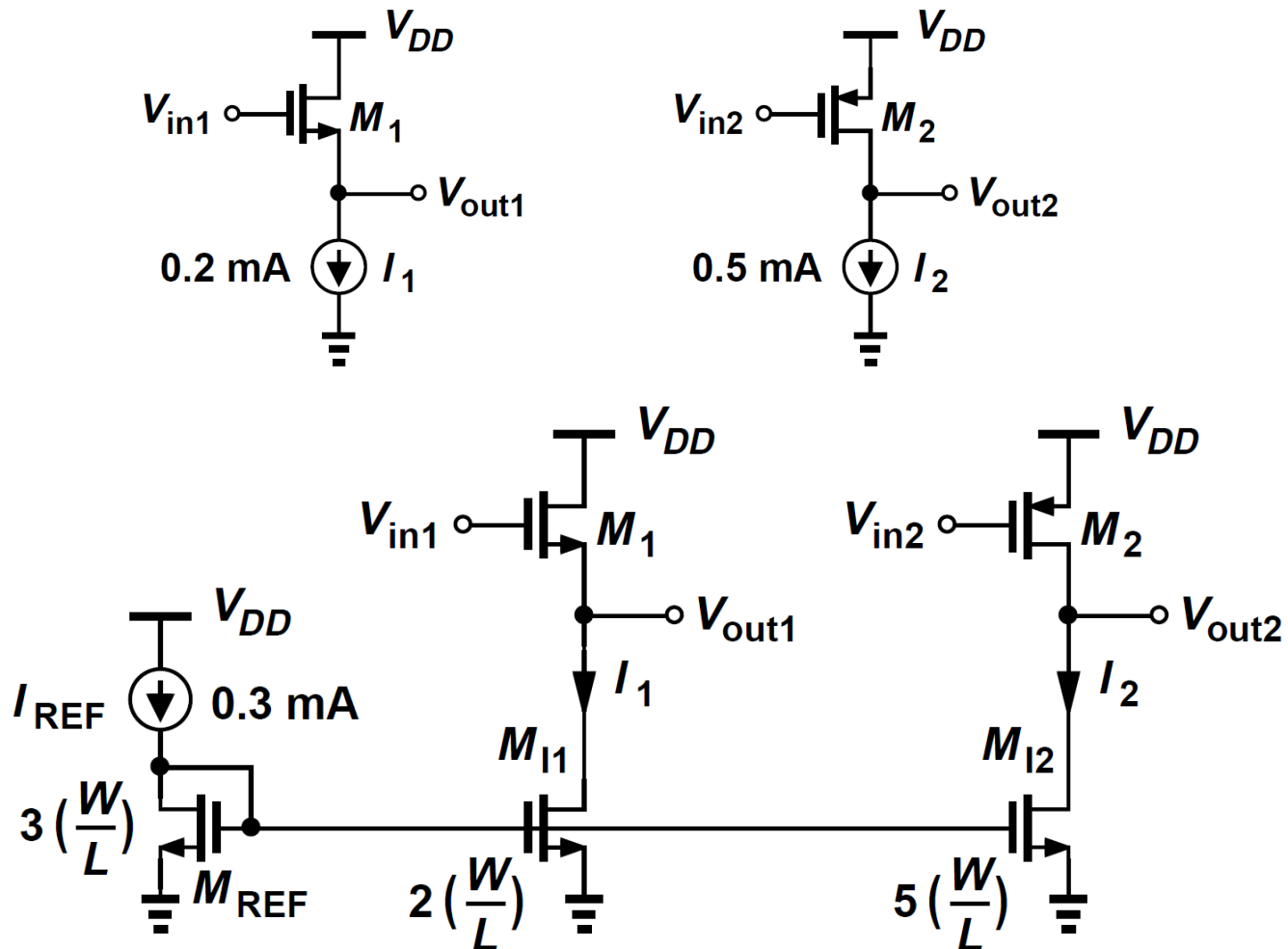
Primer 13

Student pokušava da napravi MOS strujno ogledalo, i greškom ostavlja gejt da pliva. Objasniti šta se dešava.

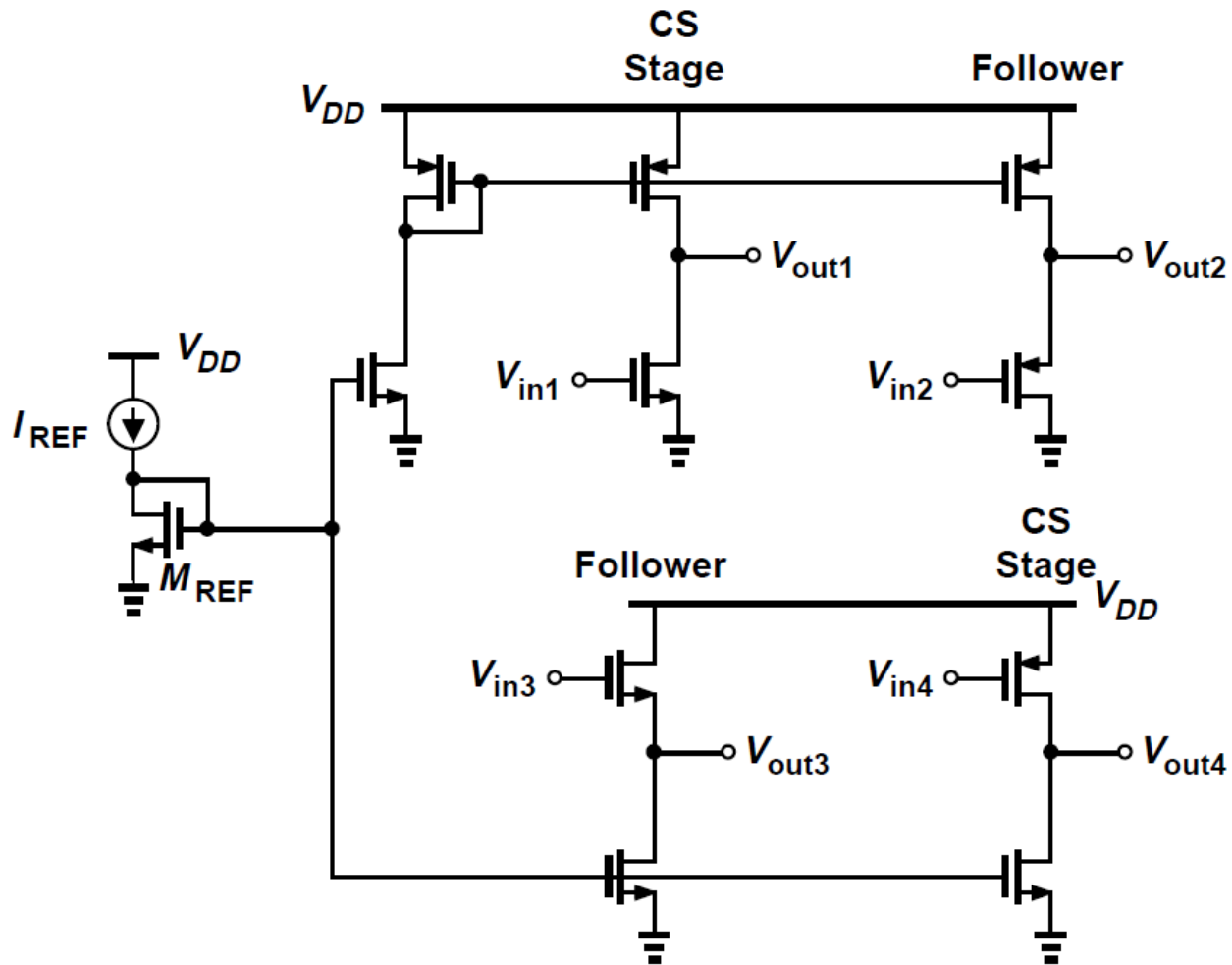


Primer 14

Projektovati kolo koje generiše struje I_1 i I_2 iz referentne struje od 0.3mA.



NMOS i PMOS strujna ogledala



Pregled poglavlja

- Kada se jedan tranzistor stavi iznad drugog, formira se kaskodna struktura, koja rezultuje velikom izlaznom impedansom.
- Kaskodna topologija se može razmatrati i kao ekstremni slučaj degeneracije sorsa ili emitora.
- Naponsko pojačanje pojačavača se može izraziti kao $-G_m R_{out}$, gde je G_m transkonduktanska pojačavača u kratkom spoju. Ova veza pokazuje da pojačanje pojačavača može biti maksimizovano maksimizovanjem izlazne impedanse.
- Sa velikom izlaznom impedansom, kaskodni stepen može da radi kao pojačavač sa velikim pojačanjem.
- Opterećenje kaskodnog stepena se takođe realizuje kaskodnim kolom i tako se približava idealnom strujnom izvoru.
- Ako su V_{BE} ili V_{GS} dobro definisani, onda I_C ili I_D nisu.

Pregled poglavlja

- Strujna ogledala mogu da „kopiraju“ dobro definisanu referentnu struju veliki broj puta za različite blokove u analognom sistemu.
- Strujna ogledala mogu da skaliraju referentnu struju celim ili razlomljenim faktorima.
- Strujna ogledala se retko koriste u diskretnom dizajnu jer njihova tačnost zavisi od uparenosti tranzistora.