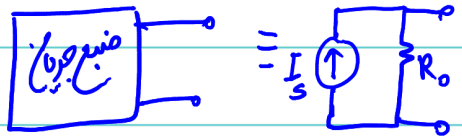
حداحی منابع جریان

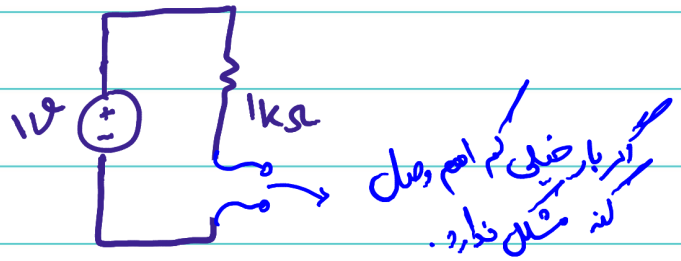
تا امروز از مدل منبع جریان ایده آل به صورت ⏚ استفاده می کردیم و همیشه می گفتیم که این المان به طور مستقل وجود ندارد و باید به کمک منبع ولتاژ و المان های دیگر که ولتاژ را به جریان تبدیل کنند ساخته شود.

تعریف منبع جریان: المانی 2 سر است که جریان آن **مستقل** از ولتاژ 2 سر آن باشد یا تا حد امکان مقاومت درونی آن ∞ باشد (ایده آل) **چرا؟**



هر چقدر مقاومت خروجی منبع جریان بزرگتر باشد
در حالت ایده آل آنرا ∞ باشد دقیقا جریان منبع جریان به مصرف کننده میرسد.

سوال: برای ساختن منبع جریان 1mA با دانش مدار الکتریک یک مدار پیشنهاد کنید.



عیب این مدار چیست؟

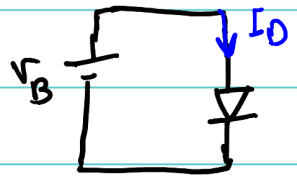
- ✓ بار باید داخل مدار
- ✓ اگر مقدار بار عوض شد جریان عوض
- ✓ مقدار بار باید کم باشد که جریان عوض نشود.

پیشنهاد اول: دیود

از این مدل ولتاژ به جریان یا همان ترانزیستور استفاده می‌کنیم و سعی می‌کنیم ولتاژ ثابتی برای کار ایجاد کنیم تا جریان ثابتی به ما تحویل دهد.

$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{V_T}} \rightarrow I_D = f(V_D)$ مدل ولتاژ جریان

ایده اولیه این است که ولتاژ ثابتی برای دیود مهیا کنیم تا جریان ثابت به ما بده



$I_D = f(V_B)$

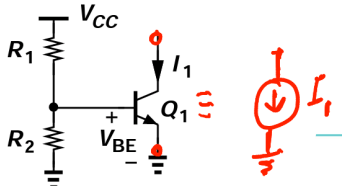
از این مدار به عنوان منبع جریان برای جای دیگر می‌توان استفاده کرد چرا که با یا دادن مدار بعدی ولتاژ V_D تغییر می‌کند.

$k' = \mu_n C_{ox}$

پیشنهاد اول

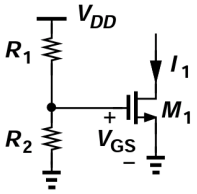
از این مبدل ولتاژ به جریان یا همان ترانزیستور استفاده می‌کنیم و سعی می‌کنیم ولتاژ ثابت

$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \rightarrow V_{BE} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S}$ برای آن ایجاد کنیم تا جریان ثابت به ما تحویل دهد.



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

$I_1 = f(V_{BE})$ یا $I_1 = f(V_{CC}, R_1, R_2)$



$I_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$ یا $I_1 = f(k, V_{GS})$

با تنظیم V_{GS} بوسیله V_{DD}, R_2, R_1 می‌توان جریان ثابت گرفت.

سوال: آیا واقعا از این مدارات برای منابع جریان استفاده می‌کنیم؟

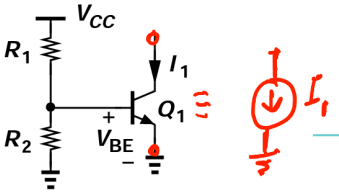
این مدارات وابسته به پارامترهای V_T و I_S و μ_n و ... که با دما تغییر می‌کنند و منابع مناسبی برای جریان نیست.

آینه جریان



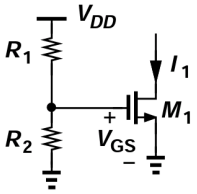
معلا در این درس ساخت آینه جریان ایده آل
از ما می‌خواهد که بین خواسته ما و منابع دیگر ...

$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \rightarrow V_{BE} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S}$ برای این ایجاد کنیم تا جریان ثابت به ما تحویل دهد.



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

$I_1 = f(V_{BE})$ یا $I_1 = f(V_{CC}, R_1, R_2)$



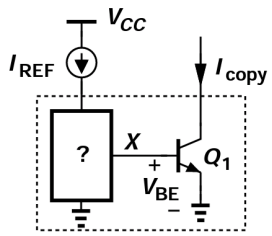
$I_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$ یا $I_1 = f(k, V_{GS})$

با تنظیم V_{GS} بوسیله V_{DD}, R_2, R_1 می‌توان جریان ثابت گرفت.

سوال: آیا واقعا از این مدارات برای منابع جریان استفاده می‌کنیم؟

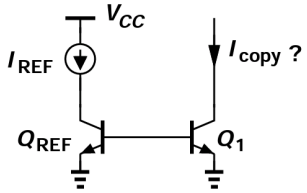
این مدارات وابسته به پارامترهای V_T و I_S و μ_n و ... که با دما تغییر می‌کنند و منابع مناسبی برای جریان نیست.

چگونه ضریبی از جریان مرجع را تولید کنیم؟

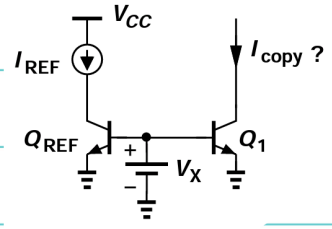


آیا دما باعث تغییر جریان کپی می‌شود؟

یک نفر مدار زیر را طراحی می‌کند. آیا مشکلی دارد؟
باعث می‌شود بیس‌ها ری‌شوند و حتما خاموش می‌شوند.

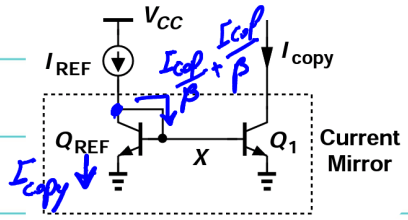


برای رفع اشکال مدار قبل، مدار زیر را پیشنهاد کرده است. مشکل چیست؟
از سری شدن جریان جلوگیری می‌کند و ولتاژ V_{BE} ها برابر شدن جریان دارد؟



با این کار ولتاژ بین امیتر Q_1 را Q_{REF} تعیین می‌کند و دیگر V_X ثابت می‌شود و لذا جریان کپی نمی‌شود.

I_{copy} را بدون صرف نظر کردن از بیس محاسبه کنید. مشابه هشتند.

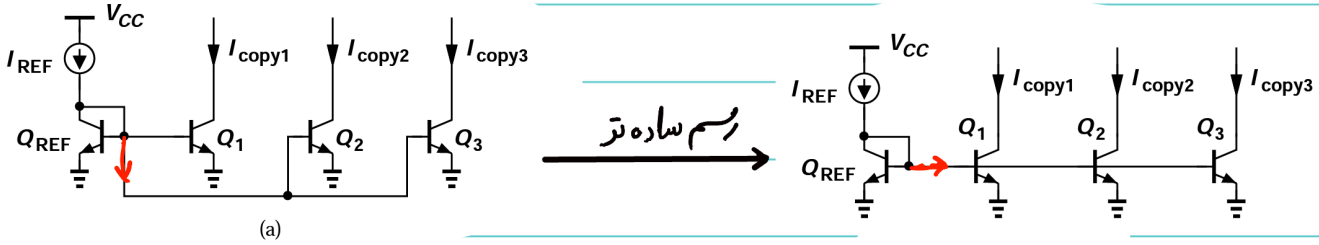


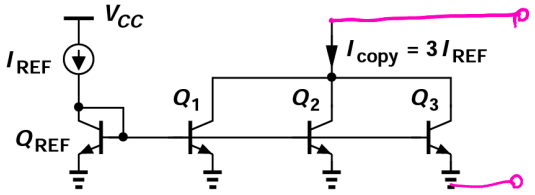
$$KCL: I_{ref} = I_{copy} + \frac{I_{copy}}{\beta} + \frac{I_{copy}}{\beta}$$

اگر β برابر باشند.

$$I_{cop} = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

چگونه ضرایبی از جریان مرجع ایجاد کنیم؟

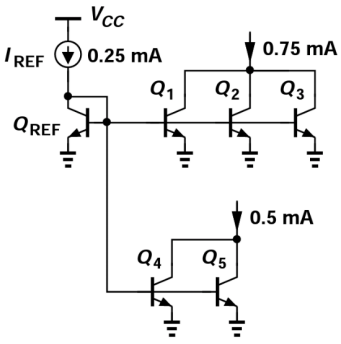




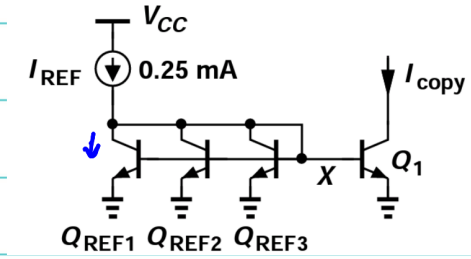
$\equiv$ (i) $3I_{ref}$

با اتصال Q های copy چندبرابر I_{ref} را می‌سازیم.

مثال:

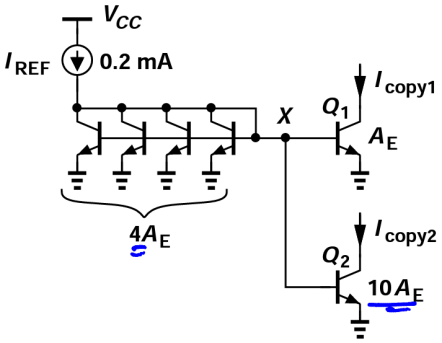


چگونه کسری از جریان مرجع ایجاد کنیم؟



$I_{ref_1} = I_{ref_2} = I_{ref_3}$ ⇒

$0.25 = I_{ref_1} + I_{ref_2} + I_{ref_3} \rightarrow I_{copy} = \frac{I_{ref}}{3}$

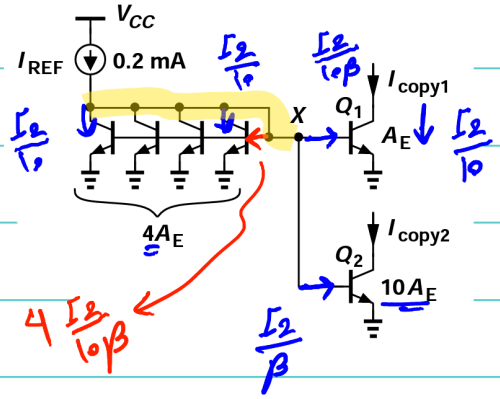


مثال: اگر $\beta = \infty$

$I_{copy1} = \frac{1}{4} I_{ref}$

$I_{copy2} = \frac{10}{4} I_{ref}$

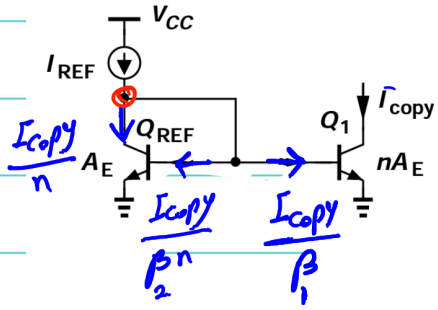
حداقل اگر β بزرگ نباشد I_{copy2}؟



$I_{ref} = 4\left(\frac{I_2}{10}\right) + \frac{I_2}{10\beta} + \frac{I_2}{\beta} + 4\frac{I_2}{10\beta}$

$$I_2 = \frac{I_{ref}}{\frac{4}{10} + \frac{1}{\beta} + \frac{4}{10\beta} + \frac{1}{10\beta}}$$

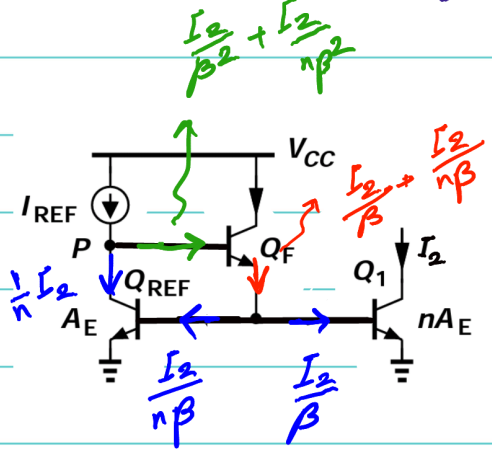
جبران ارلی بیس :



$$I_{ref} = \frac{I_{copy}}{n} + \frac{I_{copy}}{\beta_2 n} + \frac{I_{copy}}{\beta_1}$$

$$I_{copy} = \frac{I_{ref}}{\frac{1}{n} + \frac{1}{\beta_2 n} + \frac{1}{\beta_1}}$$

افزودن یک ترانزیستور به بیس ها برای جبران خطا بیس :

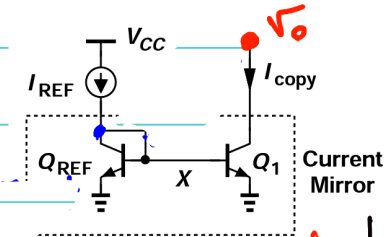


$$I_{ref} = \frac{1}{n} I_2 + \frac{I_2}{\beta^2} + \frac{I_2}{n\beta^2}$$

$$I_2 = \frac{I_{ref}}{\frac{1}{n} + \frac{1}{\beta^2} + \frac{1}{n\beta^2}}$$

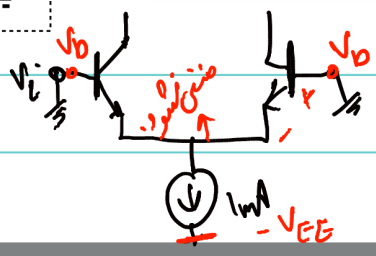
کوچک ترشده

حداقل ولتاژ خروجی آینه جبران چقدره ؟

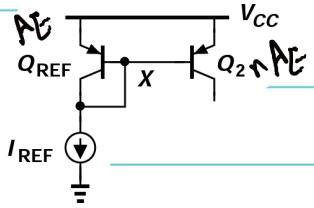


مدار منبع جریان کی را باید دقت کنیم دوتایی که اعمال شده

ولتاژ V_o از $V_{CE(sat)} = 0.2$ کمتر نشود.



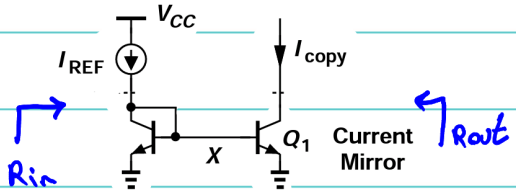
آینه جریان pnp

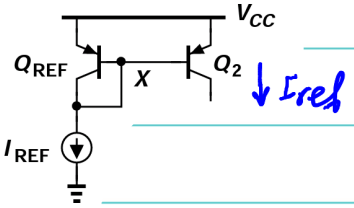


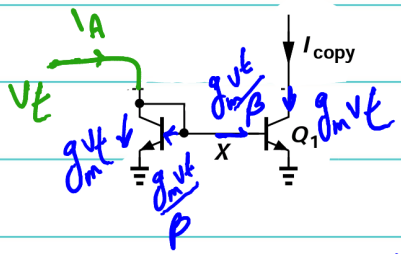
β بزرگ باشد

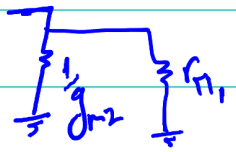
$I_2 = n\, I_{ref}$

مدل سیگنال کوچک



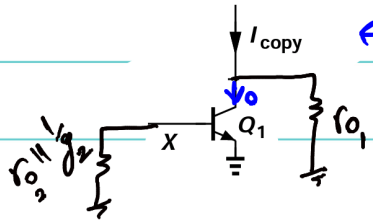






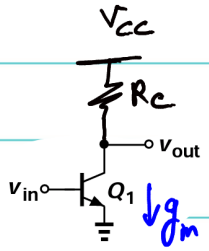
$\simeq \boxed{R_{in} = \frac{1}{g_{m2}}}$

$I = g_{m2} v_t + \frac{2 g_m v_t}{\beta} \rightarrow v_t = \frac{1}{g_{m2}}$



$\boxed{R_{out} = r_{o_1}}$

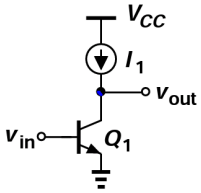
بار فعال active load

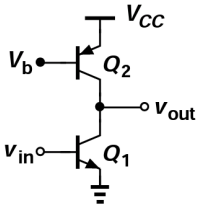


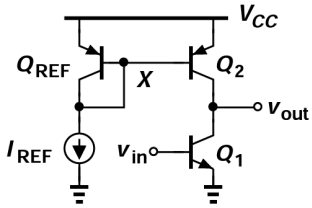
$A_V = -g_m R_c$

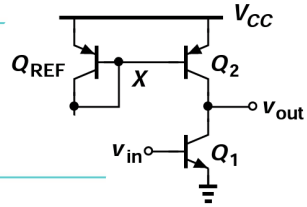
برای افزایش گین
۱- $g_m \uparrow \leftarrow I_C \uparrow \leftarrow$ محدودیت جریان
۲- $R_c \uparrow \leftarrow$ اگر خیلی بزرگ کنیم افت ولتاژ زیاد ← اشباع

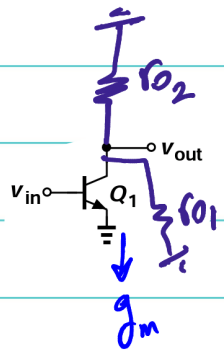
می‌توان به جای مقاومت R_c یک مداری قرار داد که مقاومت معادل آن بزرگ ولی افت ولتاژ آن کم باشد. به همین منظور از بار فعال یا ترانزیستور منبع جریان استفاده می‌کنیم.







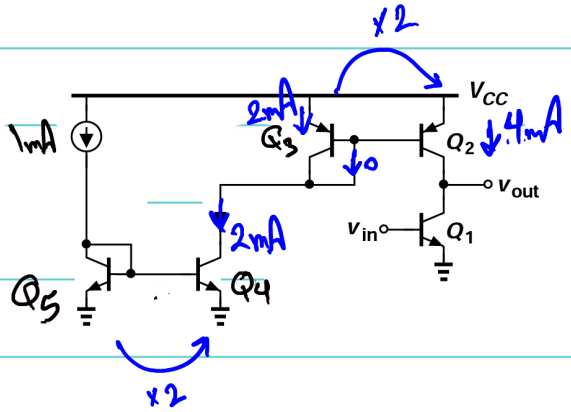




$A_V = r_o = -g_m \, r_{o1} \| r_{o2}$

$r_o \propto \frac{1}{I_C}$

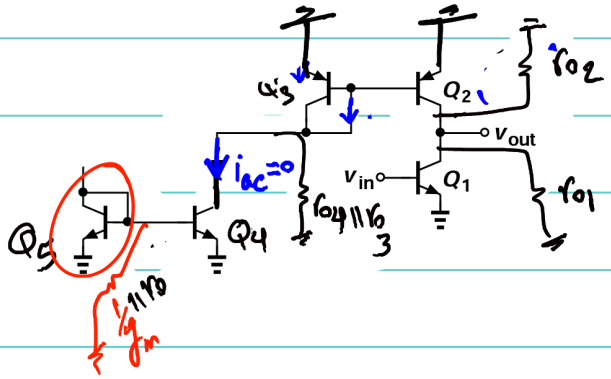
مثال: بهره ولتاژ مدار زیر را محاسبه کنید.



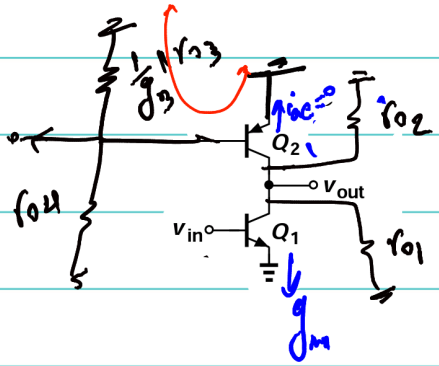
$$\begin{cases} A_{E_4} = 2A_{E_5} = 3A_{E_3} \\ A_{E_2} = 2A_{E_3} \end{cases} \qquad \begin{aligned} V_A &= 100 \\ V_T &= 25mV \\ \beta &= 100 \end{aligned}$$

$$r_{o_1} = r_{o_2} = \frac{100}{4} = 25k$$

$$g_{m_1} = 40 I_{C_1} = 160 \frac{mA}{V}$$







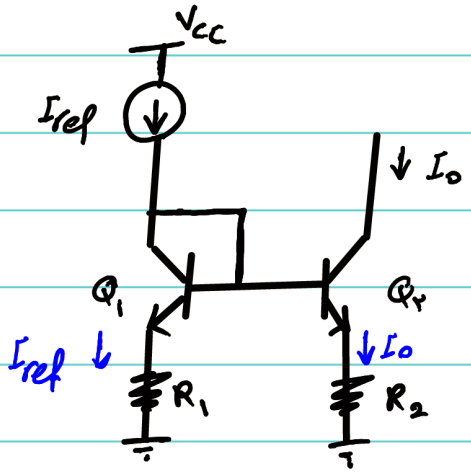
$$A_V = V_o = r_{o_1} \| r_{o_2} \times g_m$$

$$A_V = \frac{25}{2} \alpha \frac{1}{160}$$

آینه جریان با فیدبک امیتر

برای افزایش مقاومت خروجی و کاهش حساسیت جریان به دما از مقاومت در امیتر

تقاضا میشود رفرنس دقیق استفاده گردد.



$$V_{BE_2} + I_o R_2 = V_{BE_1} + I_{ref} R_1$$

$$V_T \ln \frac{I_o}{I_s} + I_o R_2 = V_T \ln \frac{I_{ref}}{I_s} + I_{ref} R_1$$

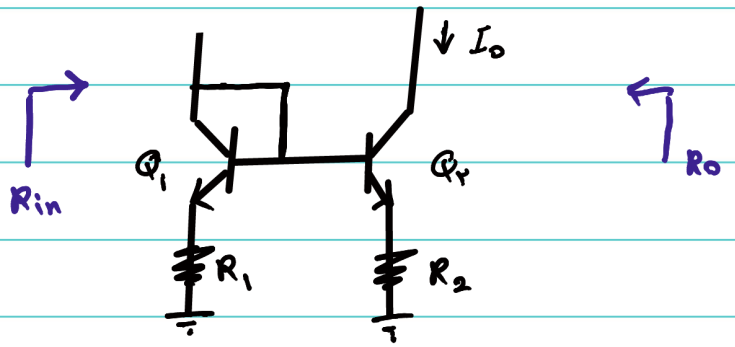
$$\rightarrow V_T \left(\ln \frac{I_o}{I_s} - \ln \frac{I_{ref}}{I_s} \right) + I_o R = I_{ref} R_1$$

$$V_T \left(\ln \frac{I_o I_s}{I_{ref} I_s} \right) + I_o R = I_{ref} R_1 \rightarrow \boxed{\frac{I_o}{I_{ref}} = \frac{R_1}{R_2}}$$

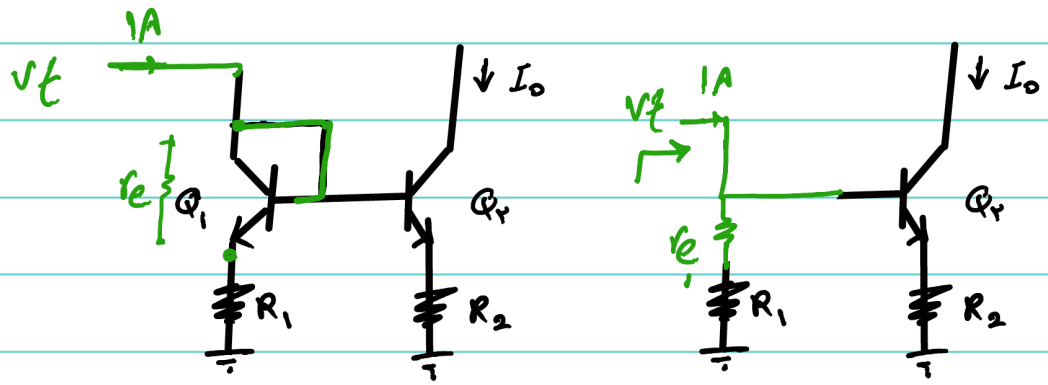
خیلی کوچکه

سوال: حداقل ولتاژ خروجی چقدره؟

تحلیل سیگنال کوچک:

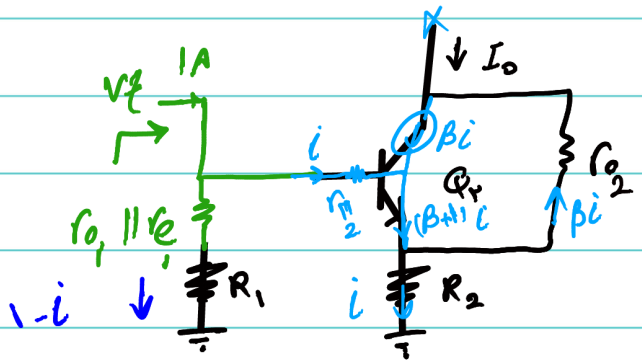


$r_o = \infty$: R_{in}



$$R_{in} = (r_{e_1} + R_1) \,||\, [(r_{e_2} + R_2)\beta_2]$$

$r_o \neq \infty$: R_{in}



غلط است.

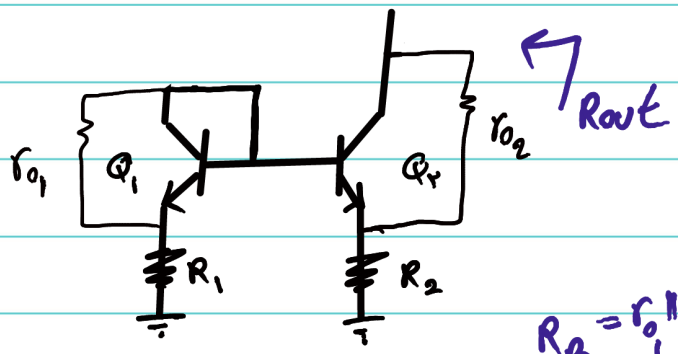
$$R_{in} = (r_{o_1} \,||\, r_{e_1} + R_1) \,||\, (R_2 + r_{e_2})\beta_2$$

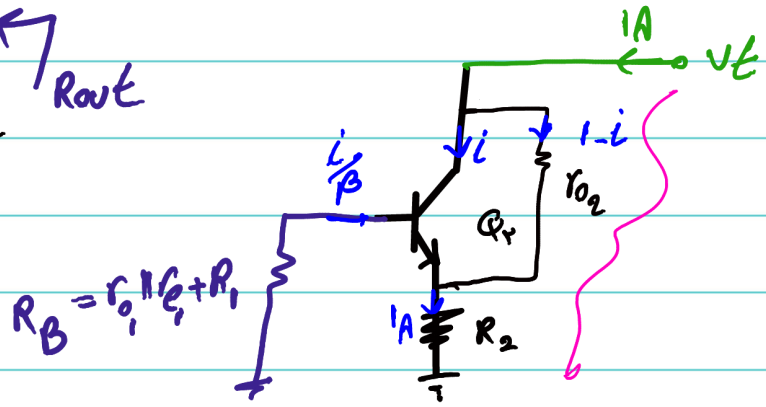
r_{e_2} با R_2 سری نیست که انگار سر دهیم

$$V_t = r_{\pi_2} i + R_2 i \rightarrow i = \frac{V_t}{r_{\pi_2} + R_2}$$

$$V_t = (r_{o_1} \,||\, r_{e_1} + R_1)(1 - i) \Rightarrow V_t = (r_{o_1} \,||\, r_{e_1} + R_1)\left(1 - \frac{V_t}{r_{\pi_2} + R_2}\right)$$

$$\rightarrow R_{in} = V_t = \checkmark$$



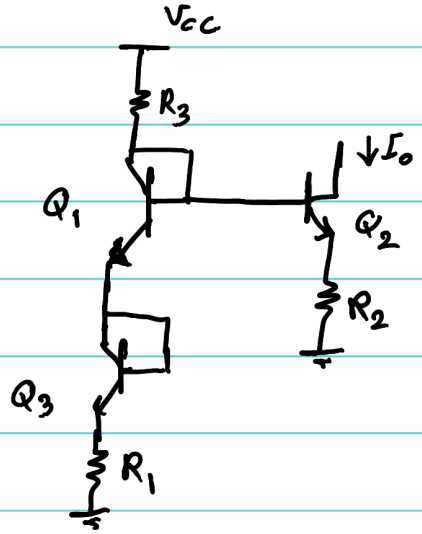


$$\text{KVL: } V_t = (1-i)\, r_{o_2} + R_2$$

$$R_B \frac{i'}{\beta} + r_{\pi_1} \frac{i'}{\beta} + R_2 = 0 \longrightarrow i' = \frac{-R_2 \beta}{R_B + r_{\pi_1}}$$

$$R_{out} = r_{o_2}\left(1 + \frac{R_2 \beta}{R_B + r_{\pi_1}}\right) + R_2$$

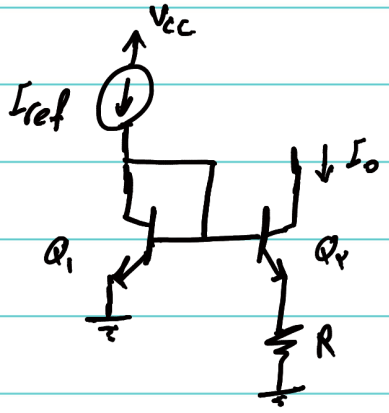
مثال : جریان خروجی منبع جریان زیر را تعیین کنید برحسب V_{BE} بیان کنید.



منبع جریان ویلیدر

widlar

برای ایجاد جریان های خیلی پایین در حد چند میلی آمپر استفاده می شود.

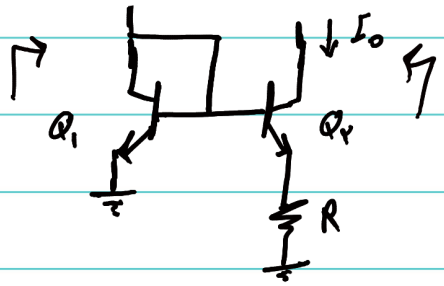


$$V_{BE_1} = V_{BE_2} + I_o R$$

$$V_T \ln \frac{I_{ref}}{I_s} = V_T \ln \frac{I_o}{I_s} + I_o R$$

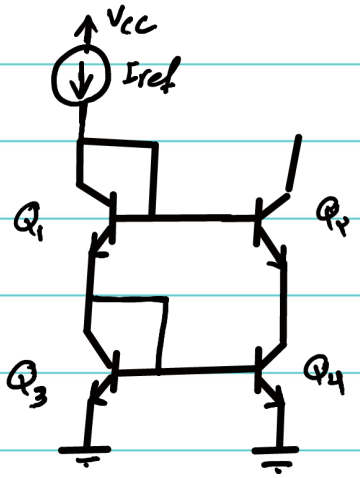
$$V_T \ln \frac{I_{ref}}{I_o} = I_o R$$

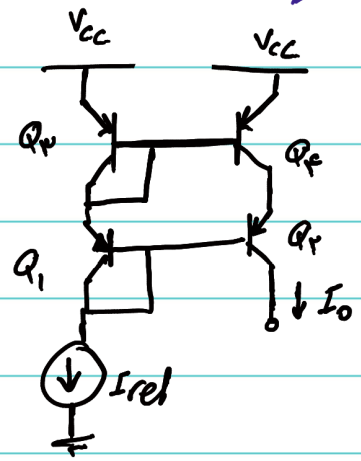
تحلیل سیگنال کوچک:



به عنوان تمرین مقاومت خروجی و ورودی مدار را محاسبه کنید.

منبع جریان کاسکود



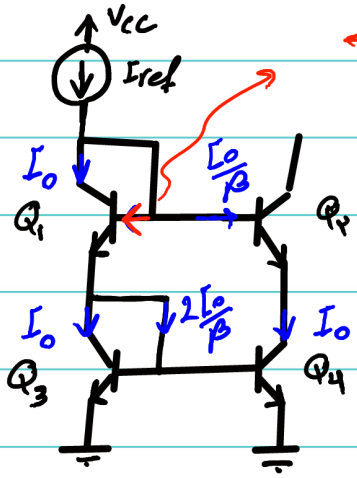


تحلیل DC تقریبی :

if $\beta=\infty$: $I_{C_1}=I_{C_3}=I_{ref} \xrightarrow[\text{مشابه}]{V_{BE_3}=V_{BE_4}} I_{C_4}=I_{C_3}=I_{ref}$

$I_{C_2}=I_{C_4}=I_{ref}$ نیز

تحلیل DC دقیق :

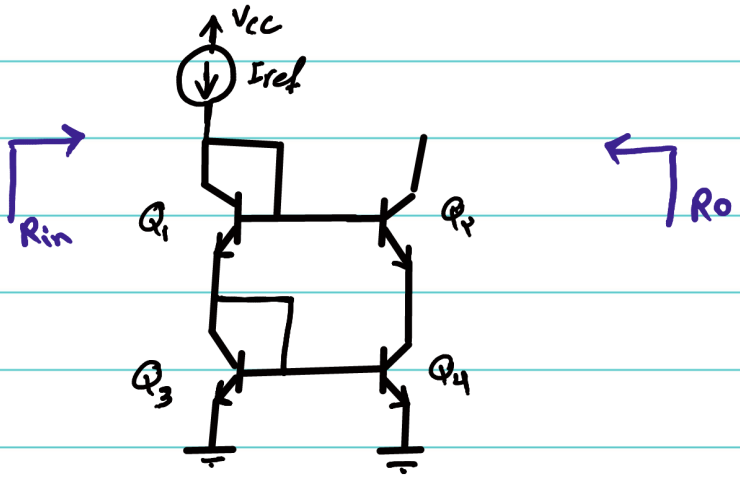


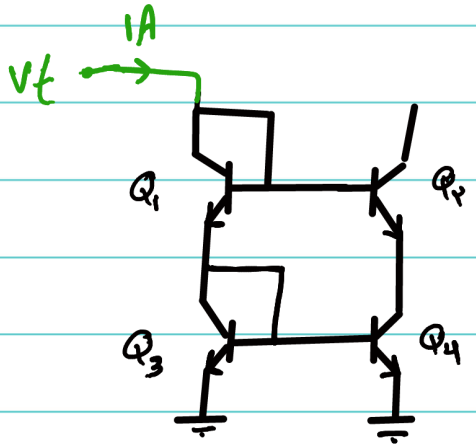
$\leftarrow \left(\frac{I_o}{\beta}+\frac{2I_o}{\beta^2}\right)$

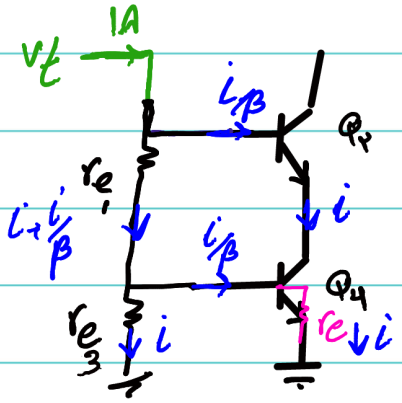
$I_{ref}=I_o+\frac{2I_o}{\beta} \quad \left(\frac{I_o}{\beta}+\frac{2I_o}{\beta^2}\right)+\frac{I_o}{\beta}$

$I_o=\frac{I_{ref}}{1+\frac{4}{\beta}+\frac{2}{\beta^2}}=\frac{\beta^2 I_{ref}}{\beta^2+4\beta+2}$

تحلیل ac کاسکود



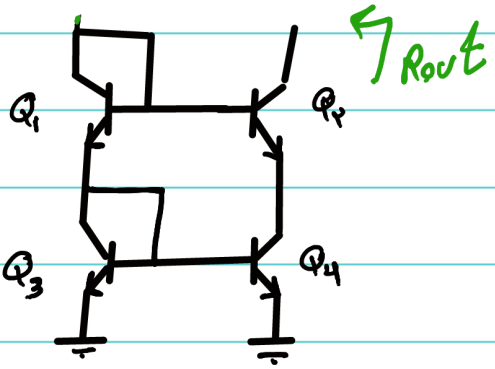


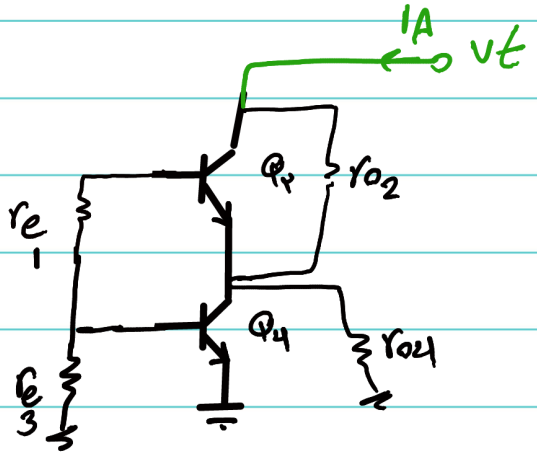


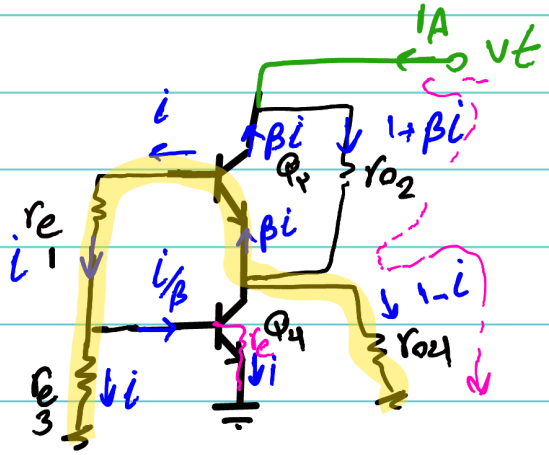
فرض $r_e = r_e$

$$1 = \frac{i}{\beta} + i + \frac{i}{\beta} \rightarrow \underline{i \simeq 1}$$

$$V_t = r_{e_1}\left(1+\frac{1}{\beta}\right) + r_{e_3}(1) \simeq R_{in} \simeq r_{e_1} + r_{e_3}$$







$r_e = r_e$

KVL: $v_t = r_{o_2}(1+\beta i) + r_{o_4}(1-i)$ **

KVL: $i(r_{e_1} + r_{e_3} + r_{\pi_2}) - r_{o_4}(1-i) = 0$

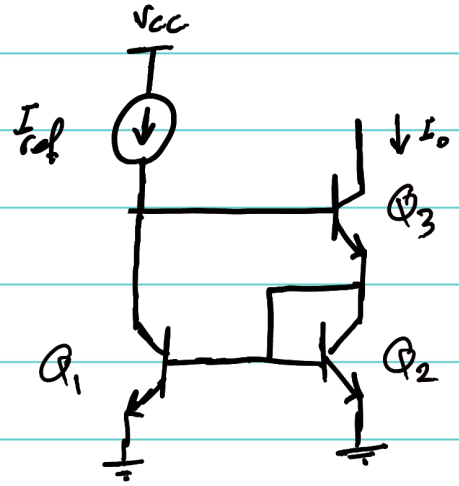
$$i = \frac{r_o}{r_o + 2r_e + r_o} \simeq \frac{r_o}{r_o} \simeq 1 \quad **$$

$$v_t = r_o(1+\beta) + r_o(1-1) \simeq \beta r_o$$

تحلیل دقیق تر:

منبع جریان ویلسون

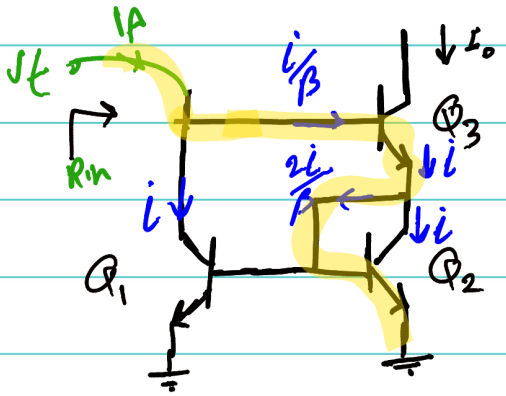
این ساختار شبیه کاسکود است با این تفاوت که با یک ترانزیستور کمتر ساخته می‌شود ولی خواص کاسکود را دارد.



$$V_T \ln \frac{I_{ref}}{I_o} = R_E I_o$$

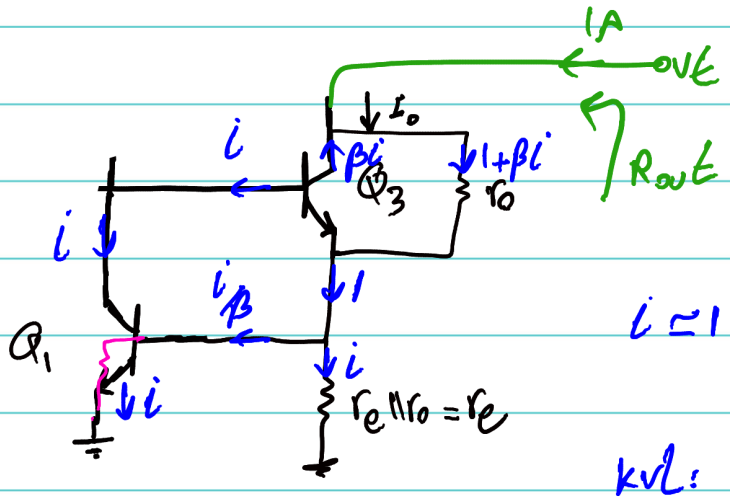
بازای β $\quad I_{C_1} = I_{ref} \longrightarrow I_{C_2} = I_{C_1} = I_{ref} \longrightarrow I_o = I_{C_3} - I_{E_2} = I_{ref}$

تحلیل سیگنال کوچک



$$1 = i + \frac{i}{\beta} \rightarrow i \simeq 1$$

$$V_t = r_e i + r_e i \Rightarrow V_t = R_i = 2r_e$$



$i \simeq 1$

KVL: $V_E = (1+\beta i) r_o + r_e i$

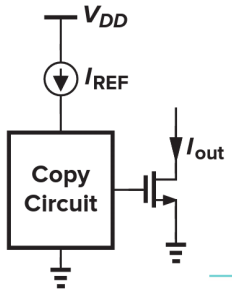
$1 - \frac{i}{\beta} = i \rightarrow i = \frac{\beta}{\beta+1}$

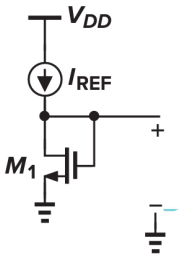
$R_{out} = \frac{V_E}{1} = (1+\beta) r_o + r_e$

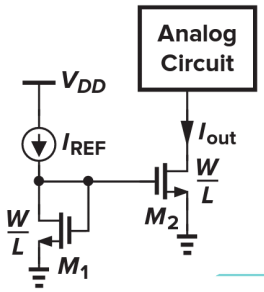
$\simeq \beta r_o$

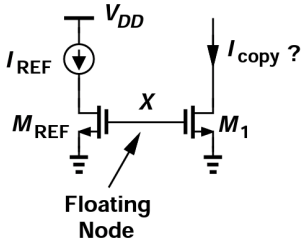
تحلیل دقیق‌تر مقاومت خروجی:

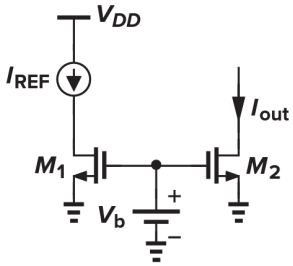
منابع جریان با ماسفت

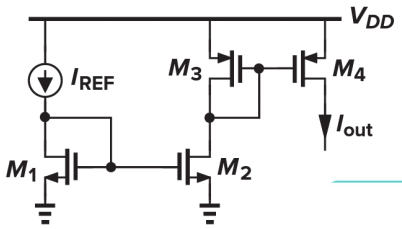


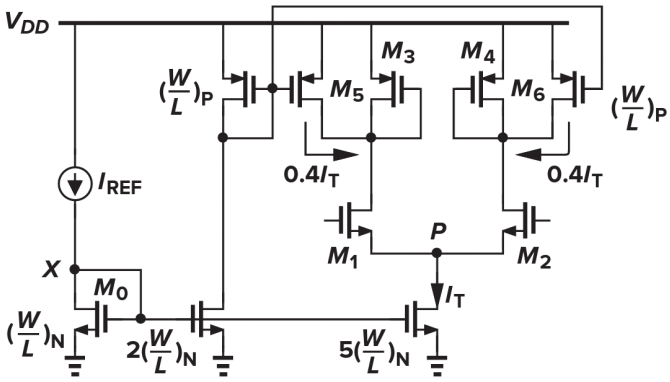








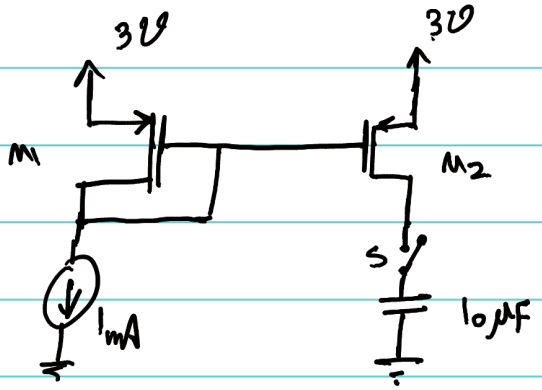

V_{DD}
I_{REF}
M_3
M_4
I_{out}
M_1
M_2


V_{DD}
M_3
M_4
$(\frac{W}{L})_P$
M_5
M_6
$(\frac{W}{L})_P$
I_{REF}
$0.4I_T$
$0.4I_T$
M_1
P
M_2
X
M_0
I_T
$(\frac{W}{L})_N$
$2(\frac{W}{L})_N$
$5(\frac{W}{L})_N$

مثال: در مدار زیر پس از چند ثانیه از ناحیه اشباع خارج می‌شود؟

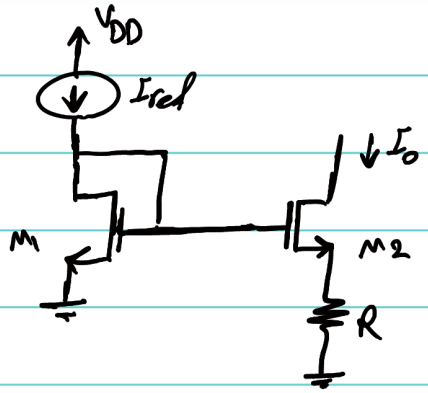
$V_t = 2V$

$K = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L} = 0.25\,mA/V^2$

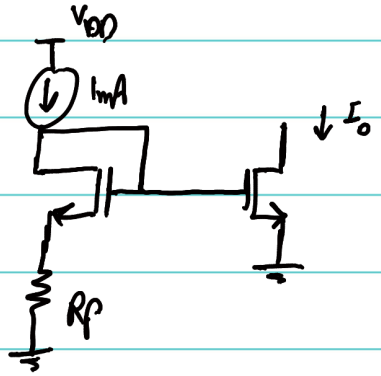


منبع جریان ویلر مانسفق

این مدار در عمل برای مانسفت کاربرد ندارد چرا که در CMOS از مقاومت خیلی کم استفاده میشود.



مثال) در مدار زیر مقدار R_p را طوری تعیین کنید که $I_o = 2I_{ref}$ باشد.



$k = \frac{1}{4} mA/V^2$