مدارهای مجتمع خطی

فصل دوم

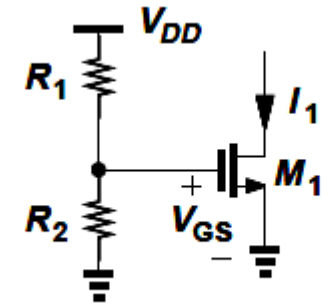
منابع جریان

مدرس: احمد توکلی

مقدمه

- کاربردهای منابع جریان:
  - ✓ مدار بایاس کننده
  - ✓ بارفعال در تقویت کننده‌ها
  - ✓ایجاد ولتاژ و یا جریان مرجع
- عوامل غیر ایده‌آلی منابع جریان:
  - ✓ساختمان غیر ایده‌آل ترانزیستورها
  - ✓عدم انطباق ترانزیستورهای به‌کار رفته
  - ✓حساسیت دمایی ترانزیستورها و مقاومت‌ها
  - ✓ عدم تثبیت ولتاژ تغذیه

منابع جریان

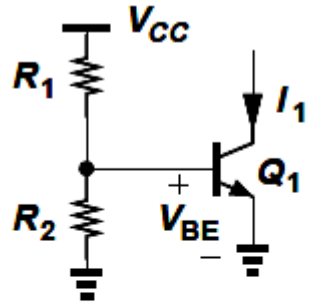


MOS current sources

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

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

- ✓ ولتاژ اضافه تحریک (V_{GS} -V_{TH}) تابعی از V_{DD} و V_{TH} است.
- ✓ V_{TH} به میزان آلایش زیربنا در مرز اکسید (محل کانال) بستگی دارد و ممکن است از یک ویفر به ویفر دیگر به اندازه 100mV تغییر کند.
- ✓ μ_n و V_{TH} وابسته به حرارت هستند.



Bipolar current sources

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

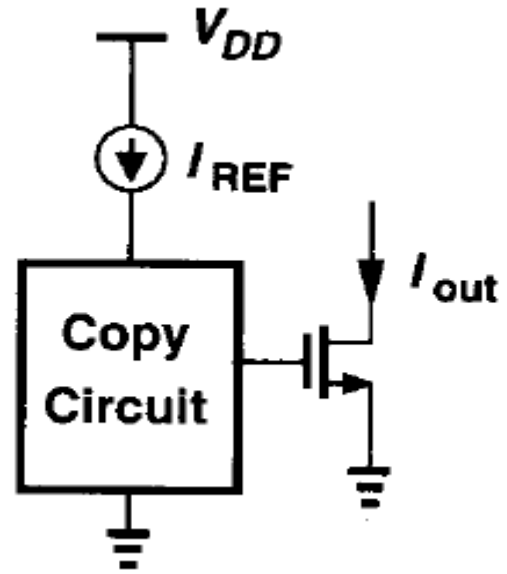
- ✓ ولتاژ بیس- امیتر (V_{BE}) تابعی از V_{CC} است.
- ✓ I_S به حرارت، پهنای بیس و سطح مقطع امیتر بستگی دارد.
- ✓ V_T وابسته به حرارت است ($V_T = KT/q$).

بنابراین حتی اگر ولتاژ تغذیه ثابت باشد، وابستگی به فرآیند ساخت و دما باعث می‌شود که جریان خروجی I_1 ثابت نماند. بنابراین از روش‌های دیگری برای ساخت منبع جریان باید استفاده کرد.

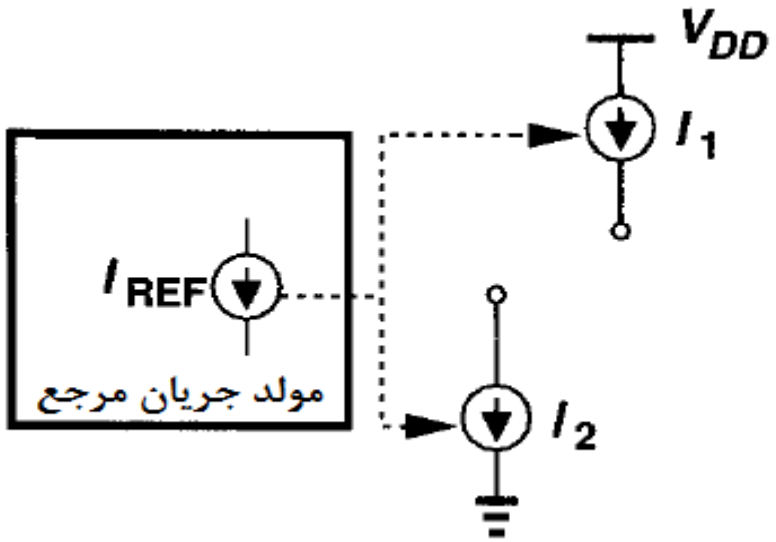
منابع جریان

طراحی منابع جریان در مدارهای آنالوگ بر اساس «کپی کردن» جریان از یک مرجع با فرض این که یک منبع جریان دقیق از قبل موجود باشد، قرار دارد.

یک مدار نسبتاً پیچیده برای تولید یک منبع جریان پایدار مرجع (I_{REF}) به کار می‌رود و سپس کپی‌های مختلفی از آن تولید می‌شود.



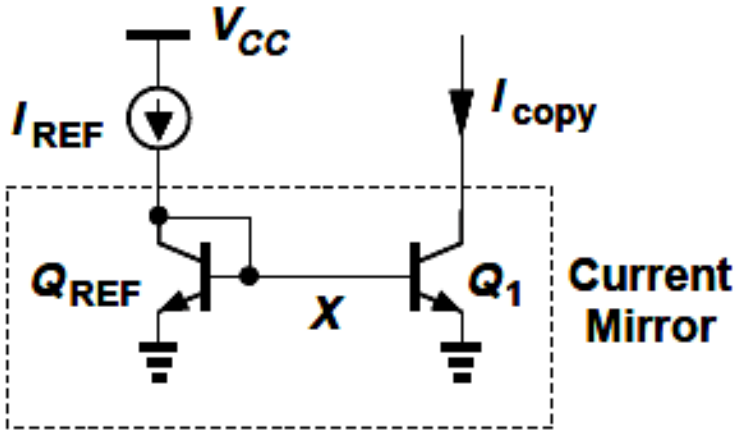
مفهوم کپی کردن جریان



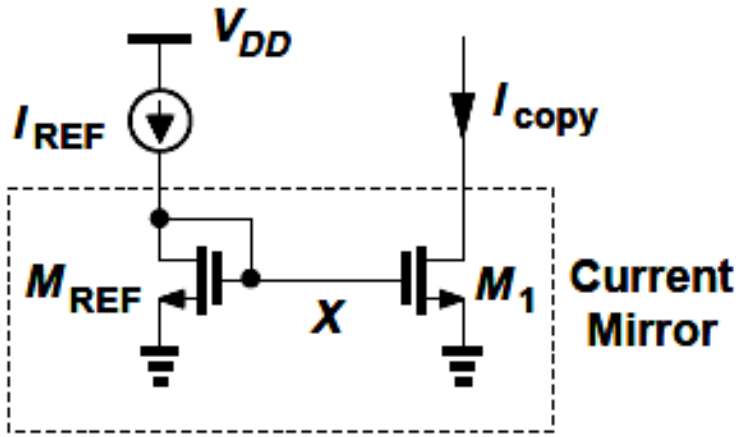
استفاده از یک مرجع برای تولید جریان‌های مختلف

آینه جریان

یکی از روش‌های ساخت منبع جریان به روش کپی کردن، ساختار «آینه جریان» است.

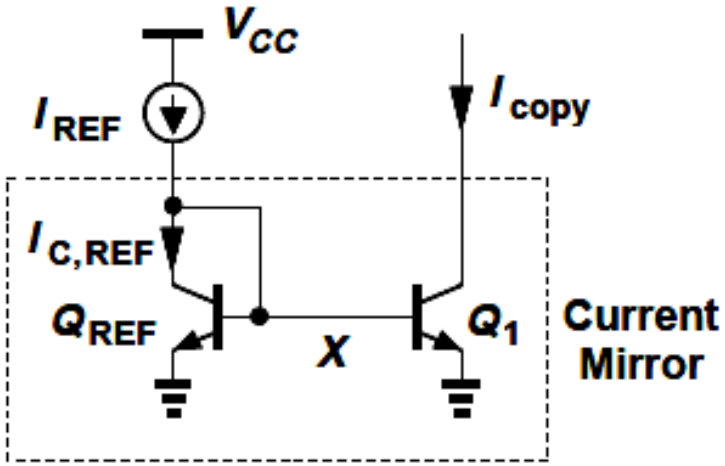


آینه جریان ساده BJT



آینه جریان ساده MOSFET

آینه جریان ساده BJT :



اگر β بزرگ باشد می‌توان از جریان بیس صرفنظر کرد. در نتیجه $I_{REF} \approx I_{C,REF}$ می‌باشد.

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

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

$$\frac{I_{copy}}{I_{REF}} = \frac{I_{S1}}{I_{S,REF}} = \frac{A_{E1}}{A_{E,REF}}$$

$$I_S \propto A_E$$

$$A_{E1} = nA_{E,REF} \Longrightarrow I_{copy} = nI_{REF}$$

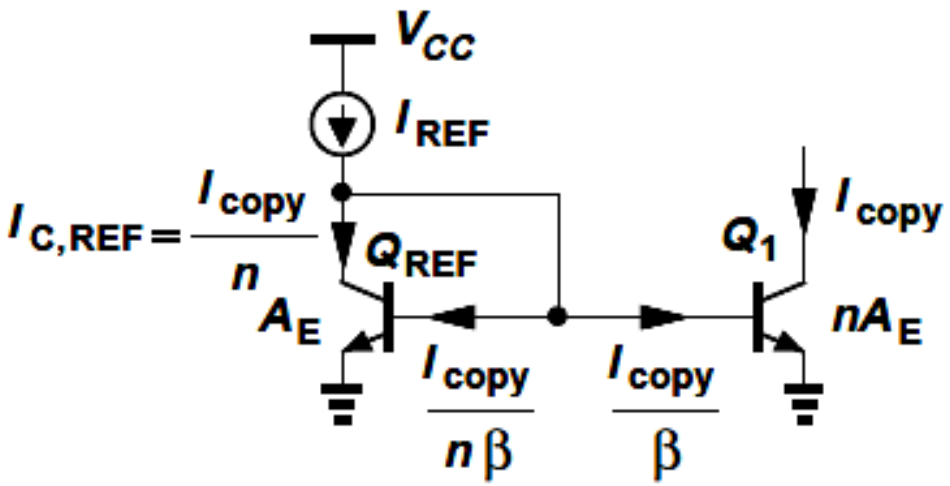
$$n = 1\ (A_{E1} = A_{E,REF}) \Longrightarrow I_{copy} = I_{REF}$$

A_{E1}: سطح مقطع امیتر ترانزیستور Q_1

A_E: سطح مقطع امیتر ترانزیستور Q_{REF}

n: نسبت سطح مقطع Q_1 به Q_{REF}

آینه جریان ساده BJT با در نظر گرفتن جریان بیس:



$$A_{E1} = nA_{E,REF} \Longrightarrow I_{copy} = nI_{REF}$$

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

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

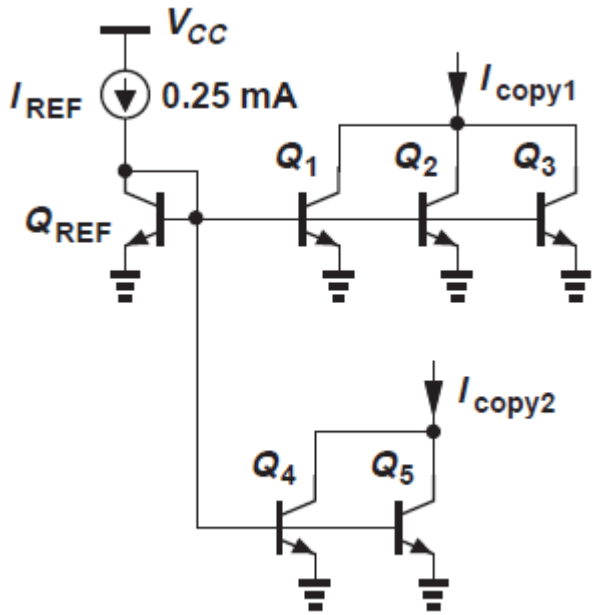
$$n = 1 \Longrightarrow I_{copy} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

- ✓ اگر n متوسط باشد و یا β بزرگ باشد، می‌توان از عبارت $\frac{1}{\beta}(n+1)$ صرفنظرکرد و در نتیجه:

$$I_{copy} \cong nI_{REF}$$

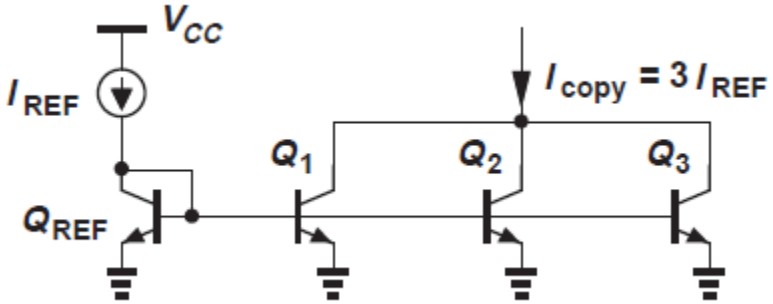
- ✓ ولی اگر تعداد جریان‌های کپی زیاد باشد، چشم‌پوشی از جریان بیس خطای زیادی را در جریان خروجی ایجاد می‌کند.

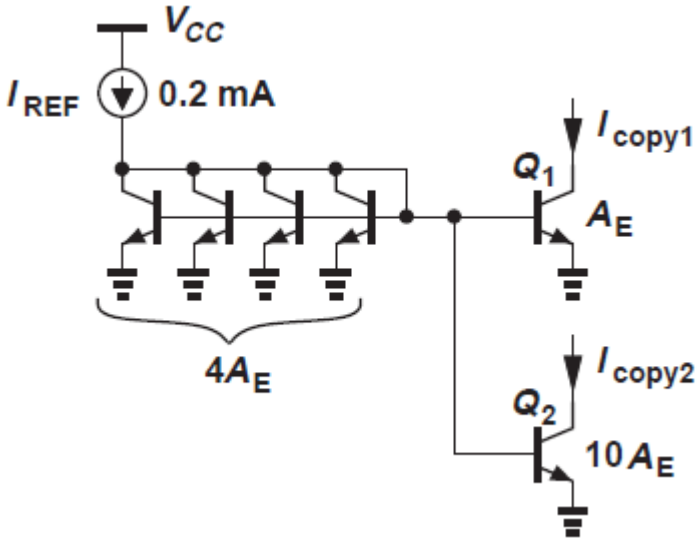
آینه جریان BJT



$$I_{copy1} = 3I_{REF} = 0.75mA$$

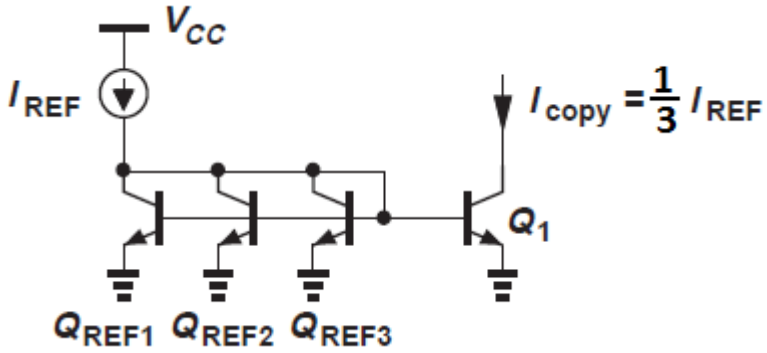
$$I_{copy2} = 2I_{REF} = 0.5mA$$





$$I_{copy1} = \frac{A_E}{4A_E} I_{REF} = 0.05mA$$

$$I_{copy2} = \frac{10A_E}{4A_E} I_{REF} = 0.5mA$$



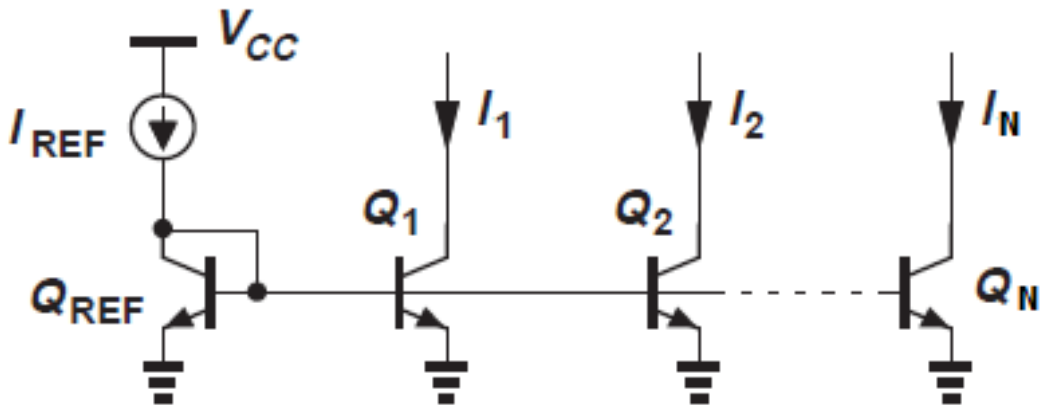
آینه جریان BJT

تمرین:

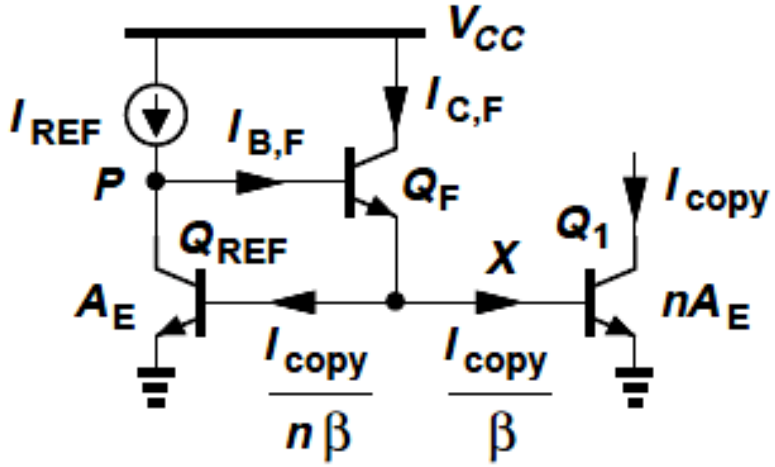
در شکل مقابل اگر β محدود بوده و همه ترانزیستورها مشابه باشند؛

الف) جریان I_N را محاسبه کنید.

ب) اگر $\beta = 100$ باشد، حداکثر چند خروجی می‌توان داشت به طوری که اختلاف جریان خروجی از I_{REF} از 10% بیشتر نشود.



آینه جریان BJT با جبران جریان بیس:



با مقایسه جریان خروجی در دو آینه جریان ذکر شده، ملاحظه می‌شود که خطای ناشی از جریان بیس کاهش می‌یابد:

آینه جریان ساده :

$$I_{copy} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

آینه جریان با جبران جریان بیس:

$$I_{copy} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta^2}}$$

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

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

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

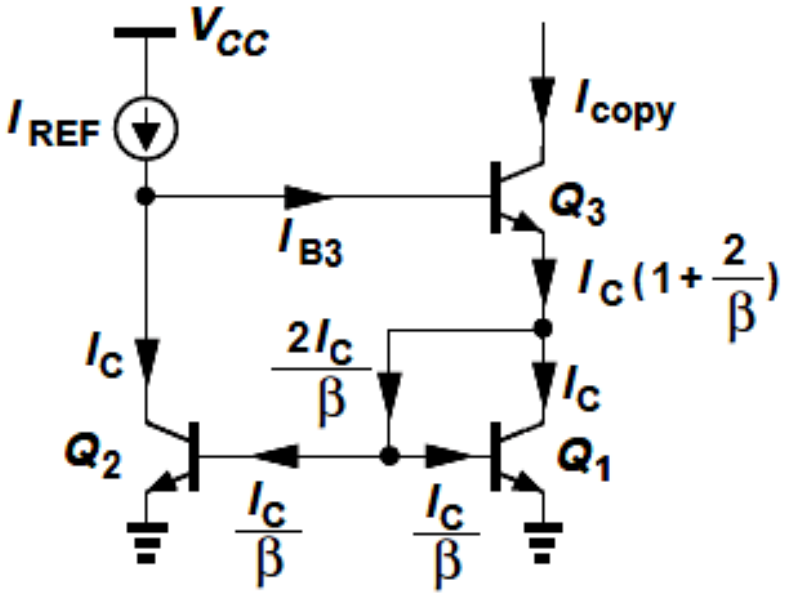
$$= \frac{I_{copy}}{\beta^2}\left(1 + \frac{1}{n}\right) + \frac{I_{copy}}{n}$$

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

$$n = 1 \Longrightarrow I_{copy} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{2}{\beta^2}}$$

آینه جریان BJT

آینه جریان Wilson:



ویژگی آینه جریان ویلسون:

- ✓ کاهش وابستگی جریان خروجی به β
- ✓ افزایش مقاومت خروجی

اگر سطح مقطع امیتر همه ترانزیستورها برابر باشد:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_C$$

$$I_{E3} = I_C\left(1+\frac{2}{\beta}\right)$$

$$I_{B3} = \frac{I_{E3}}{\beta+1} = \frac{I_C\left(1+\frac{2}{\beta}\right)}{\beta+1}$$

$$I_{REF} = I_{C2} + I_{B3} = I_C\left[1+\frac{\left(1+\frac{2}{\beta}\right)}{\beta+1}\right]$$

$$I_{copy} = \beta I_{B3} = I_C\left[\frac{\beta\left(1+\frac{2}{\beta}\right)}{\beta+1}\right]$$

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

$$I_{copy} \approx \frac{I_{REF}}{1+\frac{2}{\beta^2}}$$

آینه جریان Widlar:

$$V_{BE,REF} = V_{BE1} + I_{copy}R_1$$

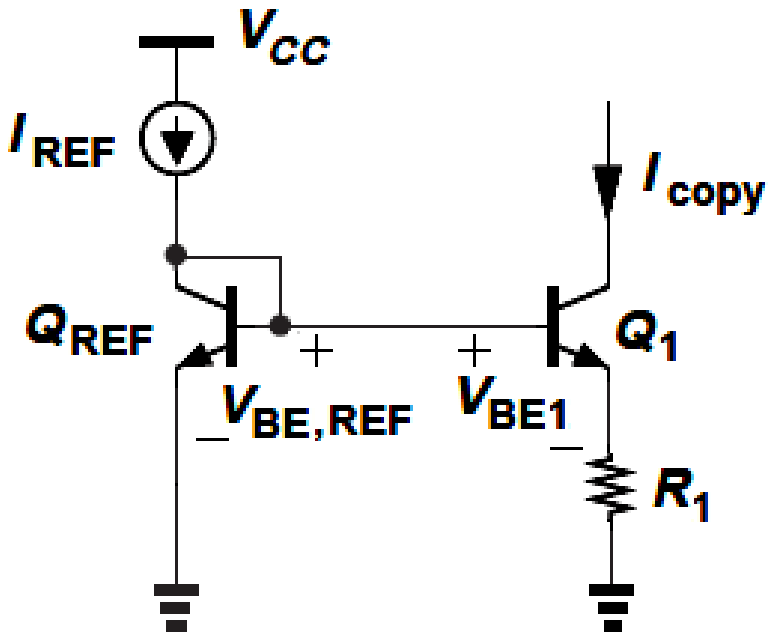
با فرض $I_{S,REF} = I_{S1}$ و $I_{C,REF} \cong I_{REF}$:

$$V_T \ln\frac{I_{REF}}{I_S} = V_T \ln\frac{I_{copy}}{I_S} + I_{copy}R_1$$

$$I_{copy}R_1 = V_T\left(\ln\frac{I_{REF}}{I_S} - \ln\frac{I_{copy}}{I_S}\right)$$

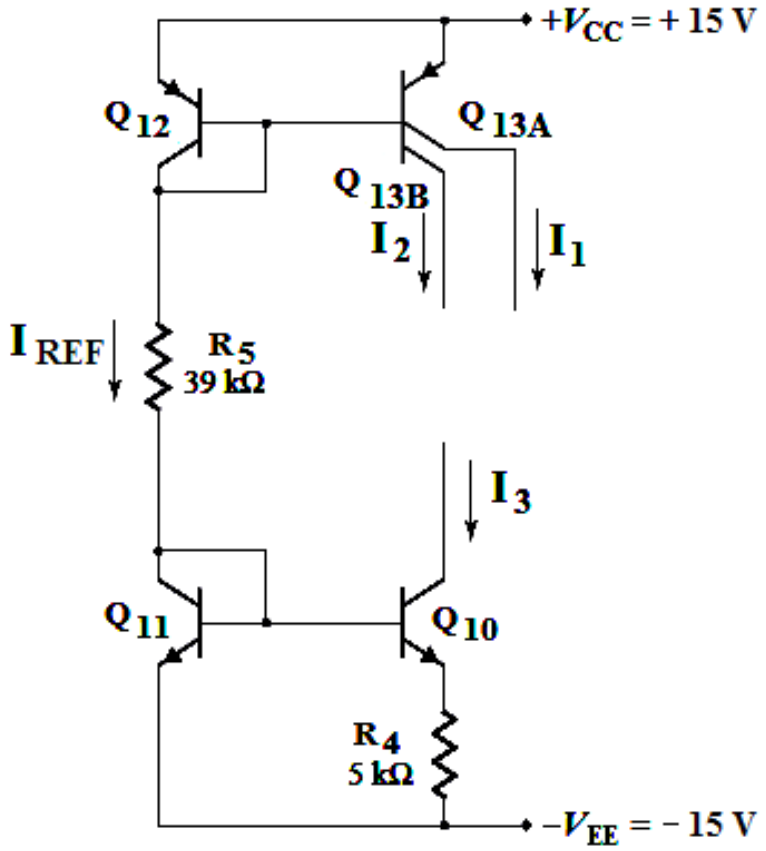
$$I_{copy} = \frac{V_T}{R_1}\ln\left(\frac{I_{REF}}{I_{copy}}\right)$$

با روش سعی و خطا می‌توان مقدار I_{copy} را محاسبه کرد.



مثال: مدار زیر بخشی از مدار بایاسینگ آپ امپ LM741 را نشان می‌دهد. جریان‌های I_1، I_2 و I_3 را به‌دست آورید.

$$I_{S,13A} = \frac{3}{4} I_{S,12} \quad , I_{S,13B} = \frac{1}{4} I_{S,12} \quad , |V_{BE}| = 0.7\ V$$



حل:

$$I_{REF} = \frac{+V_{CC} - V_{EB12} - V_{BE11} - (-V_{EE})}{R_1}$$

$$= \frac{+15 - 0.7 - 0.7 - (-15)}{39} = 0.73\ mA$$

$$I_1 = \frac{I_{S,13A}}{I_{S,12}} I_{REF} = \frac{3}{4}(0.73\ m) = 0.55\ mA$$

$$I_2 = \frac{I_{S,13B}}{I_{S,12}} I_{REF} = \frac{1}{4}(0.73\ m) = 0.18\ mA$$

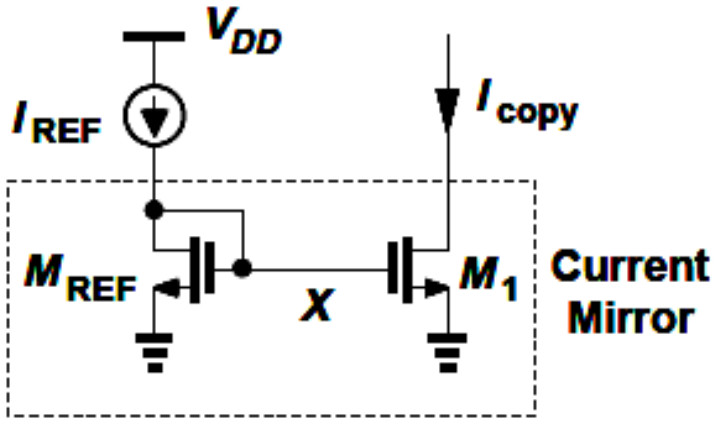
$$I_3 = \frac{V_T}{R_4} \ln\left(\frac{I_{REF}}{I_3}\right) = \frac{25m}{5K} \ln\left(\frac{0.73}{I_3}\right)$$

$$I_3 = 0.005 \ln\left(\frac{0.73}{I_3}\right)$$

با روش سعی و خطا مقدار I_3 را محاسبه می‌کنیم:

$$I_3 = 0.0184\ mA$$

آینه جریان ساده MOSFET:



در این توپولوژی امکان کپی کردن دقیق جریان بدون وابستگی به فرآیند ساخت و دما فراهم می‌شود.

$$I_{G,REF} = I_{G1} = 0 \Longrightarrow I_{D,REF} = I_{REF}$$

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

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

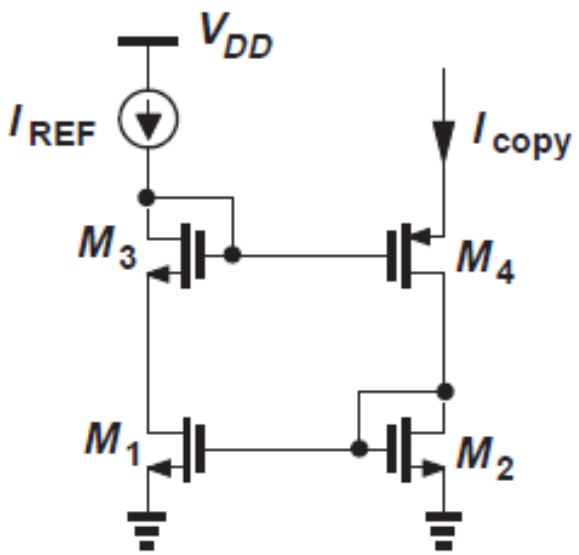
اگر ولتاژ آستانه دو ترانزیستور برابر باشد:

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

اگر دو ترانزیستور مشابه باشند:

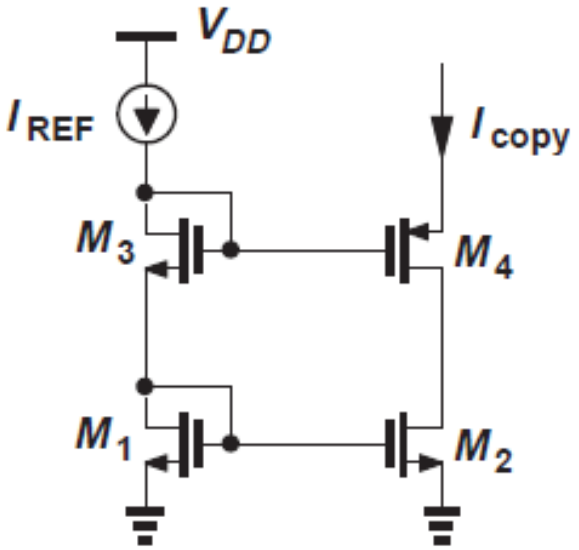
$$I_{copy} = I_{REF}$$

آینه جریان ویلسون



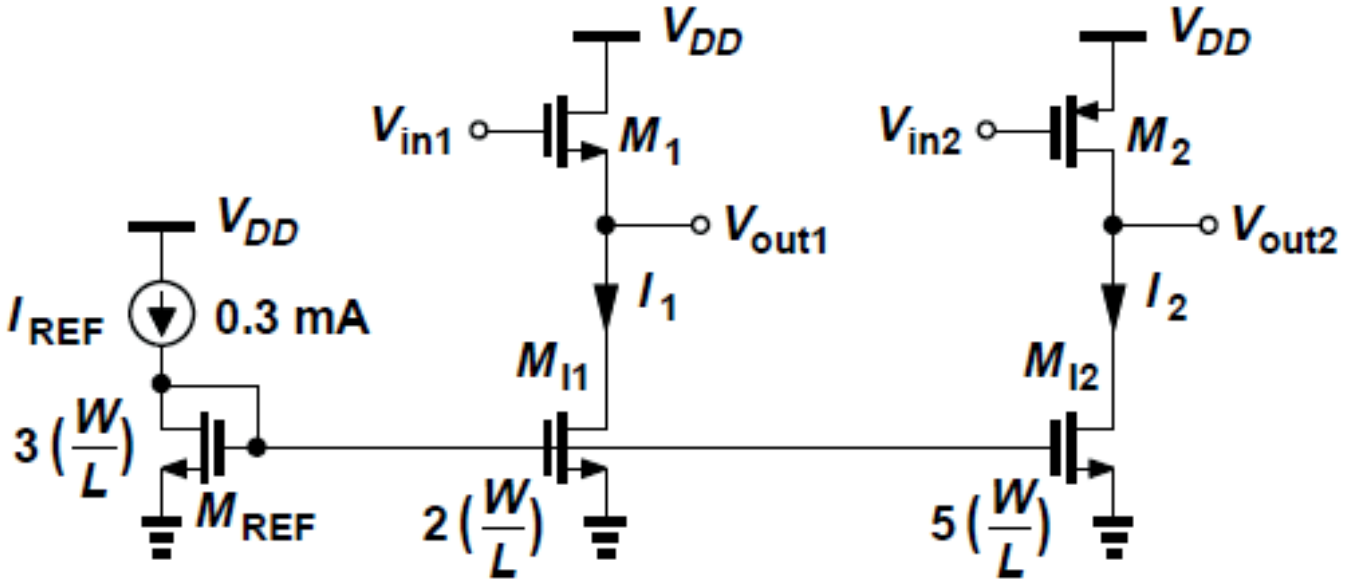
$$\frac{I_{copy}}{I_{REF}} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1}$$

آینه جریان کسکود



$$\frac{I_{copy}}{I_{REF}} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1}$$

مثال: در مدار زیر جریان‌های I_1 و I_2 را به‌دست آورید.



$$I_1 = \frac{2\left(\frac{W}{L}\right)}{3\left(\frac{W}{L}\right)} I_{REF} = 0.2mA$$

$$I_2 = \frac{5\left(\frac{W}{L}\right)}{3\left(\frac{W}{L}\right)} I_{REF} = 0.5mA$$