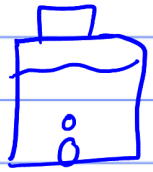
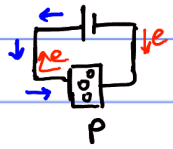
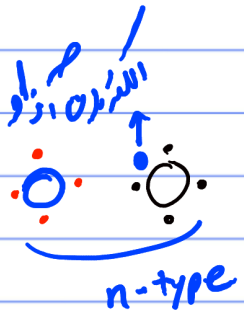
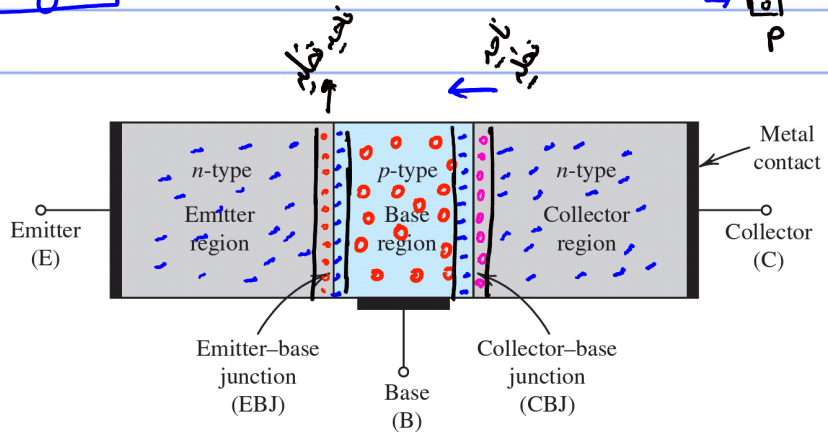
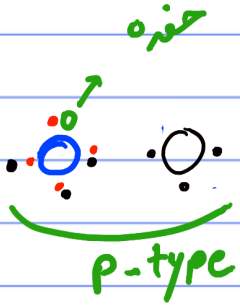
ساختار فیزیکی ترانزیستور BJT

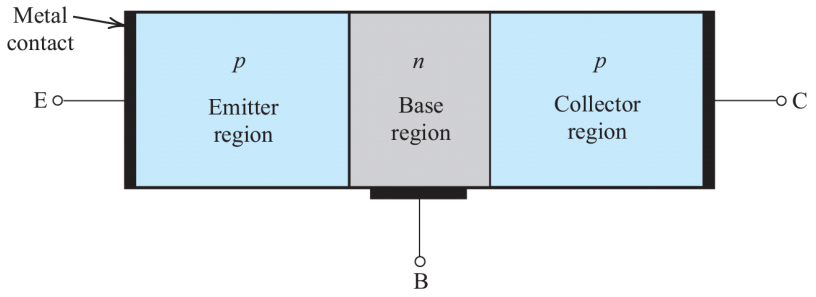




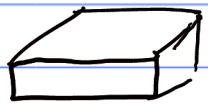


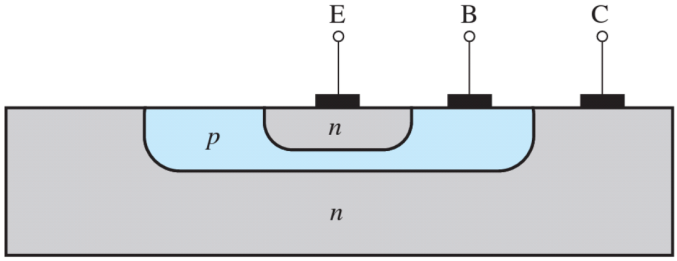




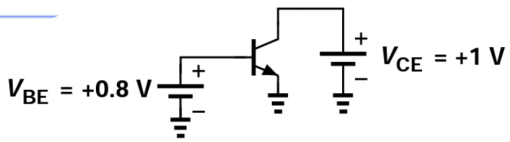


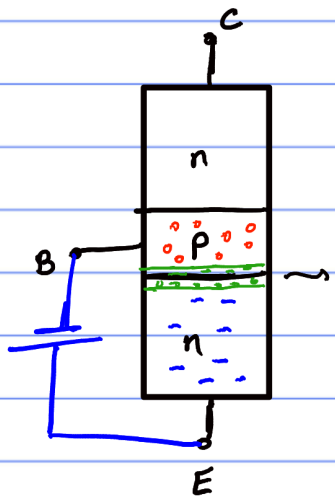
ترانزیستور را کنار هم قرار دادیم.





: cut off

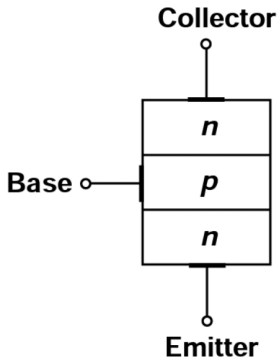


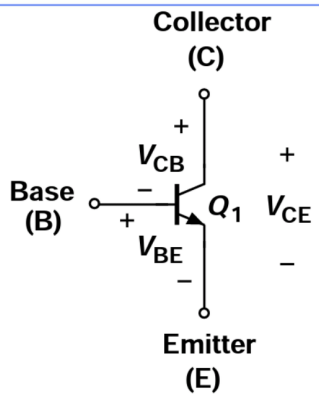


عرض مساحت ناحیه تهی بیشتر

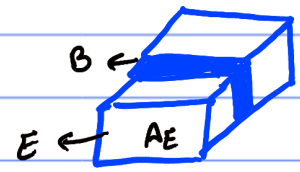
جریان به صفر نزدیک‌تر می‌شود.

روابط مداری جلسه قبل بحث شد و این مباحث بیشتر جنبه اطلاعات عمومی دارد.



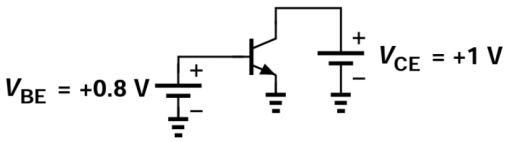


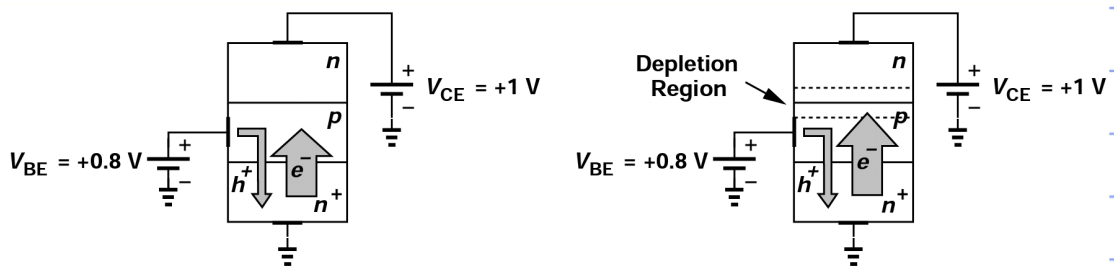




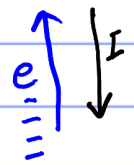
ناحیه فعال (active)

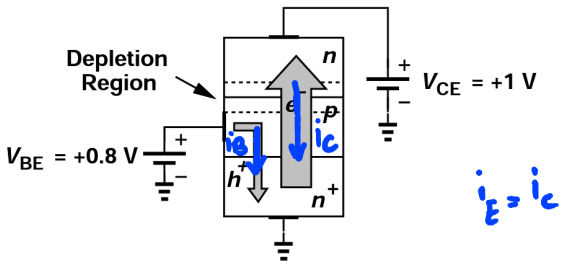
فرض کنید V_{BE} و V_{CE} را به گونه‌ای بایاس کردیم که $V_{BC} < 0$ یا $V_{CE} > V_{CE(sat)}$ شود آنگاه در ناحیه فعال است.





(a) (b)





(c)

$i_E = i_C + i_B$

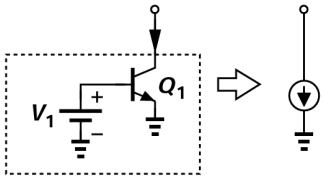
رابطه دقیق جریان: در ناحیه active (فعال) اثبات می‌شود که جریان I_C رابطه نمایی با ولتاژ بیس امیتر (npn) و امیتر بیس (pnp) دارد.

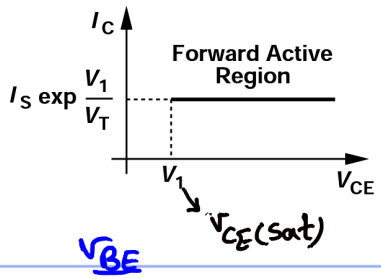
$$\boxed{I_C = I_S\, e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}$$

$V_T = 25\,mV$ $\quad I_S \propto A_E$ فقط برای ناحیه فعال

ساختن یک منبع جریان ساده

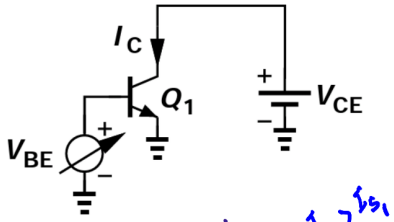
جریان ترانزیستور متصل به V_{BE} ثابتی داشت پس با ثابت نگه داشتن V_{BE} می‌توانیم منبع جریان بسازیم.

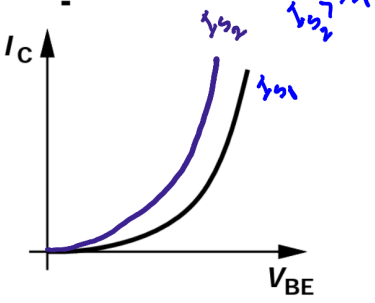




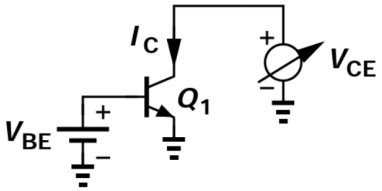
$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

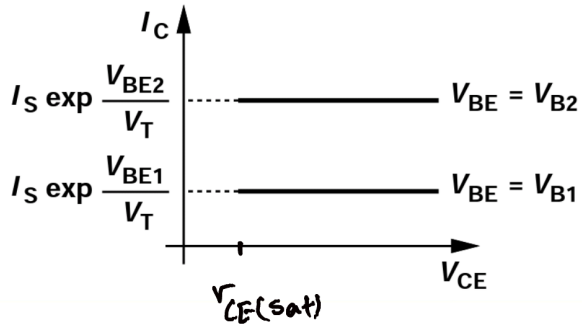
مشخصه I_C-V_{CE} ترانزیستور - (در ناحیه فعال)





با فرض $V_{CE} > V_{CE(sat)}$ ← فعال باشد



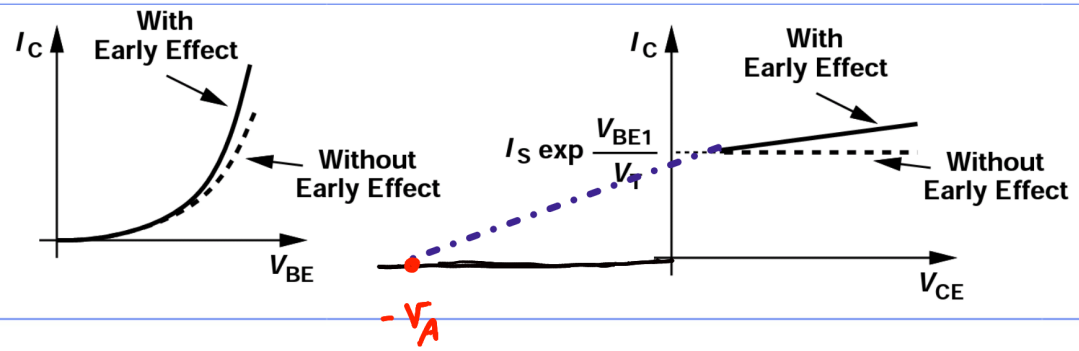


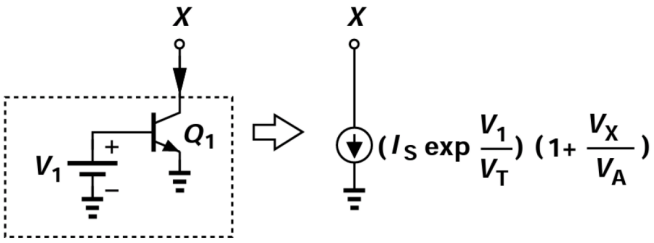
در حالت فعال $V_{CE} > V_{CE(sat)}$

اثر ولتاژ ارلی

در عمل مشاهده می‌شود که با افزایش V_{CE} جریان با شیب خیلی کم زیاد می‌شود

رابطه دقیق ترانزیستور ناحیه فعال با اثر ارلی $I_c = I_s\, e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}\left(1+\frac{V_{CE}}{V_A}\right)$



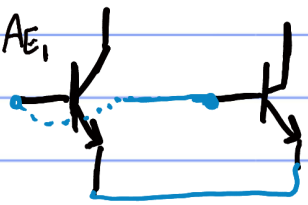


سوال: عیب این منبع جریان چیست؟

نکته: در رابطه $I_c = I_s e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$:

✓ I_c با I_s رابطه خطی دارد. یعنی اگر V_{BE} تغییر نکند I_s n برابر شود $\rightarrow$ I_c هم n برابر می‌شود.

✓ اگر ۲ ترانزیستور از یک سری باشند جریان‌های آن‌ها به نسبت I_s است.

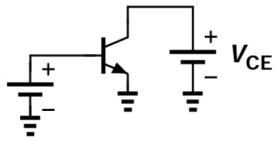


$A_{E_1} = n A_{E_2} \rightarrow I_{S_1} = n I_{S_2} \xrightarrow[\text{موازی}]{V_{BE}\text{ برابر}} I_{C_1} = n I_{C_2}$

تذکر: اگر V_{BE}ها برابر نباشد رابطه خطی بین جریان ترانزیستورها I_s وجود ندارد

ناحیه اشباع

V_{BE} =

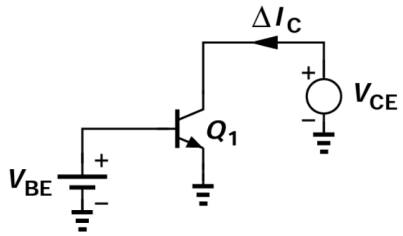


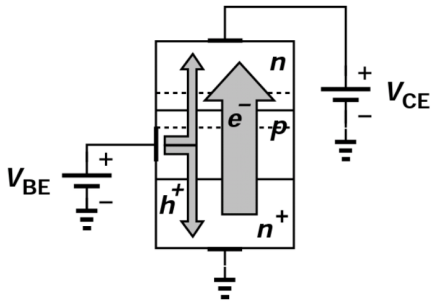
if $v_{CE} < v_{BE} \rightarrow v_{BC} > 0$

یا $v_{CE} < v_{CE(sat)}$

$v_{BE} > 0$

در این ناحیه $v_{BC} > 0$ پس تعدادی از حفره‌ها به سمت کلکتور هم می‌روند



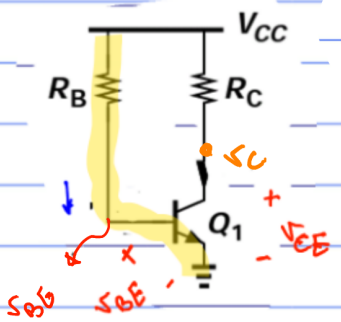


در کل در این ناحیه کنترل روی جریان‌ها خواهیم! β مقدار کمتری می‌شود و جریان کلکتور هم کمتر می‌شود.

~~$I_C = \beta I_B$~~ ~~$I_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$~~

در این ناحیه ولتاژ $v_{CE} \approx 0.2$ (npn) و v_{EC} (pnp) $= 0.2$ است.

انواع مدارات بایاس



مدار بایاس ثابت:

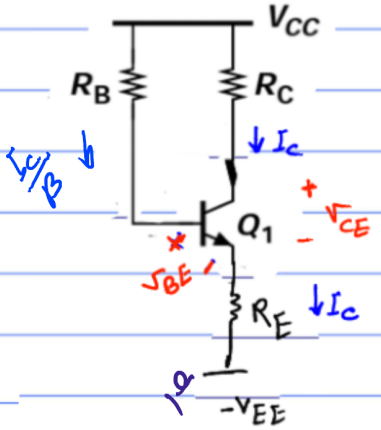
$$KVL: \; -V_{CC} + R_B i_B + V_{BE} = 0$$

$$i_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \xrightarrow{\text{قبل}} I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

شرط فعال: $V_{CE} > V_{CE}(sat) \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C > V_{CE}(sat)$

نکته: β پارامتری است که وابسته به دما است یعنی با تغییرات دما β تغییر می‌کند.

عیب مدار: این مدار به β وابسته است لذا به دما وابسته است و طراحی ما وابستگی به دمای محیط دارد. پایدار نیست!



$$KVL: \; -V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_C - V_{EE} = 0$$

($I_B = I_C/\beta$)

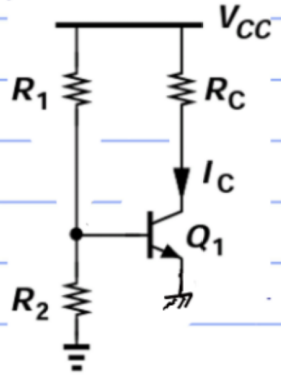
$$I_C = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{\left(R_E + \frac{R_B}{\beta}\right)} =$$

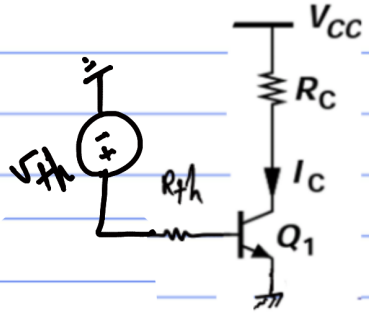
ظاهرا به β وابسته است ولی با توجه به $\left(R_E + \frac{R_B}{\beta}\right)$ می‌توان از $\frac{R_B}{\beta}$ صرف نظر کرد. یعنی مقاومت R_E وابستگی مدار را به β و دما از بین می‌برد.

بایاس محاسبه شده به فرض فعال بودن ok

شرط فعال بودن $V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C(R_C + R_E) > V_{CE}(sat)$

مدار بایاس تقسیم ولتاژی

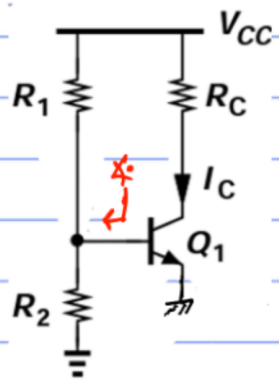


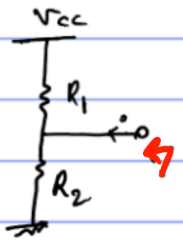


۱) روش دقیق

$$I_B = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th}}$$

$$I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th}}$$





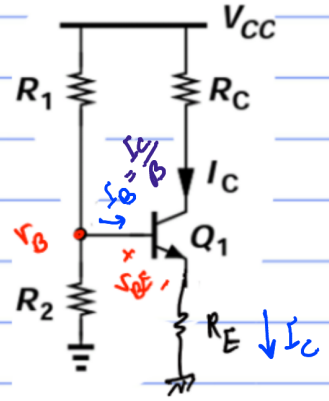
ولتاژ مدار باز

از دید بیس معادل حساب می‌کنیم

$$V_{th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad , \quad R_{th} = R_1 \| R_2$$

معادل مقاومت ها وقتی که منابع مستقل خاموش هستند





روش تقریبی: اگر بتوان از جریان بیس صرف نظر کنیم R_1 و R_2 سری می‌شوند و به راحتی می‌توان ولتاژ بیس را حساب کرد.

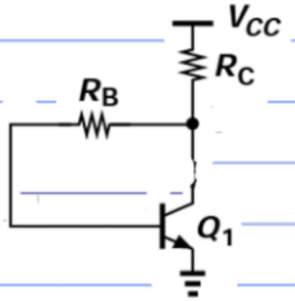
در این روش از $R_{th} = R_1 \| R_2$ صرف نظر کردیم.

$$V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \longrightarrow V_E = V_B - V_{BE} = V_{CC} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE}$$

$$\rightarrow I_E = I_C = \frac{V_E}{R_E} = \left(V_{CC} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE}\right) / R_E$$

$$I_E = I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{th}}{\beta}}$$

به شرط آنکه $V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_E + R_C) > V_{CE(sat)}$



$V_{BE} = 0.7$

$V_{CE}(sat) = 0.2$

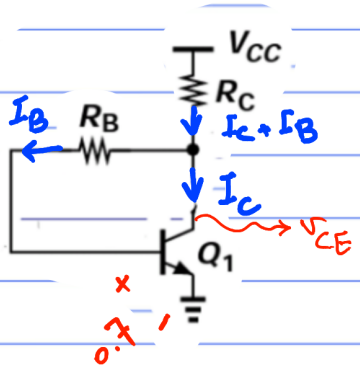
$R_B = 1k$

$R_C = 10k$

$V_{CC} = 6V$

$\beta = 100$

فرض فعال:



$KVL: -6 + 10(I_C + \frac{I_B}{100}) + V_B + 0.7 = 0$

$I_C = \frac{5.3}{10} = 0.53\ mA$

V_{CE}? $\quad V_{CE} = 6 - 10(0.53 + 0) = 0.7$ ✓ > 0.2

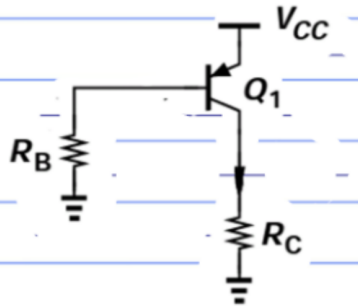
در ناحیه فعال است.

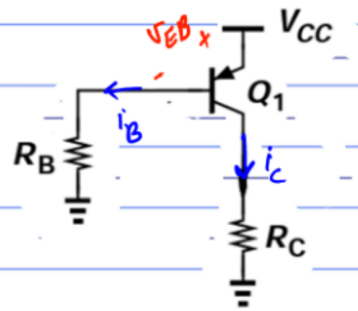
توان مصرفی ترانزیستور چند میلی وات؟

$P = V_{CE} \cdot I_C = 0.7 * 0.53 = 0.35\ mW$

نقش مقاومت R_B چیست؟

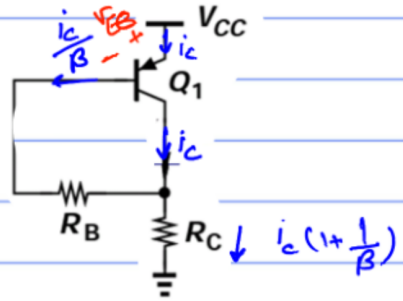
تضمین می‌کند V_{CE} از V_{BE} بیشتر و همیشه فعال $V_{CE} = V_{BE} + R_B I_B$ باشد.





$$i_B = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{R_B} \longrightarrow i_C = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{\frac{R_B}{\beta}}$$

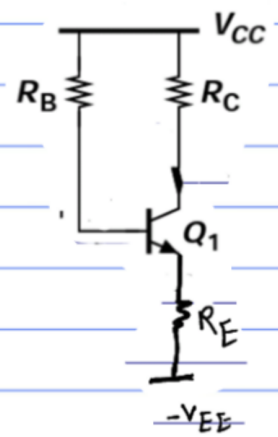
$$V_{EC} = V_{CC} - R_C i_C > V_{EC}(sat)$$



$$KVL: -V_{CC} + V_{EB} + R_B \frac{i_C}{\beta} + R_C i_C \left(1+\frac{1}{\beta}\right) = 0$$

$$i_C = \frac{V_{CC} - V_{EB}}{\frac{R_B}{\beta} + R_C\left(1+\frac{1}{\beta}\right)}$$

شرایط صرف نظر کردن از جریان و مقاومت بیس



$$KVL: \quad -V_{CC} + R_B i_B + V_{BE} + R_E i_C - V_{EE} = 0$$

یا

$$I_C = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta}}$$

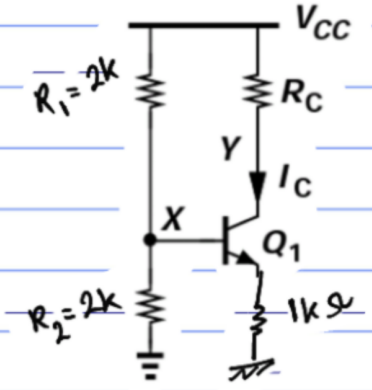
اگر عبارت $R_B i_B$ از $R_E i_C$ خیلی کمتر باشد از مقاومت و جریان بیس

در مقابل امیتر صرف نظر می‌کنیم.

$$\frac{R_B}{\beta} \ll R_E \rightarrow R_E > 10 \frac{R_B}{\beta}$$

آنگاه از مقاومت R_B در مقابل R_E صرف نظر می‌کنیم.

در این حالت مثل این است که R_B در مدار وجود ندارد و V_{CC} به بیس می‌رسد.



نکته: برای مدار تقسیم ولتاژ شرط صرف نظر کردن

$$10 (R_1 \| R_2) < \beta R_E$$

در این حالت در شرط برقرار بود

$$V_x = V_{th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_C = I_E = (V_{th} - V_{BE}) / R_E$$

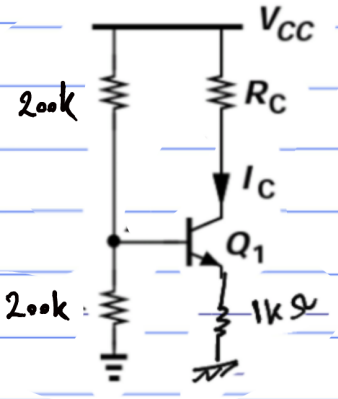
مثلاً در مدار بالا اگر $R_1 = 200$ و $R_2 = 200k$ باشد $\leftarrow R_{th} = 100k$

و می‌توان صرف نظر کرد. $1k$ و امیتر $\frac{R_{th}}{\beta} = \frac{100}{100} = 1k$

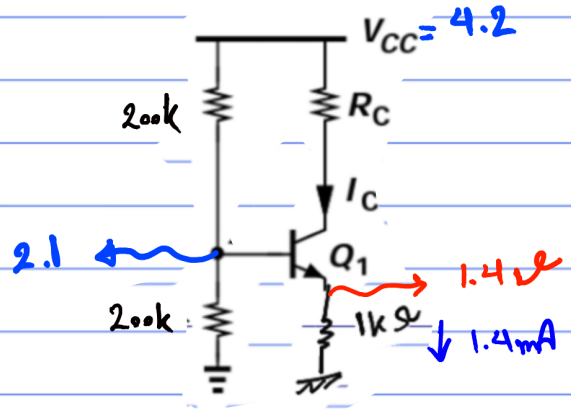
در مدار زیر I_C چند میلی آمپر است؟

$V_{BE(on)} = 0.7$

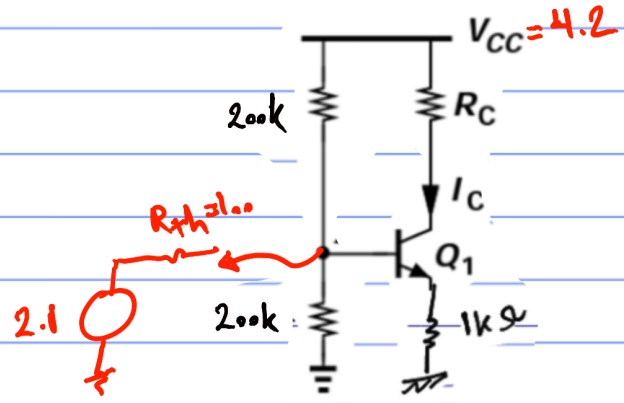
$V_{CC} = 4.2\ V$



راه حل

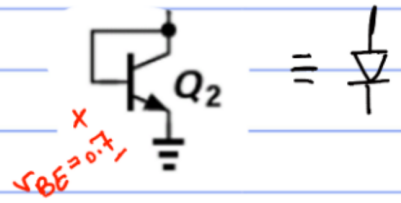


می توان از R_{th} صرف نظر کرد ← خطا
با 200k || 200k



$$I_C = \frac{2.1 - 0.7}{1 + \frac{100}{\beta}} = \frac{1.4}{2} = 0.7\ mA$$

ترانزیستور اتصال دیودی

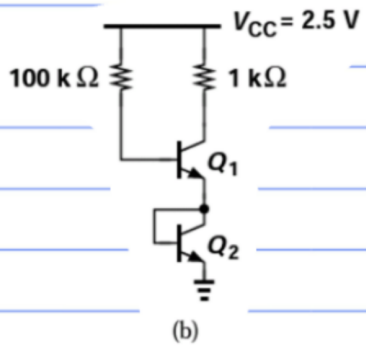


اگر Q_2 روشن باشد

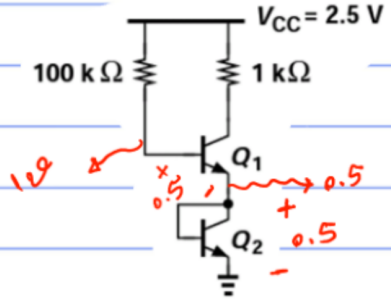
در این مدار $V_{BE} = V_{CE}$

if $V_{BE} = 0.7 \longrightarrow \underbrace{V_{CE}}_{0.7} > \underbrace{V_{CE(sat)}}_{0.2}$

همواره این ترانزیستور اگر روشن باشد ← فعال است و اشباع نمی‌شود.



$$\begin{cases} V_{BE} = 0.5 \\ V_{CE}(sat) = 0 \\ \beta = 100 \end{cases}$$

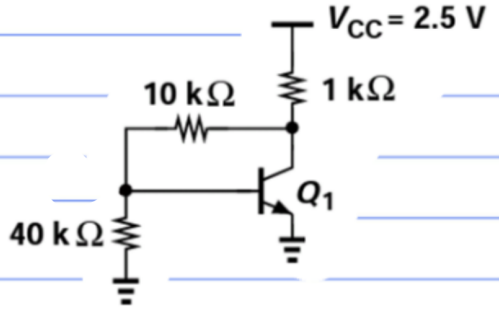


$$I_B = \frac{2.5 - 1}{100k} = \frac{1.5}{100}\ mA \longrightarrow I_C = 1.5mA$$

Q_2 حتما فعال است چون روشن و اتصال دیودی است.

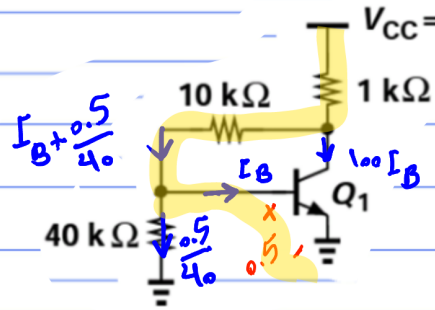
$$V_{CE_1} = (2.5 - 1 \times I_C) - (0.5) = 0.5 > 0$$

Q_1 هم فعال است.



در مدار زیر I_C چند میلی آمپر است؟

$$\begin{cases} V_{BE} = 0.5 \\ \beta = 100 \end{cases}$$

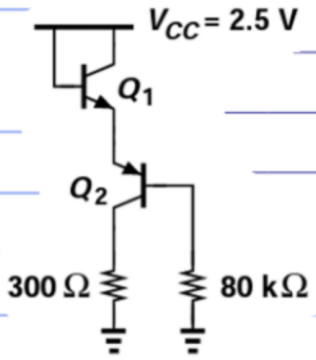


$$KVL: -2.5 + \left(100 I_B + \frac{0.5}{40}\right) + 10\left(I_B + \frac{0.5}{40}\right) + 0.5 = 0$$

$$-2.5 + I_{C_1} + 1.75 = 0 \longrightarrow I_{C_1} = 0.75\ mA$$

$$V_{CE_1} = 2.5 - \left(100 I_B + 0 + \frac{0.5}{40}\right) = 2.5 - 0.75 + 0.125 > 0$$ فعال

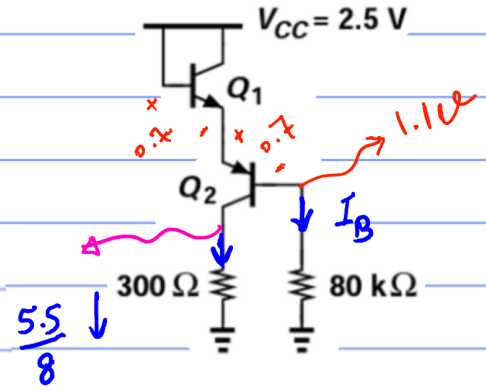
تمرین: مدار بالا را با فرض $V_{BE} = 0.7$ تحلیل کنید.



$\beta_{npn} = 2\beta_{pnp} = 100$

$|V_{BE}| = 0.7$ ← npn $V_{BE} = 0.7$; pnp $V_{EB} = 0.7$

$|V_{CE}|_{sat} = 0.2$



$I_{B_2} = \frac{1.1}{80} \rightarrow I_{C_2} = 50 \times \frac{1.1}{80} = \frac{5.5}{8}$

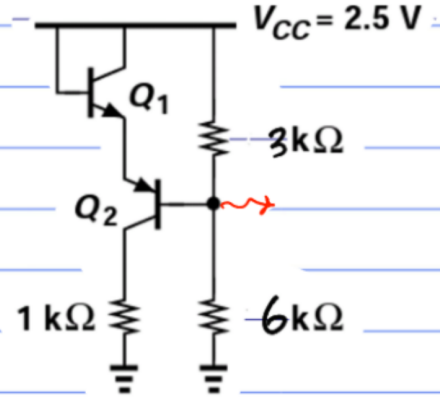
$\simeq 0.68\,mA$

Q_1 دیودی ← فعال

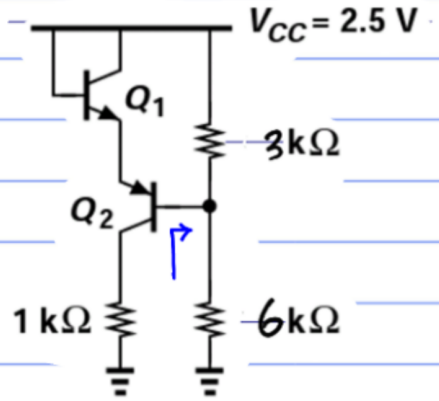
$V_{C_2} = 0.3 \times \frac{5.5}{8} = 0.2$

$V_{E_2} = 1.8$

$V_{EC_2} = 1.8 - 0.2 > 0.2$: Q_2 فعال Q_2

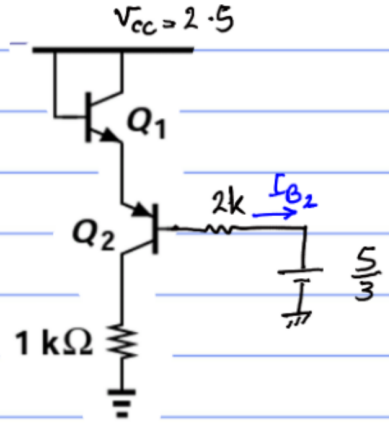


در اصیتِ Q_2 مقاومتی نداریم که R_{th} را با آن مقایسه کنیم
پس صرف نظر می‌کنیم.



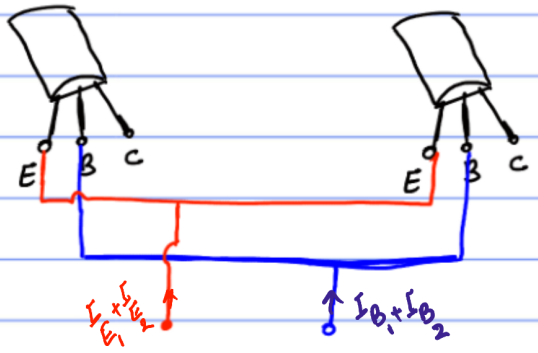
$6 \| 3 = 2k$

$2.5 \dfrac{6}{6+3} = \dfrac{5}{3}$



$$I_{B_2} = \frac{2.5 - 0.7 - 0.7 - \frac{5}{3}}{2k}$$

اتصال ترانزیستورها - موازی کردن

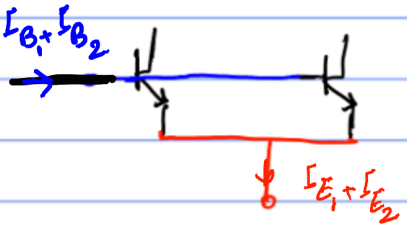


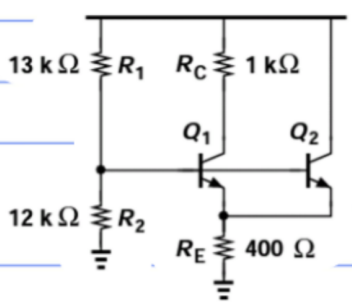
موازی کردن ترانزیستورها از BE

یعنی $V_{BE_1} = V_{BE_2}$

در این حالت چون V_{BE}ها برابرند رابطه خطی بین جریان کلکتور و I_S است.

$$\frac{I_{C_1}}{I_{C_2}} = \frac{I_{S_1}}{I_{S_2}}$$





$A_{E_1} = 2A_{E_2}$

$\beta = 100$

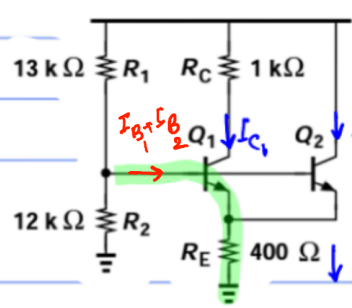
$V_{BE} = 0.7$

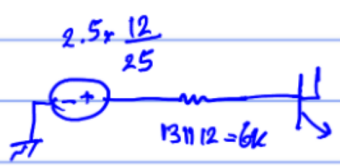
$0.6\ I_{C_1}$

$\frac{1}{10} \times 3\ I_{C_1}$

1.2

موازی $V_{BE_1} = V_{BE_2} \longrightarrow \frac{I_{C_1}}{I_{C_2}} = \frac{2A}{A} = 2 \longrightarrow I_{C_1} = 2I_{C_2}$





$2I_{C_2} + I_{C_2} = 3I_{C_2}$

$$\begin{cases} KVL: -1.2 + 6(I_{B_1}+I_{B_2}) + 0.7 + 0.4(I_{C_1}+I_{C_2}) = 0 \\ I_{C_1} = 2I_{C_2} \end{cases}$$

$$-1.2 + 6\left(\frac{I_{C_1}}{100} + \frac{\frac{1}{2}I_{C_1}}{100}\right) + 0.7 + 0.4\left(I_{C_1} + \frac{1}{2}I_{C_1}\right) = 0 \longrightarrow 0.6\,I_{C_1} = 0.5 \longrightarrow I_{C_1} = \frac{5}{6}\,mA$$