محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

جلسه هشتم

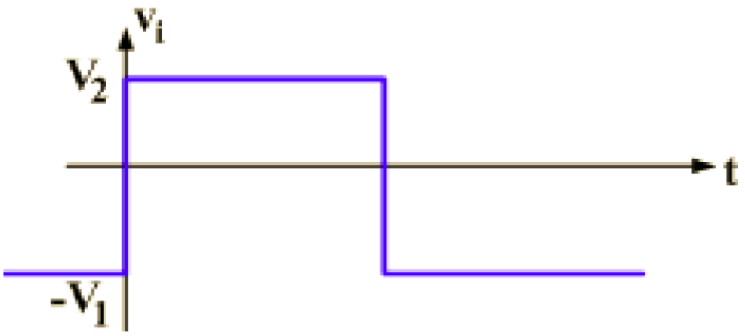
برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

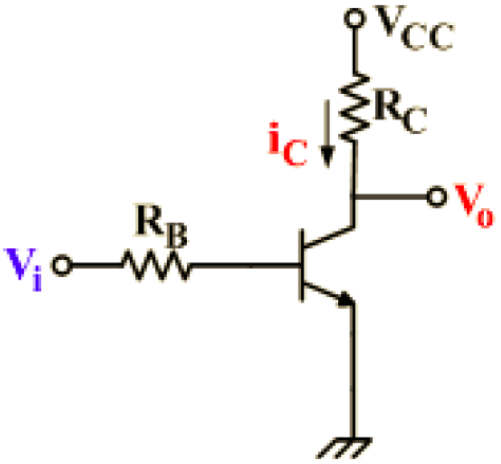
نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

تمامی حقوق این جزوه برای **محمد اعرابیان** محفوظ است.

زمان قطع و وصل ترانزیستور

فرض کنید که در مدار شکل مقابل، سطح ولتاژ V_2 و $-V_1$ به ترتیب برای به اشباع رسیدن و قطع ترانزیستور کافی است.





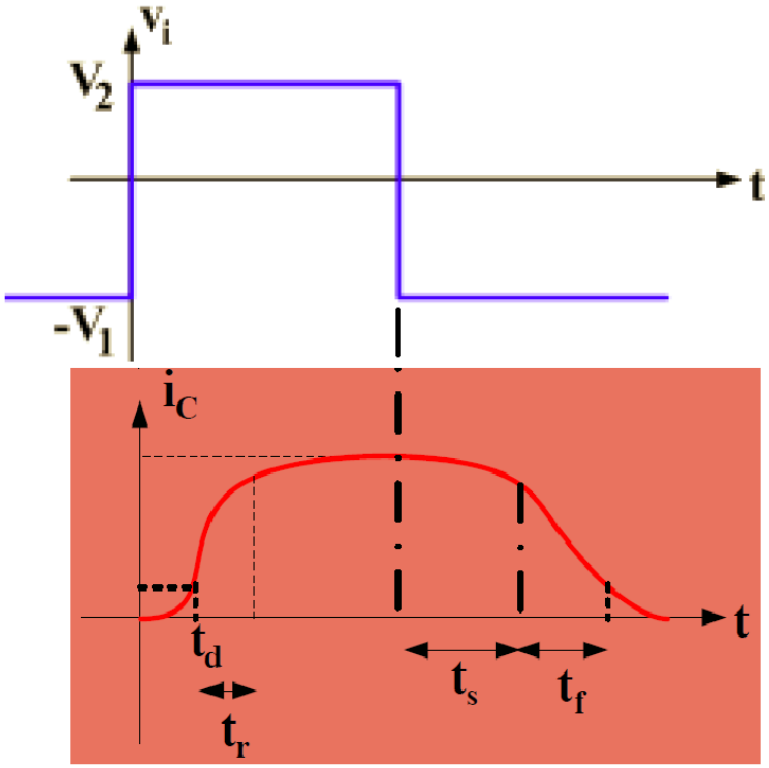
ولی هنگامیکه ورودی تغییر حالت می‌دهد، تأخیرهایی در زمان قطع و وصل پدید می‌آید.

t_d تأخیر اولیه است تا ولتاژ دیود بیس امیتر به آستانه هدایت برسد.

t_r زمان لازم برای روشن شدن و به اشباع رفتن ترانزیستور است.

t_s زمان لازم جهت تخلیه ناقل‌های اقلیت اضافی (ناشی از وضعیت اشباع) در بیس است.

t_f زمان رفتن ترانزیستور از حالت روشن به خاموش است.

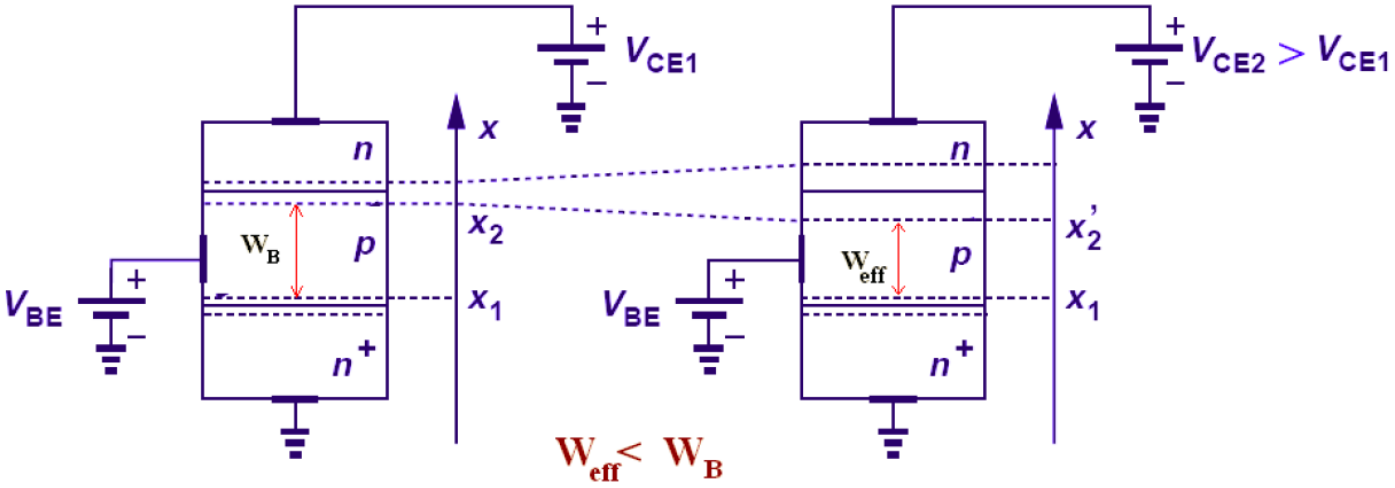


$$\begin{cases} t_{on} = t_d + t_r \\ t_{off} = t_s + t_f \end{cases}$$

این زمان‌ها در رنج چند ns است.

اثر ارلی (Early Effect)

در عمل این ادعا که جریان کلکتور مستقل از V_{CE} است، چندان دقیق نیست. هرگاه V_{CE} افزایش بیابد در آن صورت عرض ناحیه تخلیه پیوند بیس-کلکتور زیاد می‌شود. لذا عرض موثر بیس کاهش می‌یابد و به همین دلیل جریان کلکتور افزایش می‌یابد.



$$I_c = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}$$

$$n_{P0} \approx \frac{n_i^2}{N_A} \Longrightarrow I_S = \left(\frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W}\right)$$

$$I_c = \left(\frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W_{eff}}\right) \cdot e^{V_{BE}/V_t} = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A} \frac{1}{W_B - \Delta W_B} e^{V_{BE}/V_t}$$

$$\Longrightarrow \left(\frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W_{eff}}\right) \cdot e^{V_{BE}/V_t} \times \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta W_B}{W_B}}\right) \Longrightarrow I_c = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t} \times \left(1 - \frac{\Delta W_B}{W_B}\right)$$

$$\text{در نیمه هادی ها} \Longrightarrow \frac{\Delta W_B}{W_B} = \frac{V_{CE}}{V_A}$$

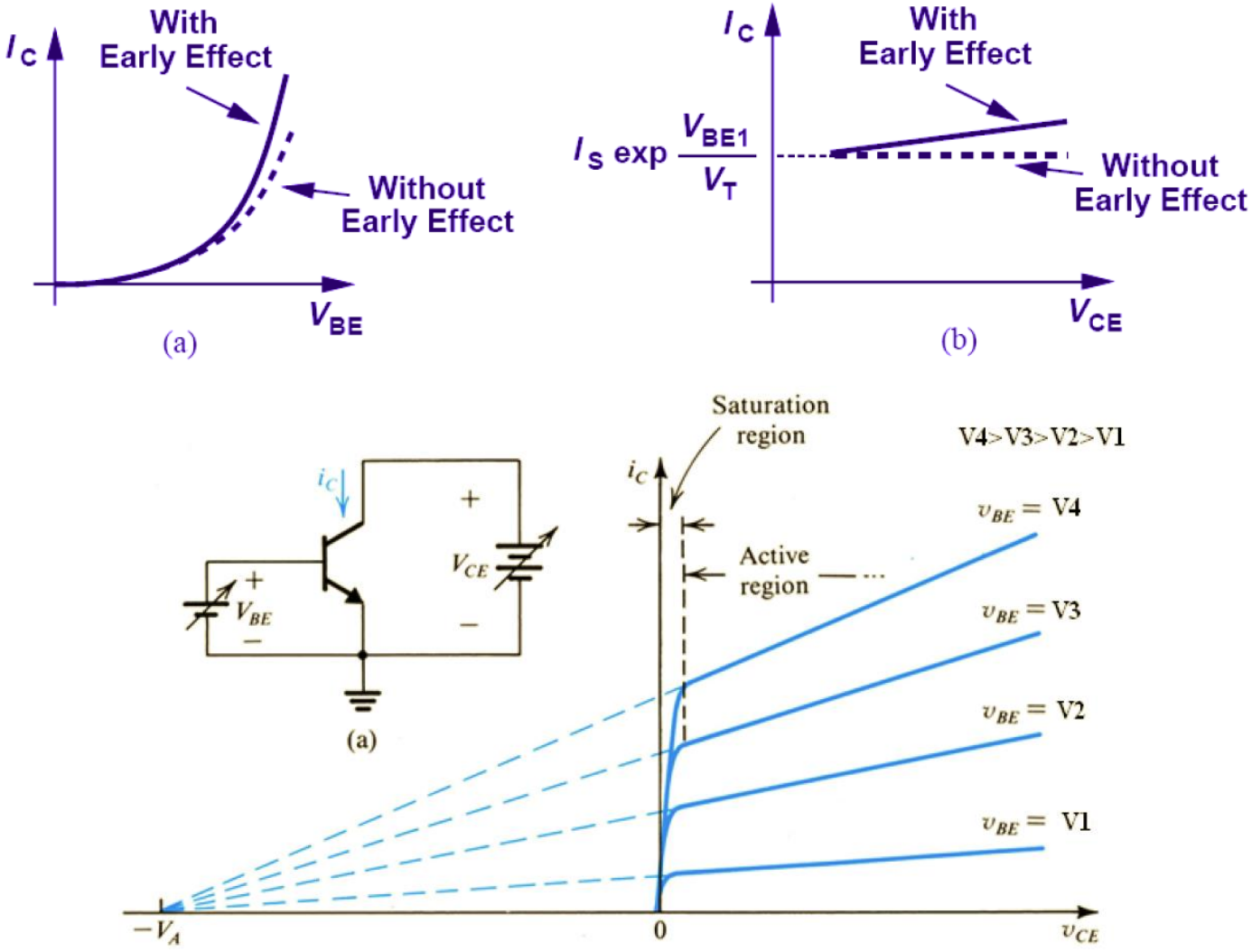
$$I_c = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t} \times \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

V_A ولتاژ ارلی می‌باشد.

اثر ارلی سبب می شود جریان کلکتور به صورت جزئی تابعی از ولتاژ V_{CE} شود.

اثر ارلی سبب می شود جریان کلکتور در مقایسه با جریان کلکتور یک ترانزیستور ایده‌آل افزایش یابد.

ولتاژ ارلی معمولا بین $15v$ تا $150v$ است.



مدارهای بایاس

منظور از مدار بایاس، مداری می‌باشد که در آن دیود BE در حالت اتصال مستقیم و دیود BC در حالت اتصال کوتاه قرار گیرد که از ترانزیستور به عنوان تقویت کننده استفاده شود. (ناحیه فعال)

به طور کلی سه نوع بایاس یا تغذیه برای بردن ترانزیستور به ناحیه فعال داریم.

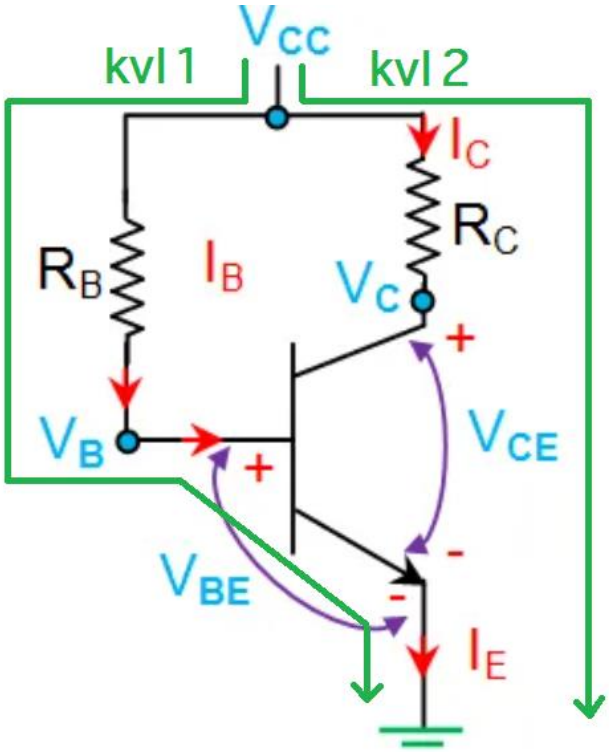
۱) بایاس ثابت (مستقیم)، (که به دو صورت با مقاومت امیتر و بدون مقاومت امیتر تقسیم می‌شود.)

۲) بایاس اتوماتیک (خودکار)

۳) بایاس سرخود (مستقل از بتا)

برای حل این مدارات $\boldsymbol{I_B \Longrightarrow I_E \Longrightarrow I_C \Longrightarrow V_{CE}}$ عمل می‌شود

ساده ترین مدار **بایاس ثابت** است که به صورت زیر می‌باشد.



* برای محاسبه $\boldsymbol{I_B}$ باید $\boldsymbol{kvl1}$ در ورودی زد

$$kvl1: -V_{CC} + R_B(I_B) + V_{BE} = 0$$

$$\Longrightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$\Longrightarrow I_E = (1+\beta)I_B \quad , \quad I_C = (\beta)\, I_B$$

* برای محاسبه $\boldsymbol{V_{CE}}$ باید $\boldsymbol{kvl2}$ در خروجی زد

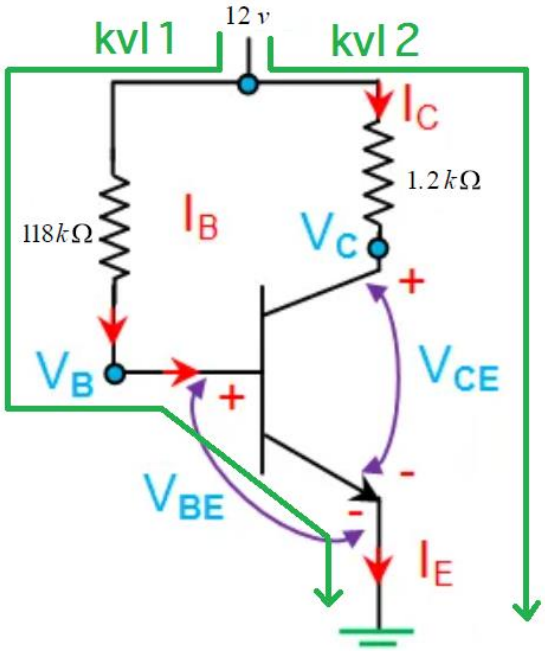
$$kvl2: -V_{CC} + R_C(I_C) + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C)$$

$$V_E = 0 \quad , V_B = V_{BE} \quad , V_C = V_{CE}$$

در این مدار جریان I_C وابسته به β بوده و با تغییرات دما $I_C = (\beta)\, I_B + I_{CEo}$ متغیر است. لذا تغییر I_C می‌کند و مدار پایداری حرارتی خوبی ندارد. $I_{CEo} = (1+\beta)I_{CBo}$

مثال: در مدار تغذیه ثابت در شرایط $\beta = 50$ و $V_{BE} = 0.2v$ نقطه کار و ولتاژ پایه‌های ترانزیستور را بدست آورید.



$$kvl1: -12 + 118k(I_B) + 0.2 = 0$$

$$\Longrightarrow I_B = \frac{12 - 0.2}{118k} = 100\mu A$$

$$\Longrightarrow I_E = (1+50)100\mu A = 5.1mA$$

$$\Longrightarrow I_C = (\beta)\, I_B = 50 \times 100\mu A = 5mA$$

$$\Longrightarrow I_E \approx I_C$$

$$\text{kvl2}: -12 + 1.2k(5mA) + V_{CE} = 0$$

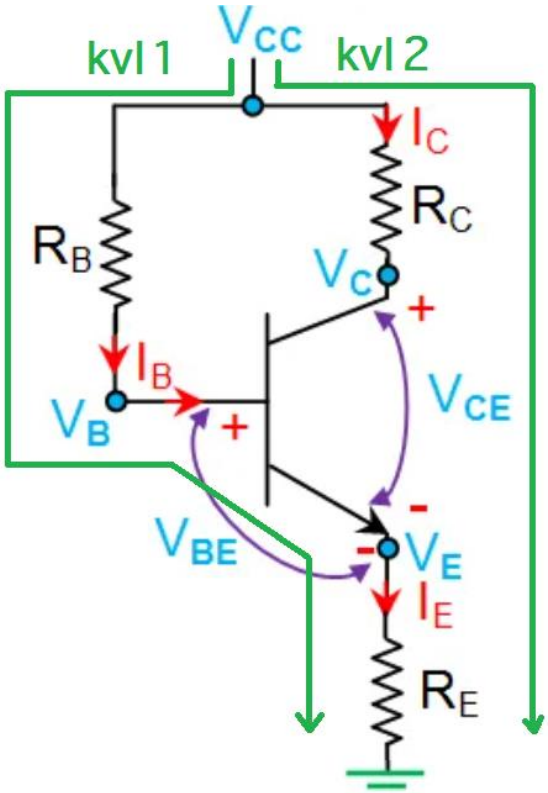
$$V_{CE} = 12v - 6v = 6v$$

$$V_E = 0 \quad , V_B = 0.2v \quad , V_C = 6v$$

بررسی پایداری

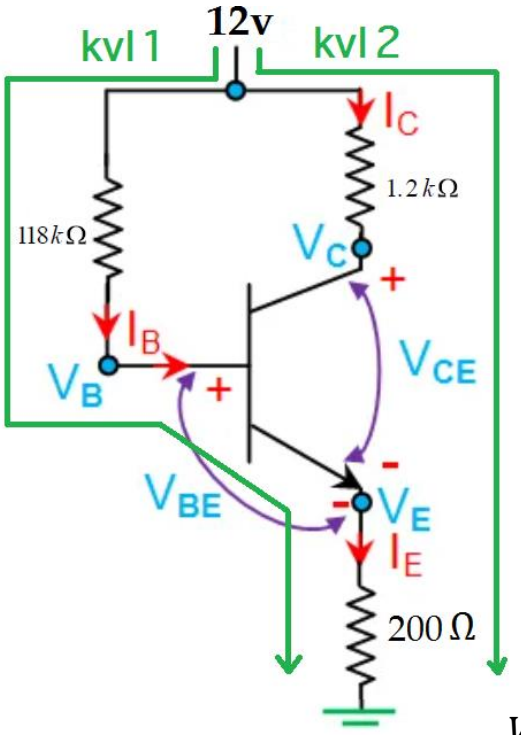
با افزایش حرارت جریان نشتی کلکتور زیاد شده و باعث افزایش جریان کلکتور می‌شود و افزایش جریان کلکتور افزایش مجدد حرارت را در پی خواهد داشت، که باعث ناپایداری حرارتی می‌گردد. $I_C \Uparrow I_{CBo} \Uparrow$ دما

بایاس ثابت با مقاومت امیتر



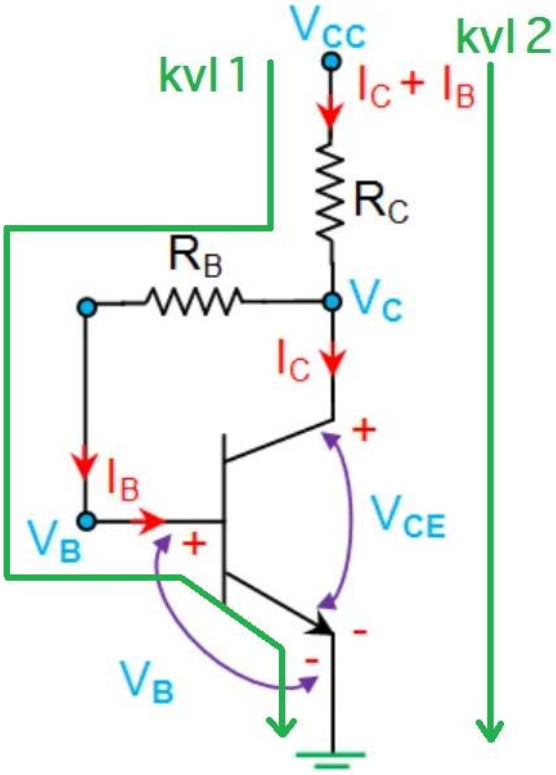
$$kvl1: -V_{CC} + R_B(I_B) + V_{BE} + R_E(I_E) = 0$$
$$\Longrightarrow -V_{CC} + R_B(I_B) + V_{BE} + R_E(1+\beta)(I_B) = 0$$
$$\Longrightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1+\beta)R_E}$$
$$\Longrightarrow I_E = (1+\beta)I_B \quad , \quad I_C = (\beta)\, I_B$$
$$\text{kvl2}: -V_{CC} + R_C(I_C) + V_{CE} + R_E(I_E) = 0$$
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C) - R_E(I_E)$$
$$V_E = R_E(I_E) \quad , V_B = V_{BE} + V_E \quad , V_C = V_E + V_{CE}$$

مثال: در مدار تغذیه ثابت در شرایط $\beta = 50$ و $V_{BE} = 0.7v$ نقطه کار و ولتاژ پایه‌های ترانزیستور را بدست آورید



$$kvl1: -12 + 118k(I_B) + 0.7 + 200(I_E) = 0$$
$$\Longrightarrow -12 + 118k(I_B) + 0.7 + 200(1+50)(I_B) = 0$$
$$\Longrightarrow I_B = \frac{12 - 0.7}{118k + (1+50)0.2k} = 88.1\mu A$$
$$I_E = (1+\beta)I_B = (1+50) \times 88.1\mu A = 4.493mA$$
$$\Longrightarrow I_C = (\beta)\, I_B = 50 \times 88.1\mu A = 4.41mA$$
$$\text{kvl2}: -12 + 1.2k(4.41mA) + V_{CE} + 0.2k(4.493mA) = 0$$
$$V_{CE} = 12 - 1.2k(4.41mA) - 0.2k(4.493mA) = 5.81v$$
$$V_E = 0.2k(4.493mA) = 0.8986v$$
$$V_B = 0.7 + 0.89 = 1.598v \quad , V_C = 0.89 + 5.81 = 6.7v$$

بایاس خودکار یا اتوماتیک: جهت بهبود پایداری حرارتی از مدار زیر استفاده می شود.



برای محاسبه $\boldsymbol{I_B}$ باید $\boldsymbol{kvl1}$ در ورودی زد

$$kvl1: -V_{CC} + R_C(I_C + I_B) + R_B(I_B) + V_{BE} = 0$$

$$\Longrightarrow I_E = I_C + I_B = (1+\beta)I_B \quad , \quad I_C = (\beta)\, I_B$$

$$\Longrightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1+\beta)R_C}$$

$$\Longrightarrow I_E = (1+\beta)I_B \quad , \quad I_C = (\beta)\, I_B$$

* برای محاسبه $\boldsymbol{V_{CE}}$ باید $\boldsymbol{kvl2}$ در خروجی زد

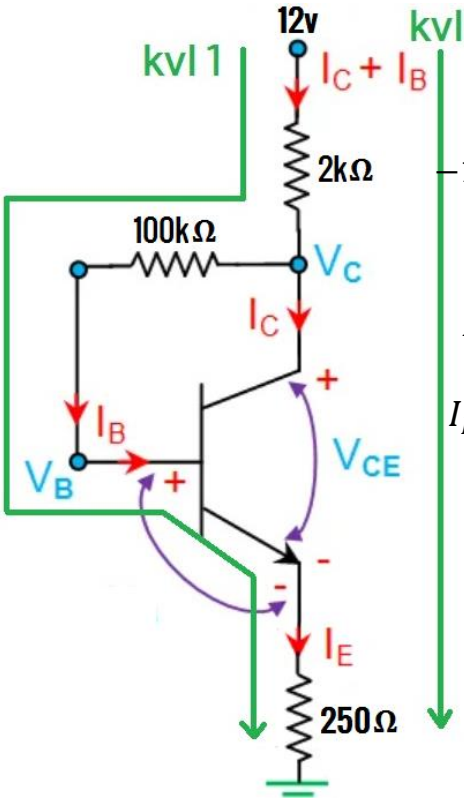
$$\text{kvl2}: -V_{CC} + R_C(I_C + I_B) + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C + I_B)$$

$$V_E = 0 \quad , V_B = V_{BE} \quad , V_C = V_{CE}$$

در این مدار $I_C = (\beta)\, I_B + I_{CEo}$ با افزایش دما، I_{CEo} افزایش یافته و I_C زیاد می‌گردد. این امر باعث کاهش V_C شده و به دنبال آن کاهش I_B را خواهیم داشت که خود نیز باعث کاهش I_C می‌گردد. پس نوعی تثبیت I_C در برابر تغییر دما بوجود می‌آید. ولی مسئله تغییر I_C به خاطر تغییرات β همچنان وجود دارد.

مثال: در مدار تغذیه اتوماتیک در شرایط $\beta = 100$ و $V_{BE} = 0.6\ v$ نقطه کار و ولتاژ پایه‌های ترانزیستور را بدست آورید.



$$kvl1: -V_{CC} + R_C(I_C + I_B) + R_B(I_B) + V_{BE} + R_E(I_E) = 0$$

$$-12 + 2k(1+100)I_B + 100k(I_B) + V_{BE} + 0.25k(1+100)I_B = 0$$

$$\Longrightarrow I_E = I_C + I_B = (1+\beta)I_B \quad , \quad I_C = (\beta)\, I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1+\beta)(R_C + R_E)} = \frac{12 - 0.6}{100k + (101)(2.25k)} = 34.8\mu A$$

$$I_E = (101)34.8\mu A = 3.51mA, I_C = (100)\ 34.8\mu A = 3.45mA$$

$$\text{kvl2}: -V_{CC} + R_C(I_C + I_B) + V_{CE} + R_E(I_E) = 0$$

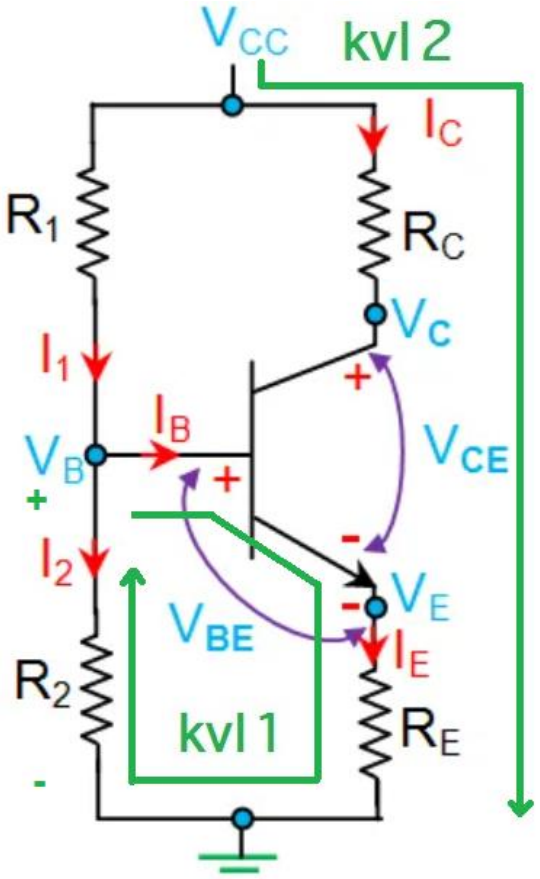
$$-12 + 2k(3.51mA) + V_{CE} + 0.25k(3.51mA) = 0$$

$$V_{CE} = 12 - 7.02 - 0.8775 = 4.1v$$

$$V_E = 0.877v \quad , V_B = 0.6 + 0.87 = 1.47v$$

$$V_C = 4.1 + 0.87 = 4.97$$

بایاس سرخود (مستقل از بتا): به دو روش تقریبی و دقیق محاسبه می‌شود



الف) تقریبی : اول از جریان بیس صرف نظر می‌کنیم. $I_B = 0$

یعنی R_2 و R_1 سری باشند. $I_1 = I_2$

$$V_B = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2}$$

سپس V_B محاسبه کرده و از آن I_E را بدست می‌آوریم

$$kvl1: -V_B + V_{BE} + R_E(I_E) = 0$$

از I_E جریان بیس را محاسبه می‌کنیم

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \Rightarrow I_B = \frac{I_E}{(1+\beta)}$$

$$I_C = (\beta)\, I_B$$

$$\text{kvl2}: -V_{CC} + R_C(I_C) + V_{CE} + R_E(I_E) = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C) - R_E(I_E)$$

$$V_E = R_E(I_E) \quad ,V_B = V_{BE} + V_E \quad ,V_C = V_E + V_{CE}$$

بایاس سرخود بیشتر از موارد دیگر به کار می‌رود، زیرا در آن هم پایداری حرارتی و هم پایداری β در نظر گرفته می‌شود. در زیر روند پایداری حرارتی را ملاحظه می‌کنید.

$$T \nearrow I_{CEo} \nearrow I_C \nearrow V_E \nearrow V_{BE} \searrow I_B \searrow I_C \searrow$$

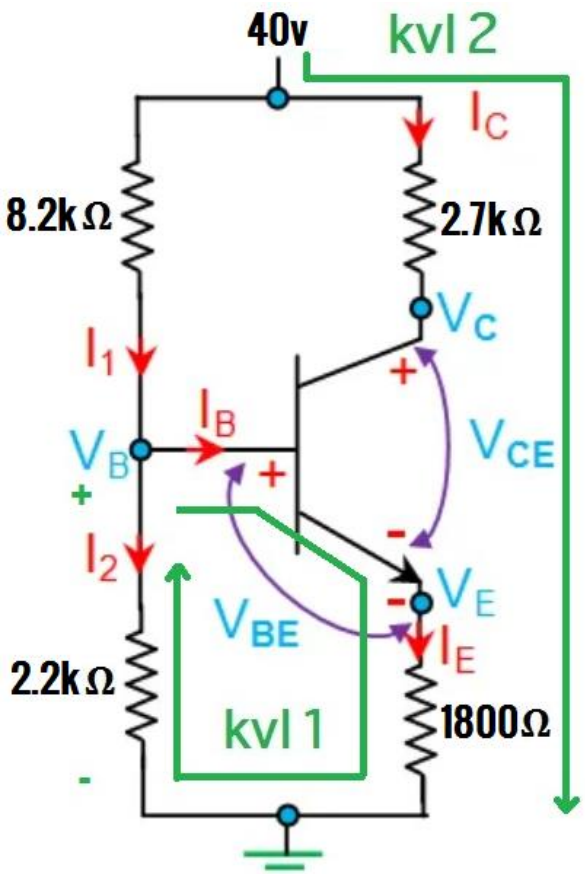
که در بالا نیز گفتیم:

$$V_B = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، این جریان مستقل از β است. در عمل برای برقراری شرایط فوق کافی است، جریان مقاومت‌های بایاس بیش از ۱۰ برابر جریان بیس باشد.

$$I_{R_{1,2}} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \geq 10 I_B$$

مثال: در مدار تغذیه سرخود در شرایط $\beta = 120$ و $V_{BE} = 0.7\ v$ نقطه کار و ولتاژ پایه‌های ترانزیستور را بدست آورید.



$$V_B = \frac{40 \times 2.2k}{8.2k + 2.2k} = 8.46v$$

سپس V_B محاسبه کرده و از آن I_E را بدست می‌آوریم

$$kvl1: -8.46 + 0.7 + 1.8k(I_E) = 0$$

از I_E جریان بیس را محاسبه می‌کنیم

$$I_E = \frac{8.46 - 0.7}{1.8k} = 4.31\text{mA}\ ,\ I_B = \frac{4.31mA}{(1 + 120)} = 35.6\mu A$$

$$I_C = (\beta)\ I_B = 120\ \times\ 35.6\mu A = 2.27mA$$

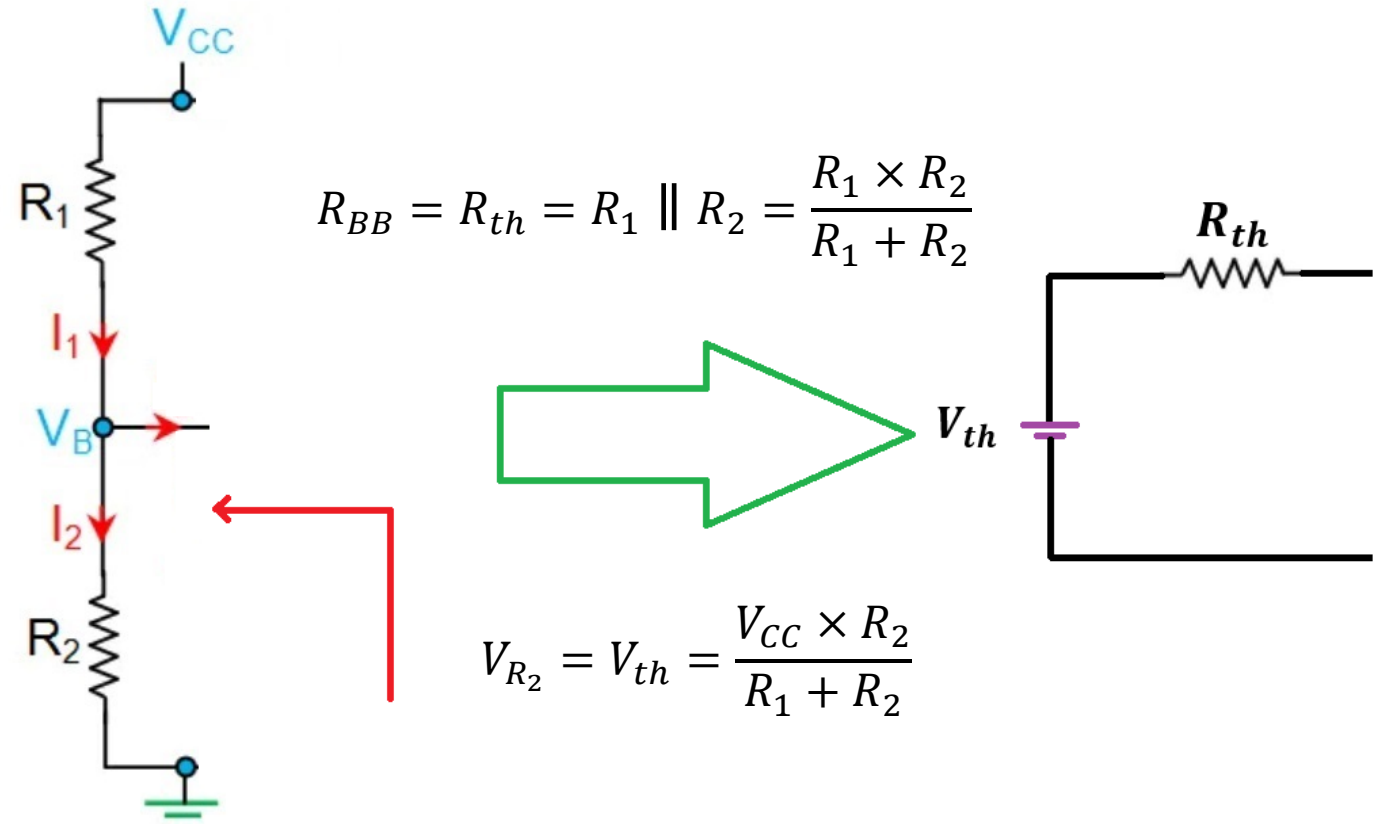
$$\text{kvl2: } -40 + 2.7k(2.27mA\ ) + V_{CE} + 1.8k(4.31\text{mA}) = 0$$

$$V_{CE} = 40 - 6.129 - 7.75 = 26.12v$$

$$V_E = 7.75v\ \ ,V_B = 0.7 + 7.75 = 8.45v$$

$$V_C = 7.75 + 26.12 = 33.87$$

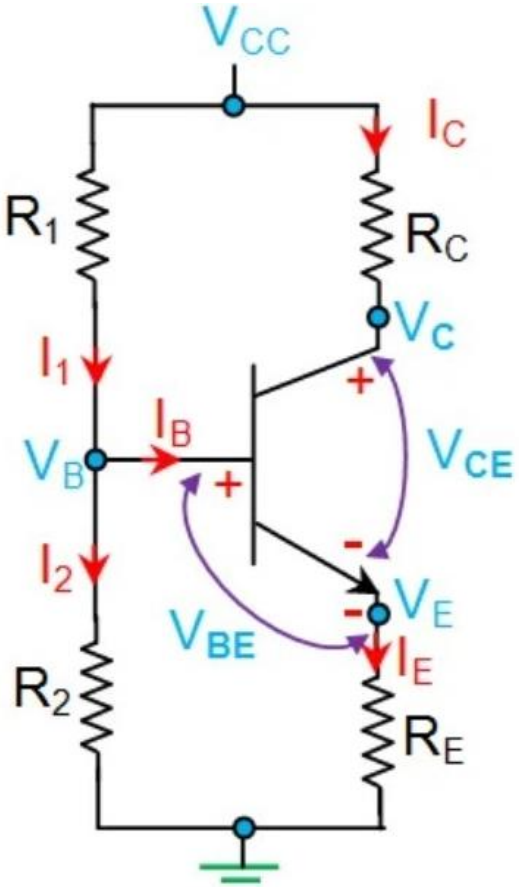
روش دقیق: برای محاسبات دقیق‌تر و یا برقراری شرط فوق بگونه‌ای دیگر از مدار معادل تونن استفاده می‌کنیم

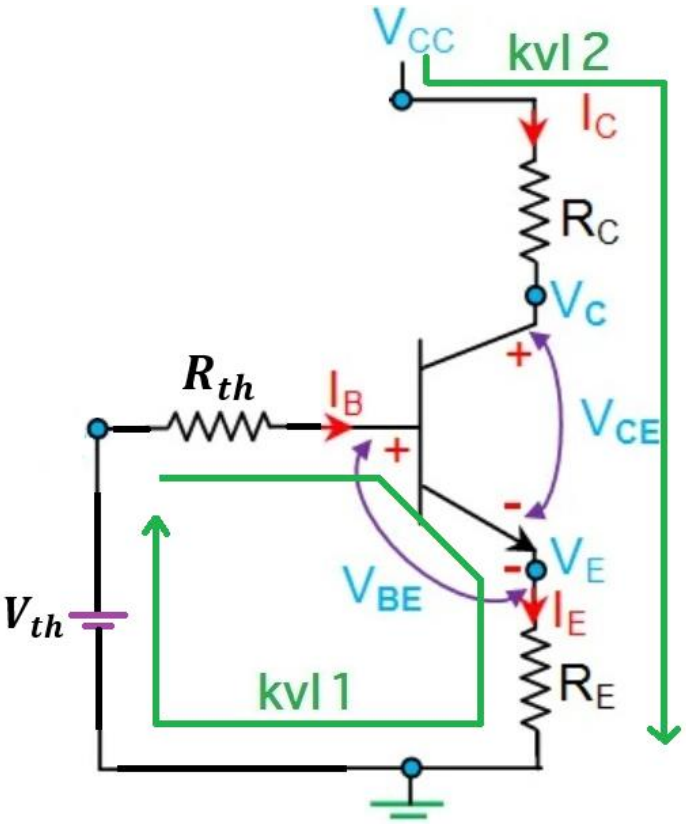


$$R_{BB} = R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

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

روش دقیق:





$$\begin{cases} R_{BB} = R_{th} = \dfrac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{R_2} = V_{th} = \dfrac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$kvl1: -V_{th} + R_{th}(I_B) + V_{BE} + R_E(I_E) = 0$$

$$\Longrightarrow -V_{th} + R_{th}(I_B) + V_{BE} + R_E(1+\beta)(I_B) = 0$$

$$\Longrightarrow I_B = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th} + (1+\beta)R_E}$$

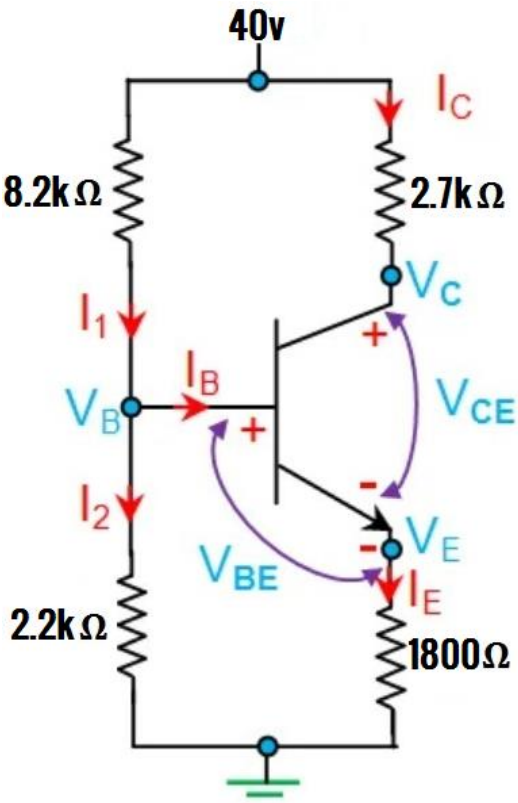
$$\Longrightarrow I_E = (1+\beta)I_B \quad , \quad I_C = (\beta)\, I_B$$

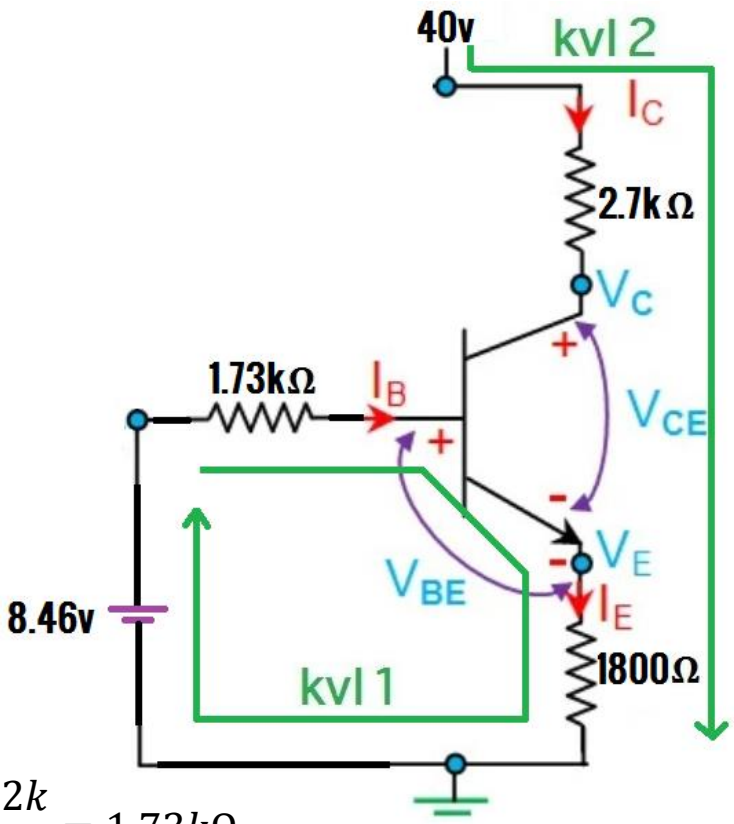
$$\text{kvl2}: -V_{CC} + R_C(I_C) + V_{CE} + R_E(I_E) = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C(I_C) - R_E(I_E)$$

$$V_E = R_E(I_E) \quad , V_B = V_{BE} + V_E \quad , V_C = V_E + V_{CE}$$

مثال: در مدار تغذیه سرخود در شرایط $\beta = 120$ و $V_{BE} = 0.7\ v$ نقطه کار و ولتاژ پایه‌های ترانزیستور را بدست آورید.





$$\begin{cases} R_{BB} = R_{th} = \dfrac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \dfrac{8.2k \times 2.2k}{8.2k + 2.2k} = 1.73k\Omega \\ V_{R_2} = V_{th} = \dfrac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} = \dfrac{40v \times 2.2k}{8.2k + 2.2k} = 8.46v \end{cases}$$

$$kvl1: -8.46 + 1.73k(I_B) + 0.7 + 1.8k(I_E) = 0$$

$$-8.46 + 1.73k(I_B) + 0.7 + 1.8k(1 + 120)(I_B) = 0$$

$$I_B = \frac{8.46 - 0.7}{1.73k + (1 + 120)1.8k} = 35.34\mu A$$

$$I_E = (121)35.34\mu A = 4.28mA \quad , \quad I_C = (120)\ 35.34\mu A = 4.24mA$$

$$\text{kvl2}: -40 + 2.7k(4.24mA) + V_{CE} + 1.8k(4.28mA) = 0$$

$$V_{CE} = 40 - 11.448 - 7.70 = 20.85$$

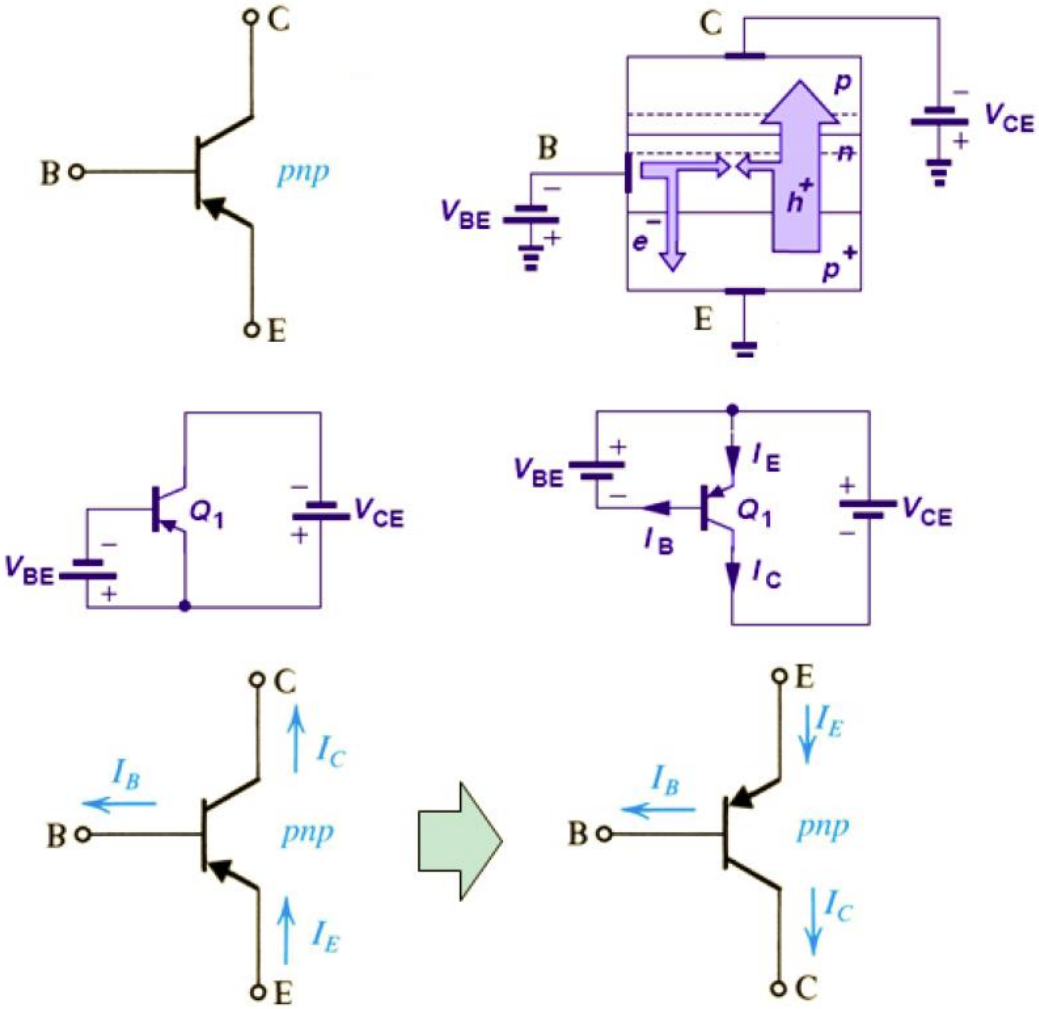
$$V_E = 7.70\ ,\ V_B = 0.7 + 7.70 = 8.4v\ ,\ V_C = 7.70 + 20.85 = 28.55$$

برای اینکه جریان امیتر به β بستگی نداشته باشد، باید داشته باشیم:

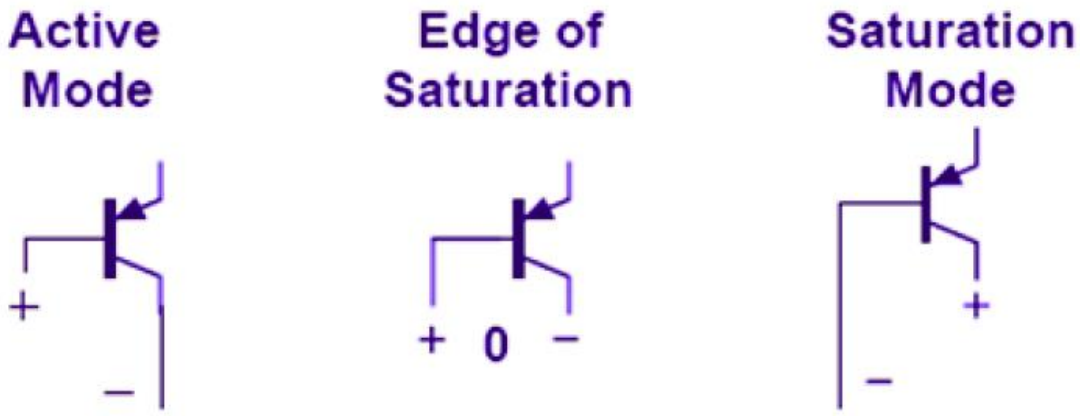
$$R_E \gg \frac{R_{th}}{1 + \beta} \Rightarrow R_E \geq 10\frac{R_{th}}{1 + \beta} \Rightarrow R_{th} \leq \frac{\beta_{min} R_E}{10}$$

ترانزیستور PNP

کافی است که نوع نیمه هادی نواحی امیتر، کلکتور و بیس را برعکس کنیم. با این کار ترانزیستور PNP ایجاد می شود. تمام مفاهیمی که در مورد ترانزیستور NPN گفته شد به سادگی می توان به ترانزیستور PNP تعمیم داد با این استثناء که پتانسیل امیتر از پتانسیل بیس بیشتر و پتانسیل بیس نیز از پتانسیل کلکتور بیش تر است.



$$I_C = (\beta)\, I_B \quad , \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad , \quad I_C = I_E - I_B \quad , \quad V_E = V_B + V_{BE}$$



پایان جلسه هشتم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان