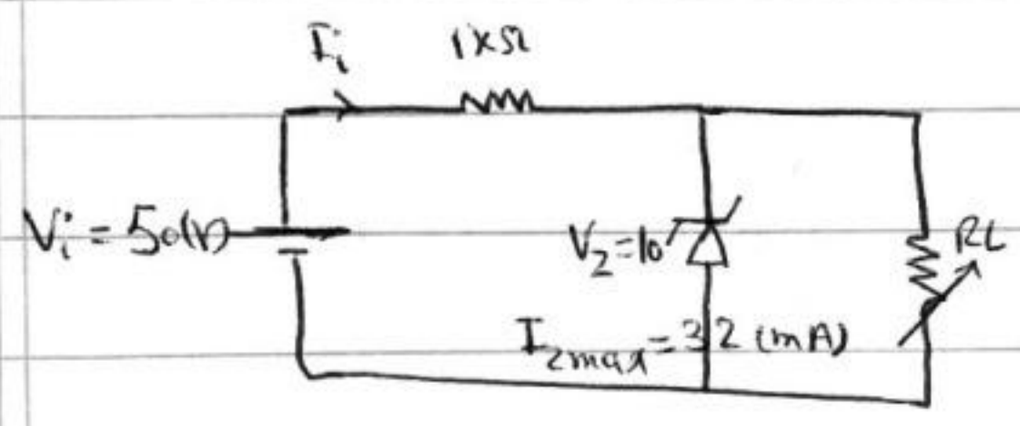
EX: در بسه‌ی زیر $R_L$ و $I_L$ در چه محدوده‌ای می‌توانند باشند تا $V_{R_L} = 10(Volt)$ باقی بماند؟ ولتاژ دو سر دیود زنر ثابت است.




الف) $R_{Lmin} = \frac{RV_Z}{V_i - V_Z} = \frac{(1K\Omega)(10V)}{(50-10)(Volt)} = 250\Omega$

$I_{Lmax} = \frac{V_Z}{R_{Lmin}} = \frac{10}{250\Omega} = 40mA$

$I_R = \frac{V_i - V_Z}{R_i} = \frac{50-10}{1K\Omega} = 40mA$

$I_{Lmin} = I_R - I_{Zmax} = 40 - 32 = 8(mA)$

$R_{Lmax} = \frac{V_Z}{I_{Lmin}} = \frac{10}{8} = 1.25K\Omega$

$250 < R < 1250(\Omega)$

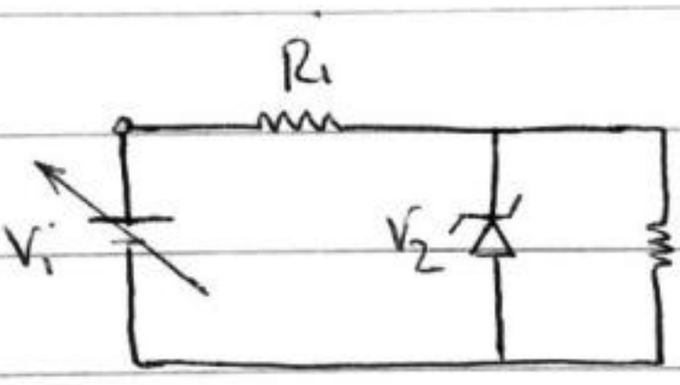
$8(mA) < I_L < 40(mA)$

ب) $P_Z = V_Z I_Z = 10 \times 32 = 320\ (mW)$

**

پ) $V_i$ تغییر کند و $R_L$ ثابت باشد.

در این نوع کاربرد باید $V_i$ به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا دیود زنر روشن شود.

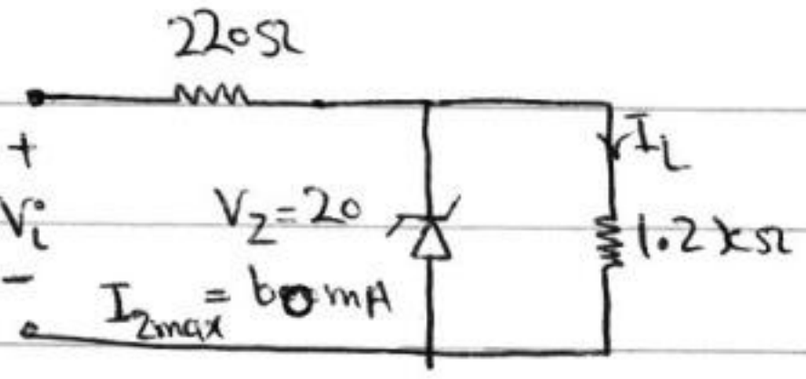



$V_L = V_Z = V_i \times \frac{R_L}{R_i + R_L} \Rightarrow V_{imin} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L}$

$I_{Rmax} = I_R = I_Z + I_L \longrightarrow I_{Rmax} = I_{Zmax} + I_L$

$I_{Rmax} = \frac{V_{imax} - V_Z}{R} \Rightarrow V_{imax} = I_{Rmax} R + V_Z$

Ex: محدوده‌ی $V_i$ را در مدار زیر برای روشن ماندن دیود زنر روشن کنید.

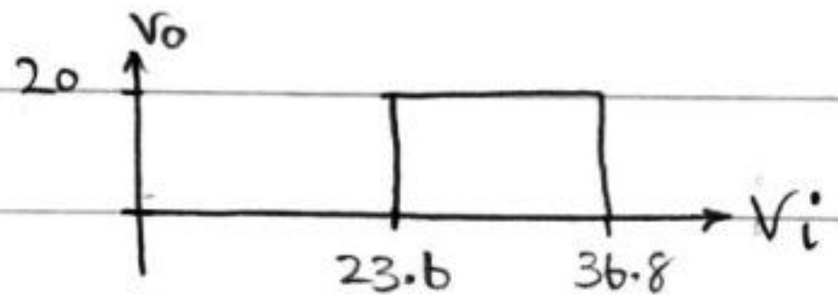



$$V_{i(min)}=\frac{(R_L+R_i)V_Z}{R_L}=\frac{20\times1.42}{1.2}=23.6\,(V)$$

$$I_L=\frac{V_L}{R_L}=\frac{20V}{1.2k\Omega}=16.67\,(mA)$$

$$I_{Rmax}=I_{Zmax}+I_L=60+16.67=76.67\,(mA)$$

$$V_{imax}=I_{Rmax}R+V_Z=76.67\times0.22+20=36.87$$

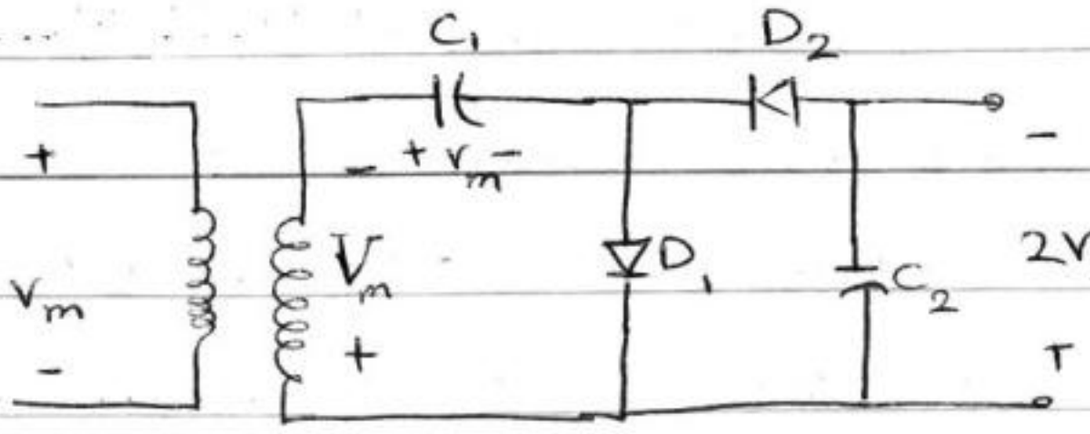


مدارات چندبرابرکننده:

الف - دوبرابرکننده‌ی نیم موج:

این مدار یک دوبرابرکننده‌ی ولتاژ نیم موج است که در نیم سیکل مثبت دیود $D_1$ روشن شده و خازن $C_1$ از طریق این دیود تا $V_m$ شارژ می‌شود و در نیم سیکل منفی دیود $D_1$ خاموش می‌شود و دیود $D_2$ روشن می‌گردد و خازن $C_2$ شارژ می‌شود و ولتاژ دو سر $D_2$ را از رابطه‌ی زیر می‌توان بدست آورد. ملاحظه می‌گردد ولتاژ دو سر $C_2$ نیز دوبرابر ولتاژ ورودی است. ($2V_m$)

PIV استفاده شده در این مدار باید بزرگتر مساوی 2 برابر $V_m$ باشد. $PIV \geq 2V_m$

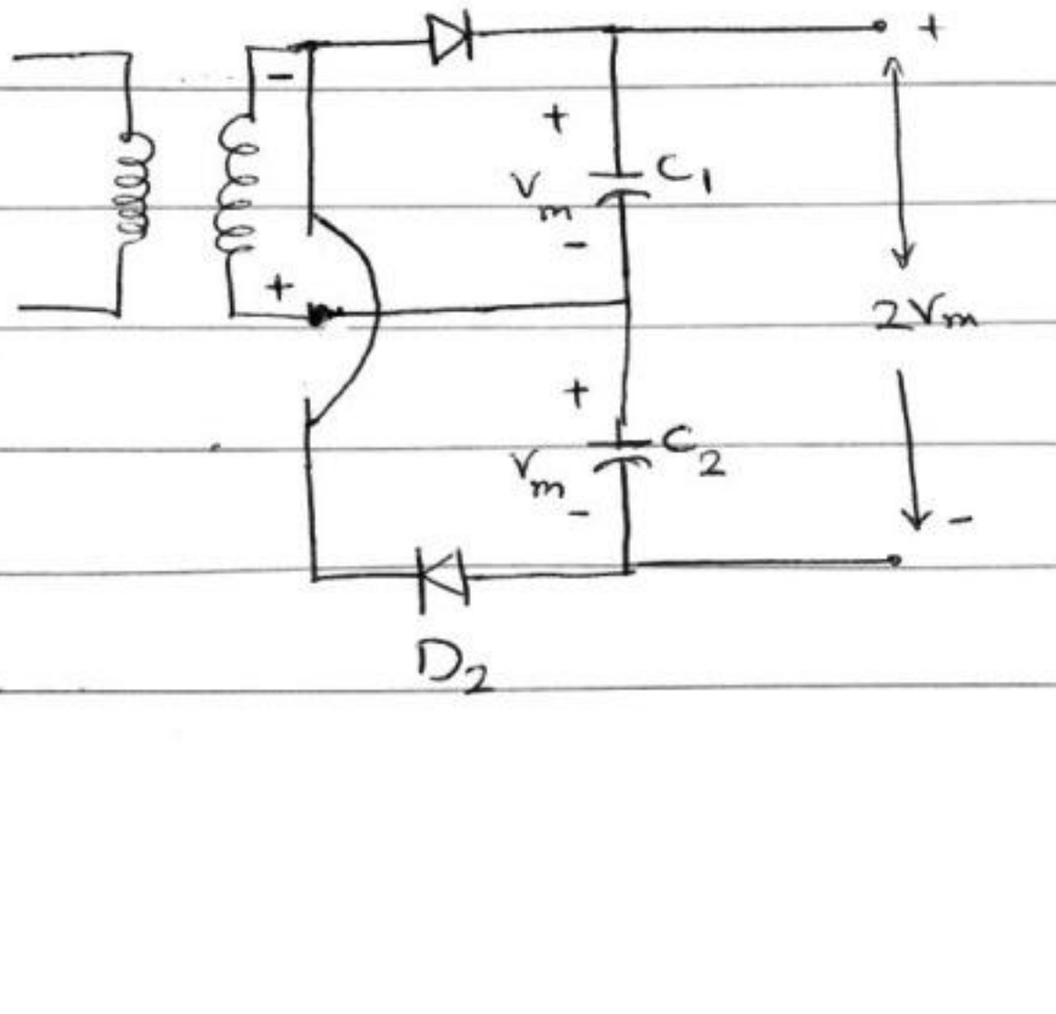



$$-V_m - V_{C_1} + V_{C_2} = 0$$

$$\rightarrow V_{C_2} = V_{C_1} + V_m = 2V_m$$

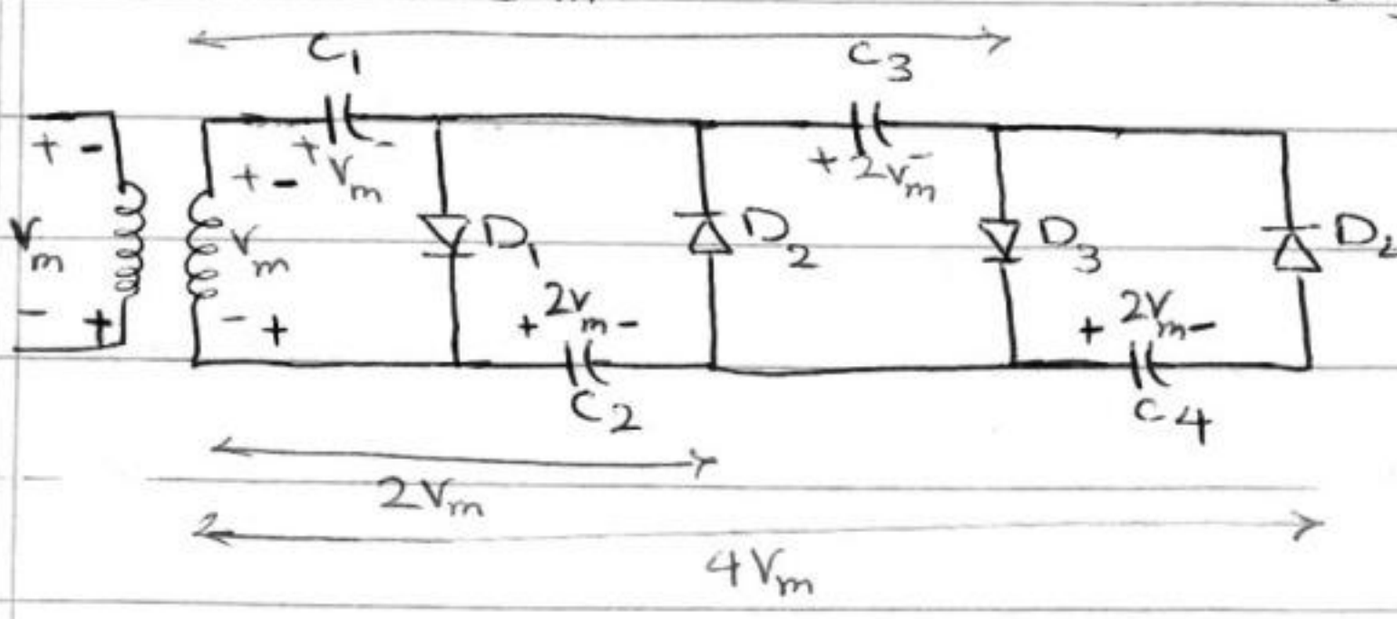
ب) دوبرابرکننده‌ی تمام موج:

در نیم سیکل مثبت $D_1$ روشن است و خازن $C_1$ تا $V_m$ شارژ می‌شود اما در نیم سیکل منفی $D_2$ روشن است و $D_1$ خاموش خازن $C_2$ تا $V_m$ شارژ می‌شود بنابراین ولتاژ خروجی برابر با $2V_m$ می‌باشد. PIV استفاده شده برای دیودهای در این مدار نیز حداقل باید $2V_m$ باشد.



ج) تعمیم مدارات چند برابر شده:

EWB:




ترمینال مثبت: red

ترمینال منفی: black

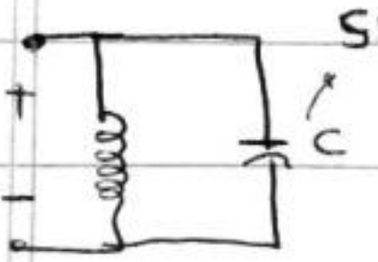
خازن $C_1$ در نیم سیکل مثبت به اندازه‌ی $V_m$ شارژ می‌شود (از طریق $V_m$) در نیم سیکل منفی ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور خازن $C_2$ را با ۲ برابر ولتاژ ماکزیمم پر می‌کند. در نیم سیکل مثبت بعدی $D_3$ روشن می‌شود و ولتاژ خازن $C_2$ را به $2V_m$ می‌رساند.

ولتاژ خازن $C_3$ / ولتاژ خازن $C_2$

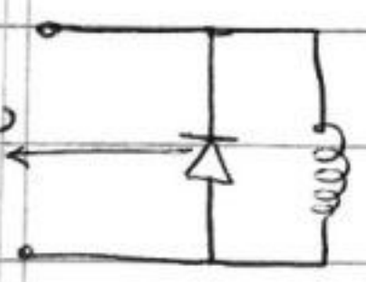
در نیم سیکل منفی بعدی دیودهای $D_2$ و $D_4$ هدایت می‌کنند و خازن $C_3$ ولتاژ خازن $C_4$ را با $2V_m$ پر می‌کنند از سرهای بالایی مدار مضرب فرد و از سرهای پایینی مضرب زوج گرفته می‌شود.

کاربردهای عملی دیود:

الف) محافظت در برابر ولتاژ القایی:




برای این کار به روش گذاشتن یک خازن موازی با عناصر القایی یا کلیدها به منظور حفاظت آنها




در برابر ایجاد ولتاژ بیش از اندازه ناشی از تغییرات دوسرسلف می‌باشد.

ترانزیستورها:

انواع ترانزیستورها:

۱- Bipolar (دوقطبی)

۲- FET (Field Effect Transistor)

- Bipolar -۱
  - NPN -۱
  - PNP -۲
- FET -۲
  - jFET -۱ (Junction FET)
  - MOSFET -۲ (Metal oxide semiconductor FET)

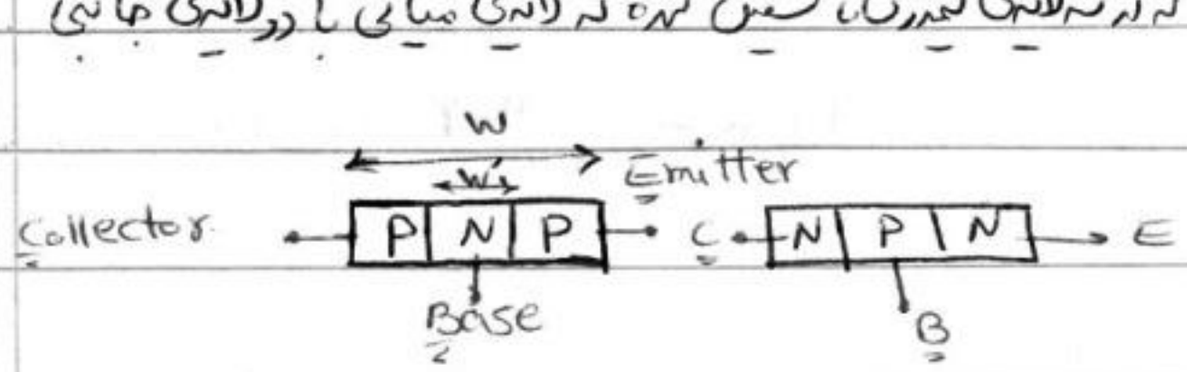
واژه‌ی ترانزیستور از دو قطعه‌ی "Transfer + resistor = Transistor" تشکیل شده که دارای مفهوم انتقال جریان از مداری با مقاومت کم به مداری با مقاومت زیادی باشد.

**

BiPolar Junction Transistor:

ترانزیستورهای BJT:

این ترانزیستورها دارای عنصر سه پایه‌ای است که از سه لایه‌ی نیمه‌رسانا تشکیل شده که لایه‌ی میانی با دو لایه‌ی جانبی متفاوت می‌باشد. بنابراین دو نوع ترانزیستور داریم:



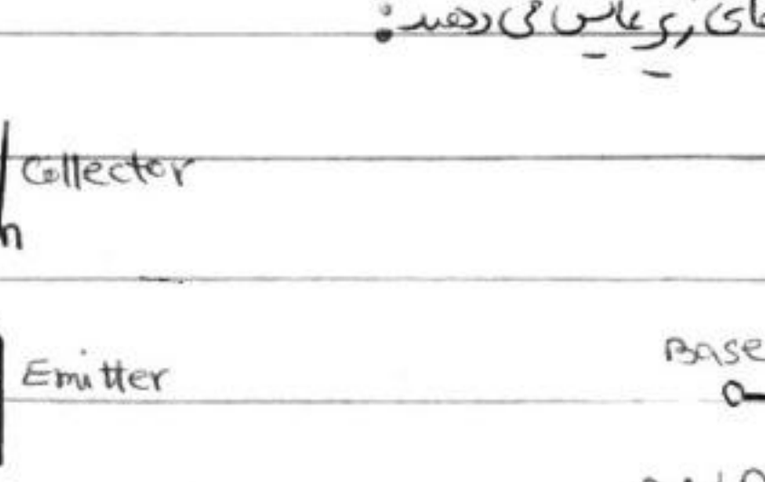

Note1: به پایه‌ی آن بطابق گفته می‌شود.

Note2: پهنای ناحیه‌ی Base کم است به‌گونه‌ای که $\frac{W}{W'} = 150$

Note 3: ناخالصی ناحیه‌ی Base نسبت به دو ناحیه‌ی دیگر کم است:

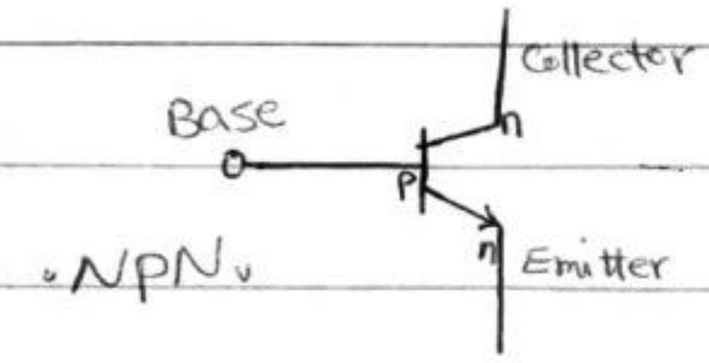
ناخالصی Emitter >> ناخالصی Collector > ناخالصی Base

در واقع می‌توان گفت ترانزیستور BJT را با دو دیود P-N مطابق شکل زیر نشان داد:

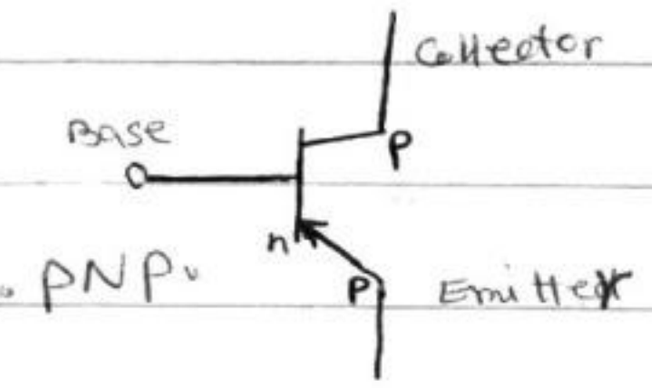



با توجه به جهت‌های نشان داده شده در شکل: $I_E = I_B + I_C$

معمولاً ترانزیستورهای BJT را با نمادهای زیر نمایش می‌دهند:




NPN

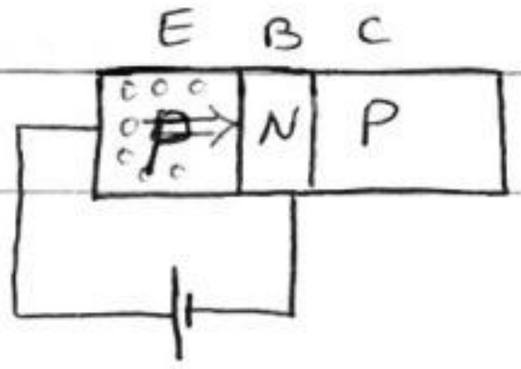



PNP

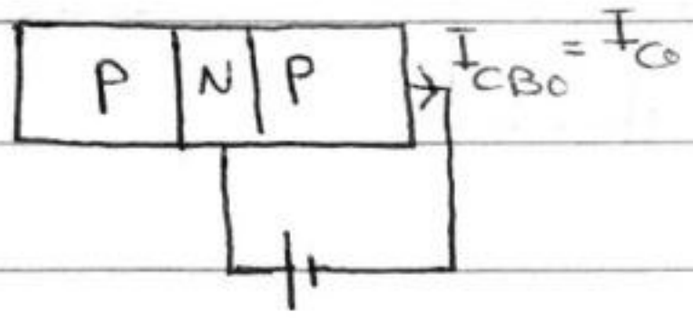
Note: دو پیکان همواره نشان دهنده‌ی نیمه‌هادی N می‌باشد.

کارکرد ترانزیستور:

اگر پیوند Base - Emitter به صورت مستقیم Bias شود این حالت مشابه با حالتی است که دیود با تغذیه‌ی مستقیم Bias شده است با این تفاوت که Bias شدن بسیار کوچکی کافیست تا الکترون‌های Emitter (در این نوع ترانزیستورها) به سمت Base حرکت می‌کنند.



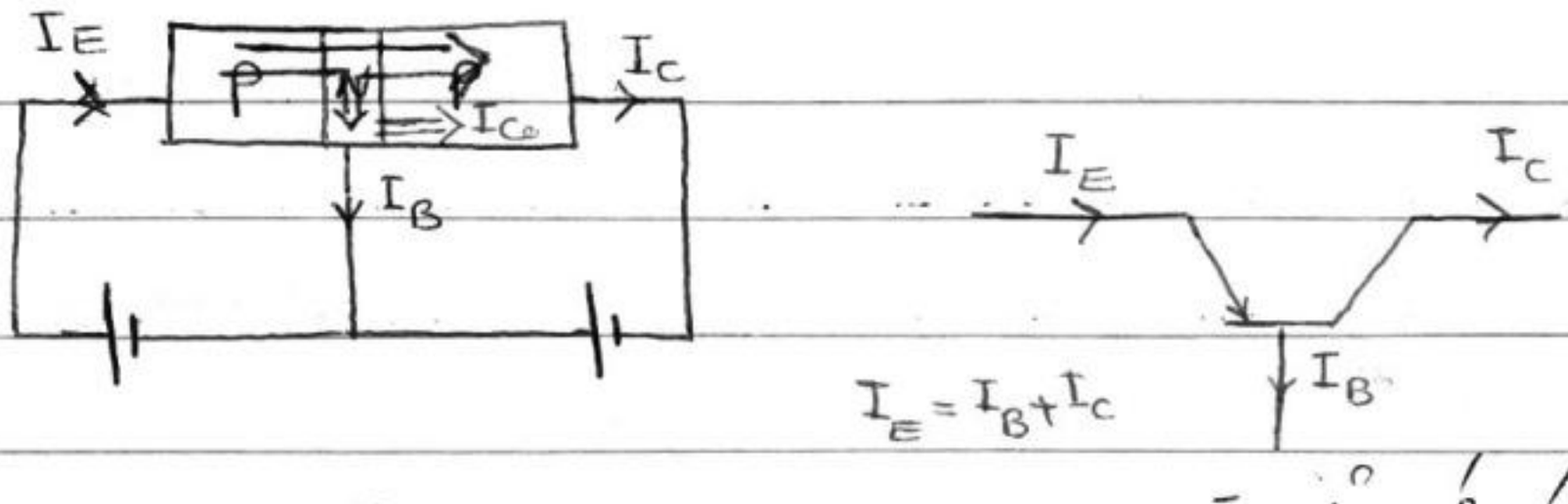
ب) اگر پیوند Base-Collector به صورت معکوس Bias شود این حالت مشابه دیود با قطبیدگی معکوس است بنابراین عرض ناحیه‌ی تخلیه به علت Bias اعمالی زیاد می‌گردد و جریان آن تنها جریان اشباع معکوس پیوند می‌باشد و آن را با $I_{CBO}$ نام‌گذاری می‌کنند. جریان Collector-Base ای که Emitter آن open است و گاهی آن را $I_{Co}$ می‌نامند در واقع نانی از حامل‌های اقلیت می‌باشد.)




در حالتی که ولتاژ سیستم Emitter-Base و ولتاژ معکوس Collector-Base هر دو به ترانزیستور وصل گردند جریان ایجاد شده در Emitter نانی از حامل‌های اکثریت می‌باشد پس از طی ناحیه‌ی تخلیه با عرض بسیار کوچک به ناحیه‌ی N می‌رسند چون ناحیه‌ی N

(Base) بسیار نازک می‌باشد و درصد نانی کمی دارد تعدادی از حامل‌ها از طریق Base اولی مسیر می‌دهند و بیشتر این حامل‌ها وارد ناحیه‌ی Collector می‌گردند زیرا این حامل‌های اکثریت Emitter در مقابله با ناحیه‌ی Base دیده شده در واقع مانند حامل‌های اقلیت

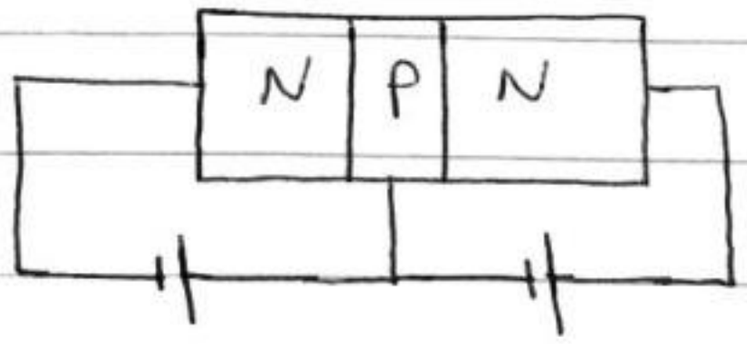
پیوند معکوس Bias شده‌ی Base-Collector می‌باشد بنابراین به راحتی سیر Collector را طی می‌نمایند نتیجتاً جریان مطابق زیر خواهد بود:

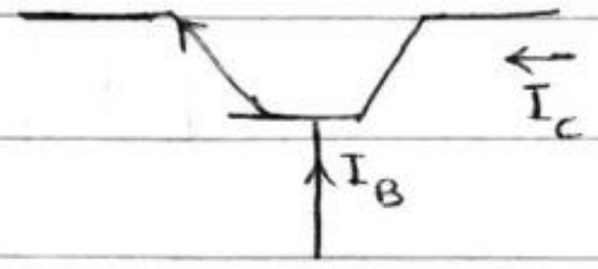



همانطور که نوشته شد جریان Collector یا $I_C$ دارای دو مؤلفه است:

$$I_C = I_{C(\text{اکثریت})} + I_{C(\text{اقلیت})}$$

دراین رابطه $I_C$ جریان حاملهای اقلیت بوده و در رده‌ی میلی آمپر است. اما جریان $I_{CO}$ در واقع جریان ایجاد شده بین پیوند Collector-Base است که در حد میکرو آمپر یا نانو آمپر می‌باشد و چون ناشی از حاملهای اقلیت است به شدت به دما وابسته است. برای ترانزیستور NPN نیز مطابق شکل خواهیم داشت:




**

آرایش های مختلف ترانزیستور:

با توجه به اینکه ترانزیستور یک عنصر سه پایه می باشد، همواره می توان یک پایه را بین ورودی و خروجی

مشترک کرد. بنابراین در مدارات کاربردی ترانزیستور به منظور استفاده از قابلیت های مختلف ترانزیستور اعم از تقویت کنندگی و Switching و تطبیق امپدانس و ... معمولاً از یکی از سه حالت زیر استفاده می شود:

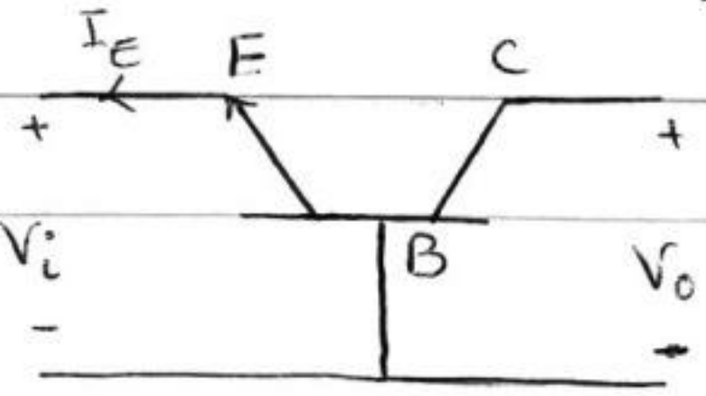
۱- بیس مشترک — Common Base

۲- امیتر مشترک — Common Emitter

۳- کلکتور مشترک — Common Collector

۱- Common Base:

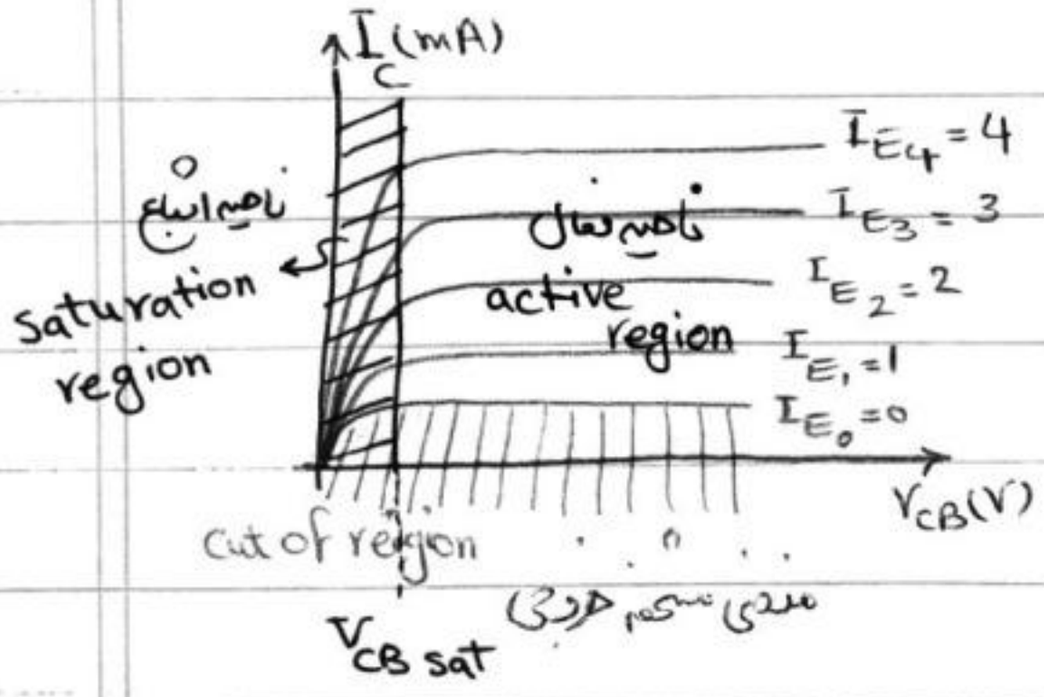
در این حالت ورودی بین Emitter و Base و خروجی از Collector نسبت به Base گرفته می شود یعنی پایه‌ی Base بین ورودی و خروجی مشترک است.

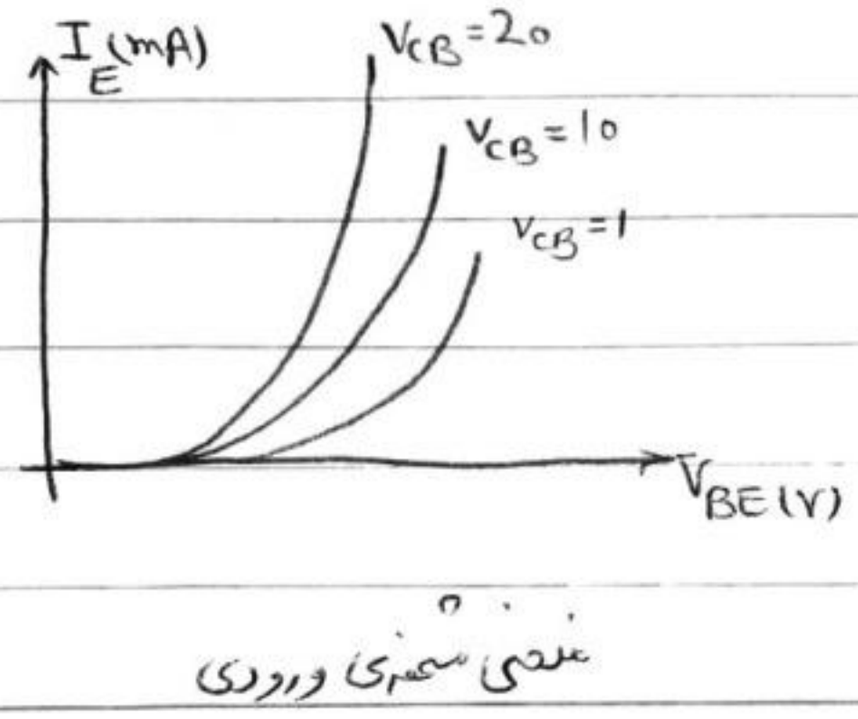


برای تشریح عملکرد این عنصر سه پایه مثل ترانزیستور قبلی دو دسته منحنی نیاز داریم:

الف) منحنی مشخصه های ورودی که رابطه ی جریان ورودی را با ولتاژ ورودی به ازای مقادیر مختلف ولتاژ خروجی بیان می کند.

ب) منحنی مشخصه های خروجی که رابطه ی جریان خروجی را بر حسب ولتاژ خروجی و به ازای مقادیر مختلف جریان ورودی بیان می کند.



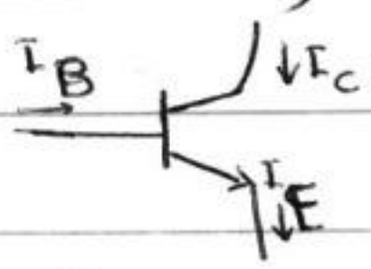

بر اساس منحنی مشخصه خروجی ۳ ناحیه کاری برای ترانزیستور وجود دارد:

۱- ناحیه فعال (active region): در این ناحیه تقویت Emitter-Base مستقیم و Collector-Base معکوس است.

۲- ناحیه قطع (cut of region): در این ناحیه تقویت Emitter-Base, Collector-Base هر دو معکوس هستند.

۳- ناحیه اشباع (Saturation region): در این ناحیه تقویت Emitter-Base, Collector-Base هر دو مستقیم می باشند.

Note: با توجه به رابطه ی




$$I_E = I_B + I_C$$

جریان Base در ناحیه فعال از مرتبه ی میلی آمپر است و جریان Collector از مرتبه ی میلی آمپری باشد

بنابراین در ناحیه ی فعال همواره داریم:

$$I_E \simeq I_C$$

Note: با توجه به منحنی مشخصه های ورودی اگر ولتاژ خروجی بزرگتر از منحنی های ورودی به همدیگر نزدیک شوند به طوری که عملا بر هم منطبق هموار می توان از منحنی زیر استفاده نمود به عبارت دیگر اگر ترانزیستوری در حالت وصل باشد ولتاژ Base-Emitter

آن را می‌توان تقریباً برابر $V_{BE}=0.7(V)$ در نظر گرفت.

* *

آنالیز DC و AC:

توجه شود که در آنالیز مدارات ترانزیستوری همواره باید در حالت مجزا آن‌ها را در نظر بگیریم:

الف) آنالیز AC  ب) آنالیز DC

در حالت آنالیز AC (استقرار و تثبیت در حالت) Bias را خنثی می‌نماییم. باید همواره به خاطر داشته باشیم که ترانزیستور یک عنصر فعال است برای کارکرد مناسب آن باید به گونه‌ای صحیح تغذیه شود.

پارامترهای ترانزیستور:

الف) پارامتر $\alpha$:

$\alpha_{DC}$: نسبت $I_C$ به $I_E$ را در حالت DC، $\alpha_{DC}$ می‌نامند که در واقع ناشی از حامل‌های اکثریت

Emitter می‌باشد در حالت DC نسبت $I_C$ به $I_E$ ناشی از حامل‌های اکثریت را (گویند.) در این رابطه $I_C$ و $I_E$ جریان Collector و Emitter در نقطه کار می‌باشند و مقادیر عملی بین 0.9 و 1 است: $0.9<\alpha<1$

با توجه به رابطه‌ی زیر داریم:  $I_C=I_C$(حامل‌های اکثریت) $+I_{CBo}$(حامل‌های اقلیت)

$$I_C=\alpha I_E+I_{CBO}$$

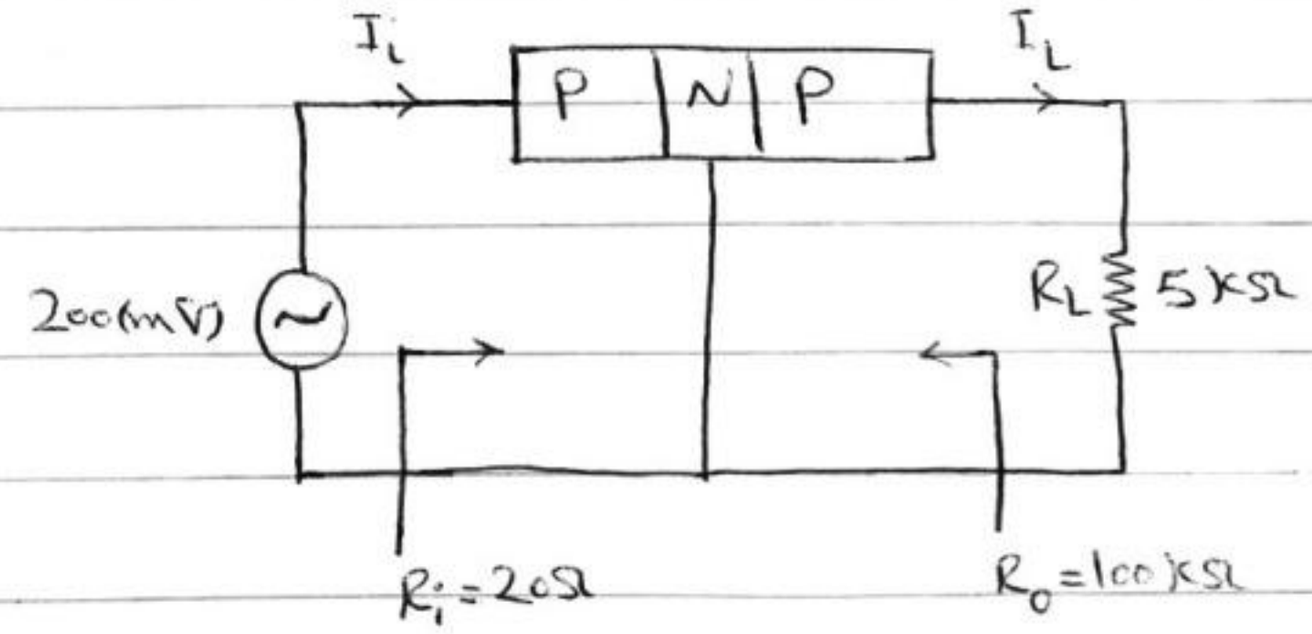
$\alpha_{AC}$: نسبت تغییرات $I_C$ حول نقطه‌ی کار به تغییرات $I_E$ را $\alpha_{AC}$ می‌نامند

$$\alpha_{AC}=\left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|_{V_{CB}=\text{ثابت}}$$

در بایاس موارد عملی $\alpha_{AC}$ را می‌توان برابر با $\alpha_{DC}$ در نظر گرفت.

$$\alpha_{AC} = \alpha_{DC} = \alpha$$

Ex: در شکل زیر فرض کنید ترانزیستور به طور مناسب در ناحیه‌ی فعال Bias گردیده است. مطلوب است محاسبه‌ی ضریب تقویت ولتاژ ($A_V$) با $V_i = 200mV$ ، $\alpha = 1$ ، $R_L = 5K\Omega$ ، $R_o = 100K\Omega$ ، $R_i = 20\Omega$.




$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200mV}{20\Omega} = 10mA$$

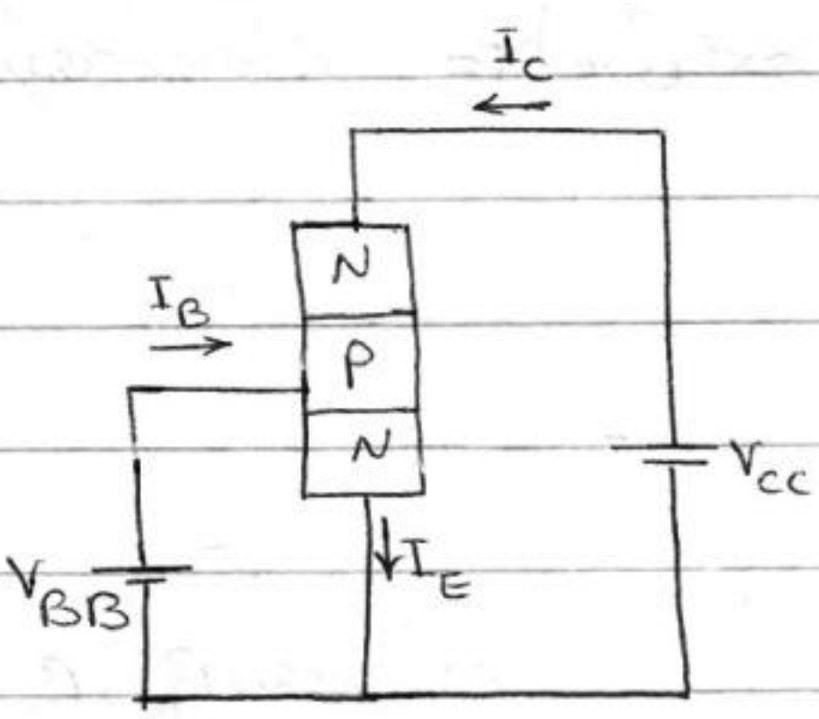
$$I_L = I_C = \alpha I_E = 1 \times 10mA = 10mA$$

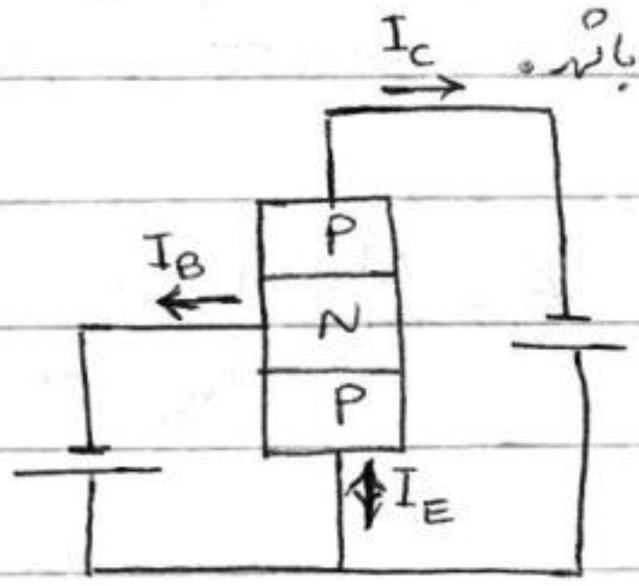
$$V_L = 5 \times 10^{3} \times 10 \times 10^{-3} = 50V$$

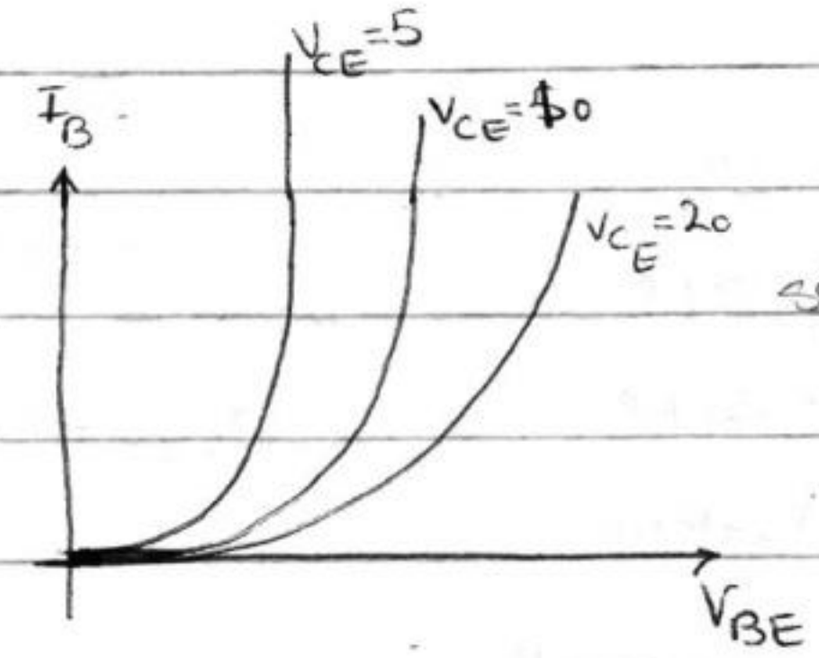
ضریب تقویت ولتاژ $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_L}{V_i} = \frac{50}{200mV} = 250$

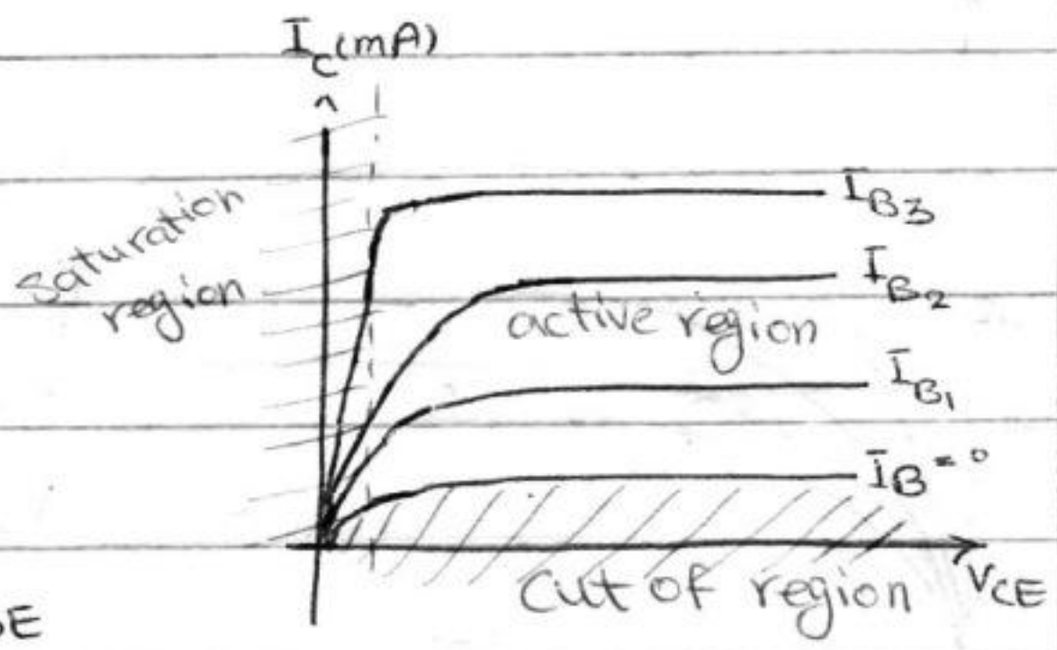
## آرایش امیتر مشترک:
## Common Emitter:

اگر ورودی بین Base-Emitter وصل شود و خروجی از Collector نسبت به Emitter گرفته شود، آرایش مذکور را امیتر مشترک گویند. این حالت تقریبا پرکاربردترین حالت مواردی تقویت کننده با ترانزیستورهای آلیاژی می‌باشد.



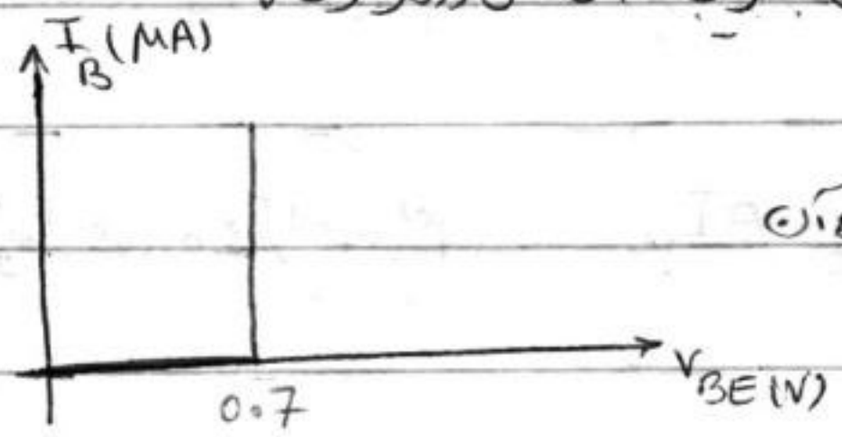




$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} = \alpha(I_B + I_C) + I_{CBO}$$

$$I_C = \frac{\alpha I_B}{1-\alpha} + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \xrightarrow{I_B=0} I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}\Big|_{I_B=0\,\mu A}$$

Note: منحنی ورودی در آرایش Emitter مشترک می‌توان با تقریب خوبی به صورت زیر در نظر گرفت.




"ای ترانزیستوری حداقل ولتاژ 0.7 روی B و E آن"
"قرارداره ترانزیستور روشن است."

پارامتر $\beta$:

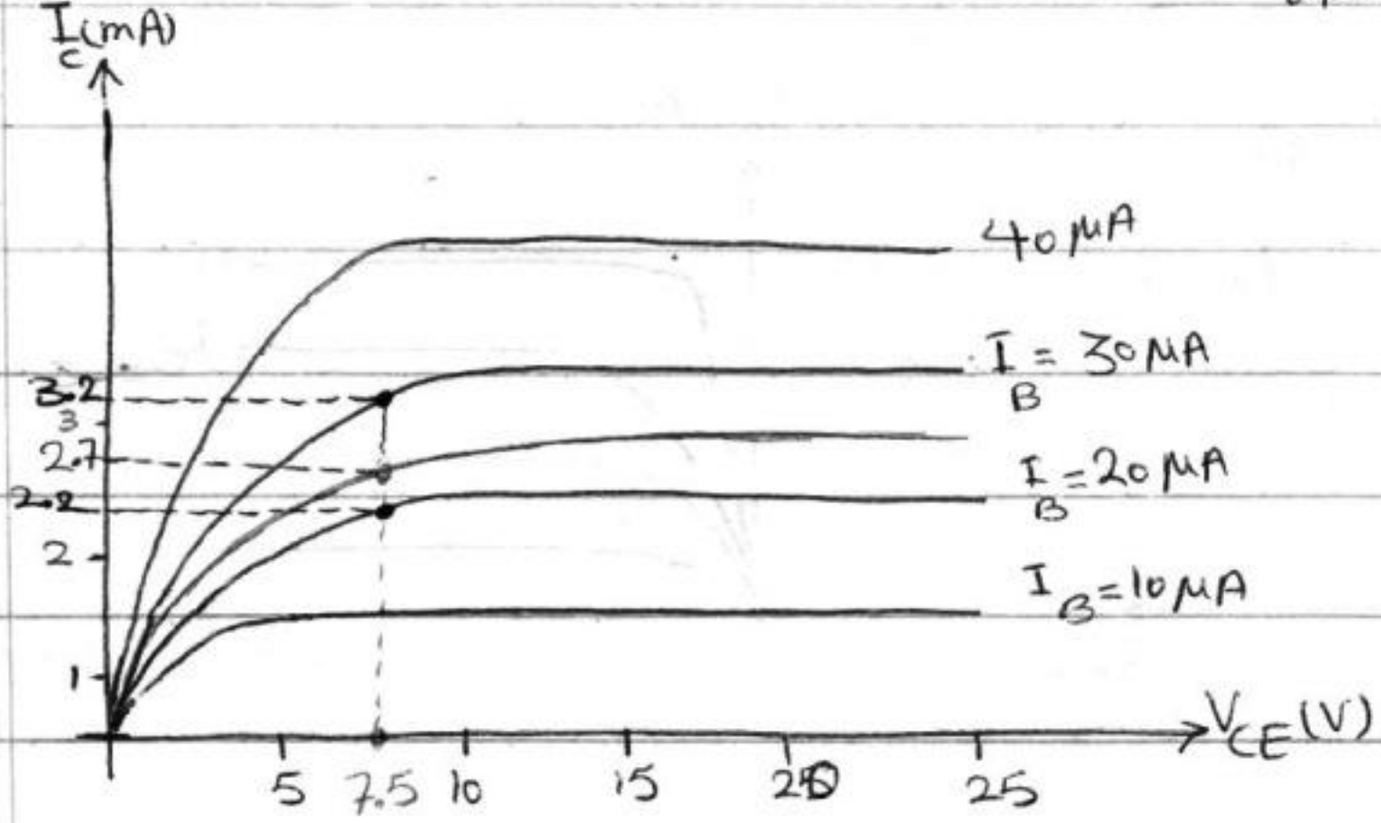
نسبت جریان Collector به جریان Base است:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

در این نقطه خاص نسبت جریان DC، Collector به جریان DC، Base را $\beta_{dc}$ نوشته مقدار تقریبی آن در بیشتر ترانزیستورهای سیلیکونی فنی پارامتر $h_{FE}$ نیز نشان می‌دهند معمولاً بین 40 تا 600 می‌باشد.

$$\beta_{ac} = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}=cte}$$

بدست آوردن $\beta_{ac}$ و $\beta_{dc}$ از روی منحنی صفحه:




$$\begin{cases} I_B = 25\mu A \\ V_{CE} = 7.5 (Volt) \end{cases}$$

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.7}{25\mu A} = 108$$

$$\beta_{ac} = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}=cte} = \frac{3.2-2.2}{30\mu A - 20\mu A} = \frac{1}{10\mu A} = 100$$

در واقع $\beta_{ac}$ و $\beta_{dc}$ باهم تفاوت دارند اما این تفاوت معمولاً در حدی است که ما همواره در کاربردهای عملی می‌توانیم $\beta_{ac}$ را تقریباً مساوی با $\beta_{dc}$ در نظر بگیریم به عبارت دیگر اگر در مسئله‌ای از این رو داده نشود مقدار برای هر دو در نظر گرفته می‌شود

بنابراین تقریباً همواره می‌توانیم بنویسیم $I_C = \beta I_B$

Note: رابطه‌ی بین $\alpha$ و $\beta$:

$$1-\alpha=\frac{I_C}{I_E} \qquad 2-\beta=\frac{I_C}{I_B} \qquad 3-I_E=I_B+I_C$$

$$I_E=I_B+I_C \longrightarrow \frac{I_C}{\alpha}=\frac{I_C}{\beta}+I_C \longrightarrow \frac{1}{\alpha}=\frac{1}{\beta}+1 \longrightarrow \alpha=\frac{\beta}{1+\beta}$$

$$\beta=\frac{\alpha}{1-\alpha}$$

Note:

$$I_E=I_B+I_C \longrightarrow I_E=I_B+\beta I_B \longrightarrow I_E=(1+\beta)I_B$$

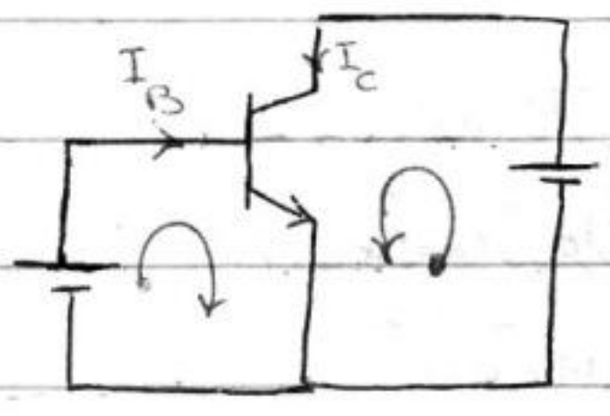
$$I_C \cong I_E$$

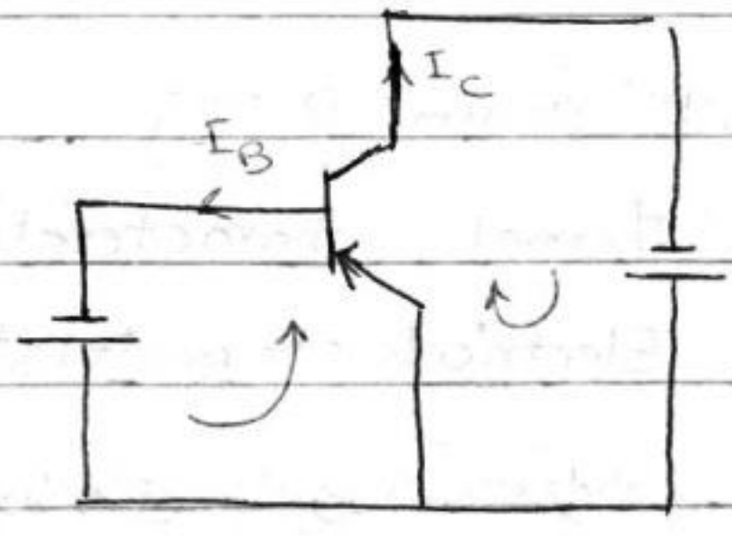
Note:

$$I_{CEO}=\frac{I_{CBO}}{1-\alpha} \longrightarrow I_{CEO}=(1+\beta)I_{CBO} \longrightarrow I_{CEO} \cong \beta I_{CBO}$$

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

Note: به منظور تعیین جهت منابع ولتاژ در ناحیه‌ی فعال در آرایش Emitter مشترک می‌توان مانند رابطه‌ی $I_E=I_C+I_B$ عمل کرد و جهت جریان‌ها را با توجه به جهت پلاریته‌ی منابع ولتاژ مشخص کرد.



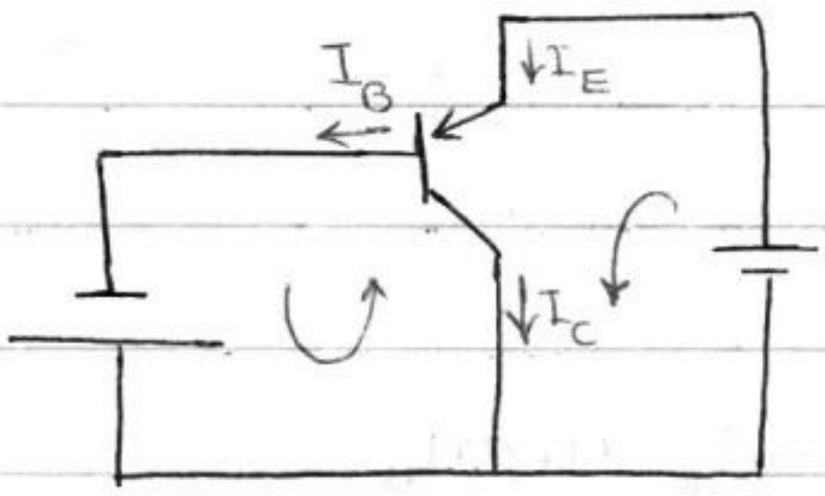



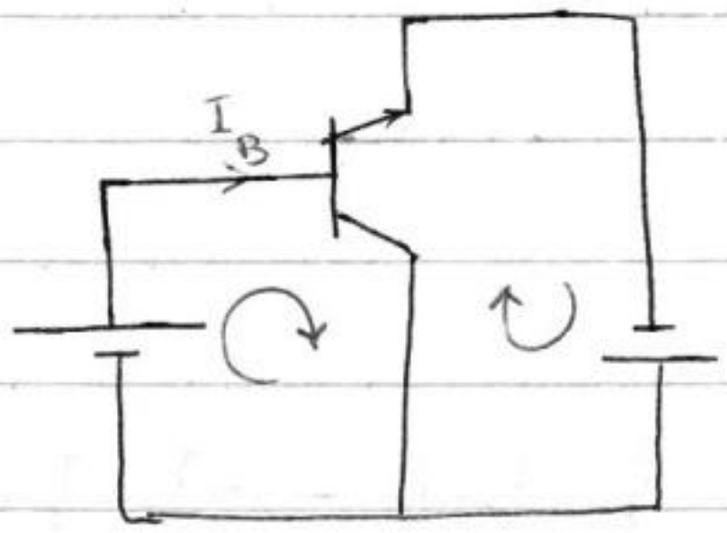
آرایش کالکتور مشترک:

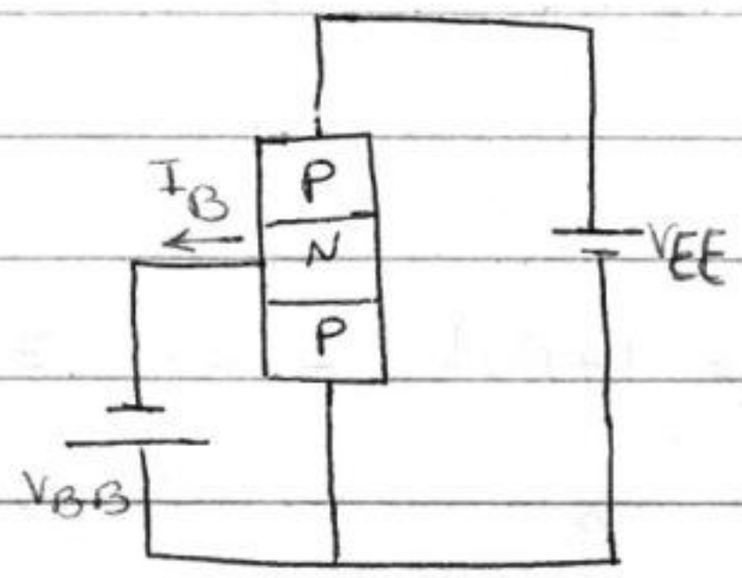
"اگر پایه‌ی Collector بین ورودی و خروجی مشترک باشد به آن Common Collector می‌گوییم"

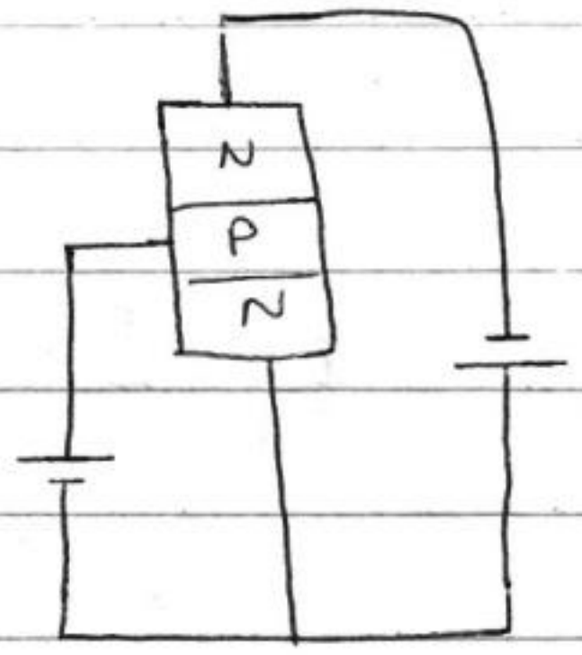
در این حالت که عموماً به منظور تطبیق امپدانس به کار می‌رود امپدانس ورودی بسیار بزرگ و امپدانس خروجی بسیار کوچک است.

Note: کلیه‌ی منحنی‌ها و شرایط مدار Common Collector و "Common Emitter" مشترک است.




* *

Note: "برای مشخص نمودن هر ترانزیستور شامل مقادیر جداول و نمودارهایی است که سعولاً سه برگه اصلی از مشخصات را بیان می‌کند این برگه‌ها شامل:

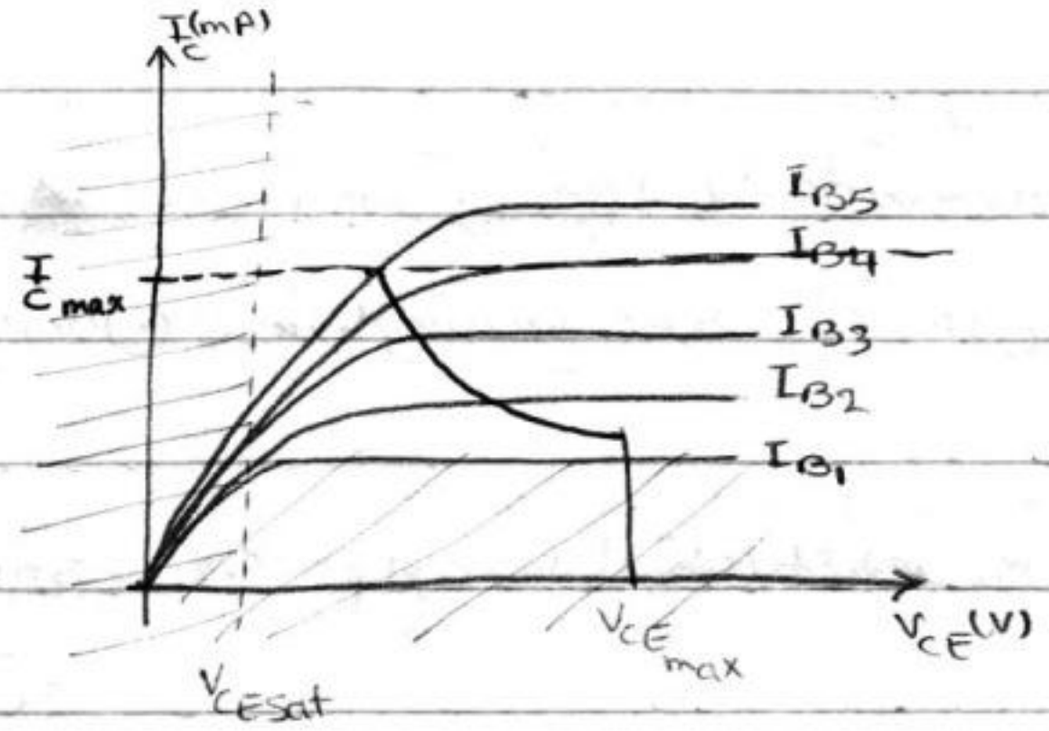
✓ Maximum Rating : مقادیر مجاز ✓

✓ Thermal characteristics : مشخصات حرارتی ✓

✓ Electrical characterstics : مشخصات الکتریکی ✓

که با توجه به کاربرد باید اطلاعات دلخواه را از این جداول و نمودارها استخراج و در طراحی و یا تعمیر مورد استفاده قرار داد.

در این مورد مقادیر ماکزیمم مجاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند معمولاً این مقادیر محدوده‌ی کارعملی ترانزیستور را مشخص می‌کند.




$P_{Cmax} = V_{CE} I_C$ ماکزیمم توان تلفاتی ترانزیستور

هم در ناحیه‌ی active، هم کمتر از $I_{Cmax}$ و زیر منحنی $P_{Cmax}$ باشد ← برای اینکه ترانزیستور خوب کار کند.

## فصل چهارم

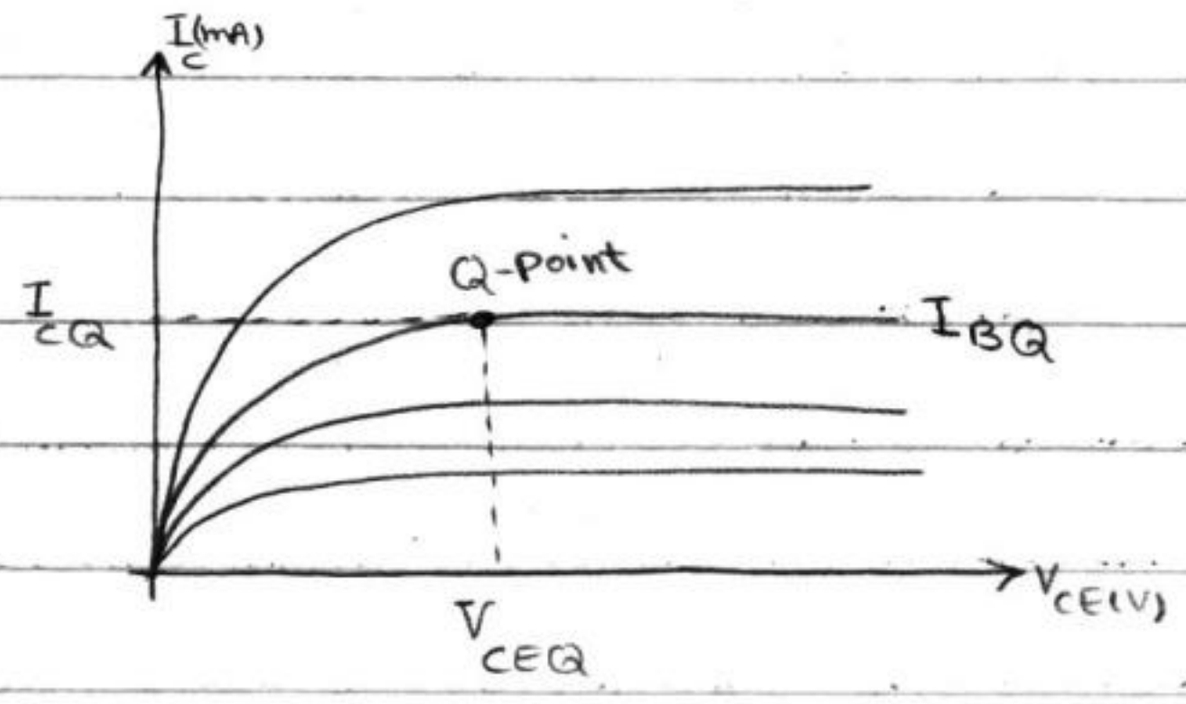
## بایاس DC ترانزیستورهای BJT

برای آنکه ترانزیستور دارای عملکرد صحیح باشد باید پایه‌های آن به شکل مناسبی از لحاظ dc تغذیه گردد، تأمین ولتاژ dc مورد نیاز جهت کار ترانزیستور را بایاس گویند. می‌دانید اگر مقدار جریان خروجی و ولتاژ خروجی را به ازای مقادیر مشخص جریان ورودی در روی منحنی مشخصه خروجی نشان دهیم این نقطه را نقطه‌ی کار می‌نویسند روش طی در آنالیز DC مدارات ترانزیستوری به خوبی زیاد است.

۱- بایاس کردن KVL جریان Base را حساب می‌کنیم.

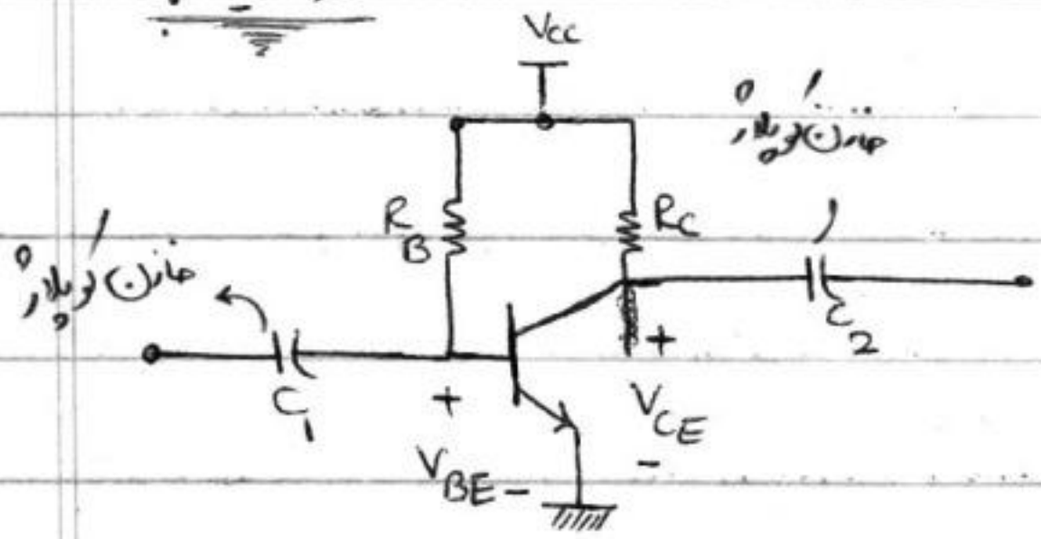
۲- در حلقه‌ی خروجی $\beta$ برای جریان Base را ضرب کرده و ولتاژ Collector-Emitter را حساب می‌کنیم.

۳- با توجه به اعداد بدست آمده در حلقه‌ی خروجی حداقل را ترسیم و نقطه‌ی کار را مشخص می‌کنیم.




مدار تغذیه ثابت:

مدار Fix Bias:




$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

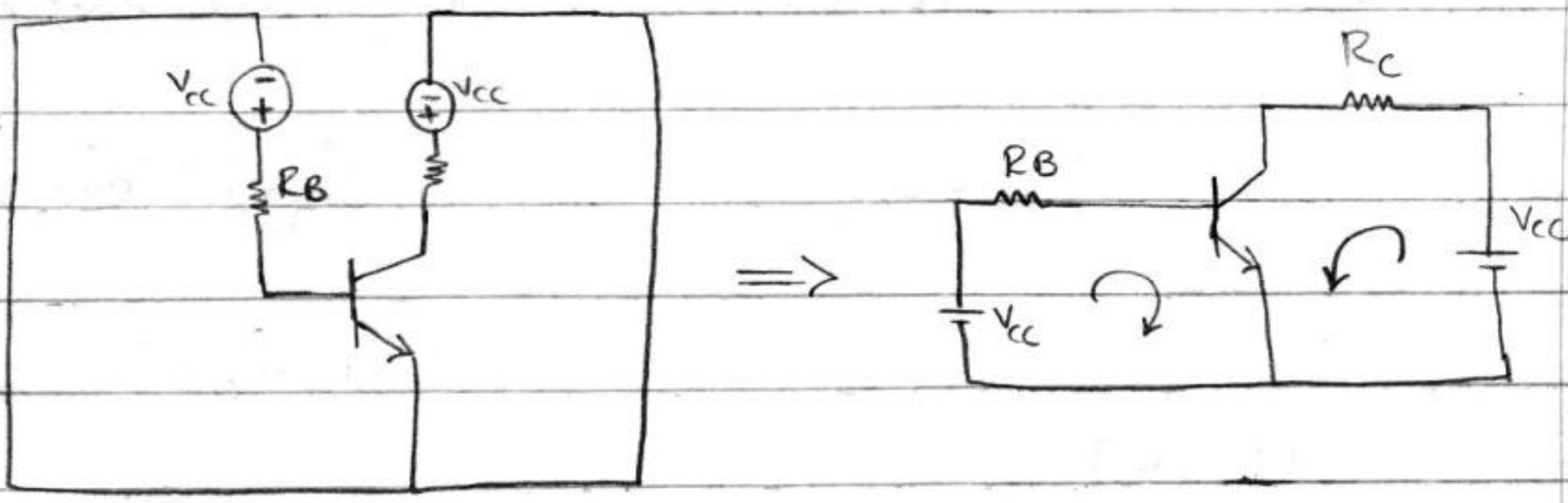
$f=0$ ⟶ اتصال باز ⟶ DC

اتصال کوتاه ⟶ ac

در مدارات الکترونیکی طبقه‌های مختلف را معمولاً به روش‌های متفاوتی به یکدیگر اتصال می‌دهیم، مانند کوپلاژ خازنی، کوپلاژ ترانسفرمری، کوپلاژ مستقیم و ...

بنابراین خازن‌هایی که با ورودی و خروجی سری قرار می‌گیرند به منظور جدا نمودن مؤلفه‌ی DC ترانزیستورها از یکدیگر می‌باشند و به آن‌ها خازن‌های کوپلاژ می‌گویند.

مدار را به شکل زیر می‌توان تغییر داد:




1 Kvl: input loop: $-V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} = 0 \longrightarrow I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$

1 Kcl: $I_C = \beta I_B$

2 Kvl: out put loop: $-V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} = 0 \longrightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$

یادآوری چند نکته:

1) $I_C = \beta I_B$

2) $V_{BE} = 0.7$

3) $I_E = I_C$

4) $V_{AB} = V_A - V_B$ $\qquad V_{BE} = V_B - V_E$

$V_{CE} = V_C - V_E$

اشباع ترانزیستور:

اگر رابطه‌ی $I_C = \frac{V_{CC}-V_{CE}}{R_C}$ را در نظر بگیریم مقدار $I_C$ رفته رفته به صفر نزدیک می‌شود $V_{CE}$ تقریباً مساوی با صفر می‌ماند ($V_{CE} \simeq 0$):

$$I_C = \frac{V_{CC}-V_{CE}}{R_C} \xrightarrow{V_{CE}\simeq 0} I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

در این حالت جریان $I_C$ به ماکزیمم مقدار خود رسیده و در این مدار مشخص براساس $V_{CC}$ و $R_C$ آن مقدار $I_C$ از این مقدار که جریان اشباع کالکتور نامیده می‌شود بالاتر نمی‌رود و آن را با $I_{C_{sat}}$ نشان می‌دهند بنابراین در

مدار Bias ثابت خواهیم داشت:

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

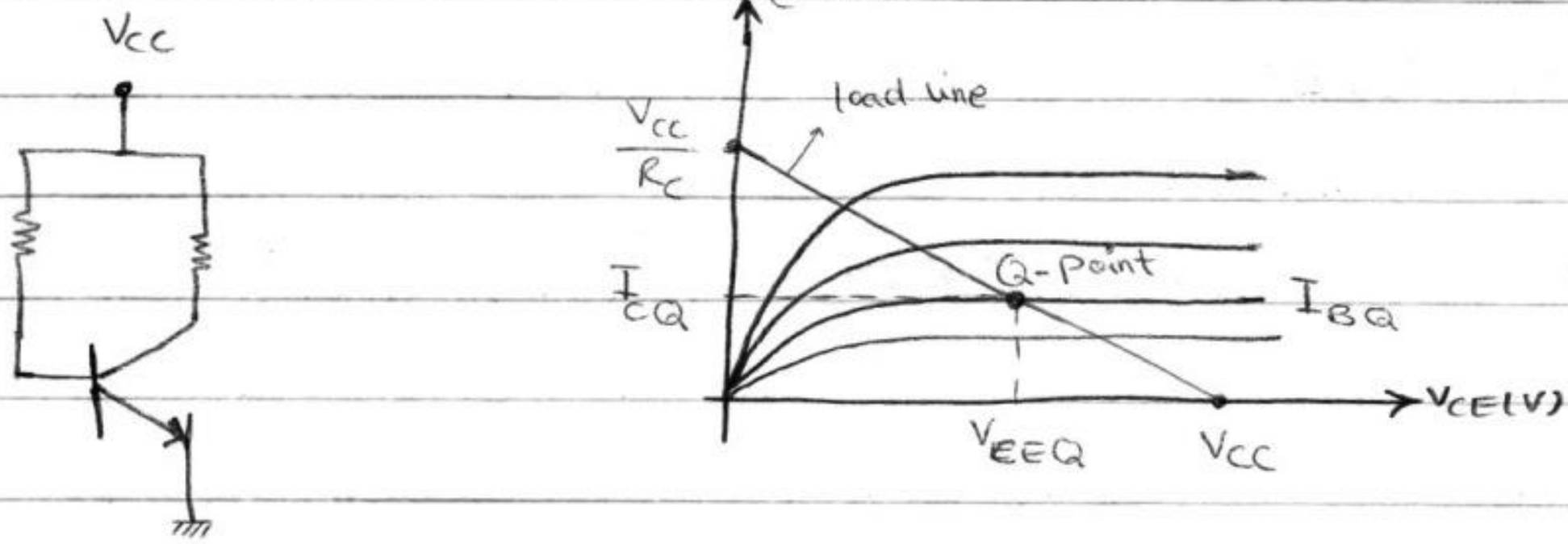
و یا در حالت کلی خواهیم داشت:

$$I_C\Big|_{V_{CE}=0} = I_{C_{sat}}$$

**

تحلیل خط بار:

load line Analysis:




$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \longrightarrow \begin{cases} I_C = 0 \longrightarrow V_{CE} = V_{CC} \\ V_{CE} = 0 \longrightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} \end{cases}$$

محل برخورد با محورها