به نام خدا

الکترونیک ۱
دانشکده فیزیک
مبحث ترانزیستور BJT

مطالبی که هم اکنون در اختیار شماست ، جهت جمع بندی مطالبی است کـه در کـلاس درس بیـان شـده است.
تنها هدف از نوشتن این مطالب آن است که، خواننده بتواند پس از مطالعه آن مدار ها را به صورت کاربردی تحلیل کند .
لذا پیشنهاد می شود که با خواندن کامل این مطالب علاوه بر فهم کاربردی تا حدودی هم بـا مطالـب درس آشنایی پیدا کنید.

همچنین با نظرات خود(درباره نوع نوشتار ومطالب بیان شـده و .....) بنـده را در نوشـتن مباحـث بعـدی همراهی کنید.

نظری

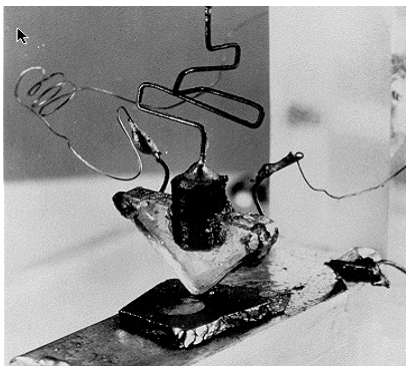
ترانزیستورهای دو قطبی
Bipolar Junction Transistor
(BJT)

تاریخچه و سیر تکاملی:

شروع مباحث مربوط به تقویت سیگنالهای الکتریکی به سالهای ۱۹۰۴ تا ۱۹۰۷ برمی‌گردد که در این سالها لامپ های خلاء ابتدایی ترین قطعات جهت استفاده در صنعت الکترونیک محسوب می شدند.

مهمترین لامپها آنهایی بودند که ۳ پایه داشتند و به آنها لامپ تریود می گفتند. این لامپ ها در آن زمان قطعه مناسبی برای تقویت بودند ولی رفته رفته با پیشرفت صنعت الکترونیک به خصوص اختراع رادیو و تلویزیون ؛ نیاز به تقویت کننده های فرکانس بالا بیشتر احساس میشد. این موضوع(یعنی تقویت در فرکانس بالا) باعث شد تا دانشمندان به خصوص فیزیک دانان به فکر ساختن قطعه ای بیافتند که قابلیت بسیار بالاتری نسبت به لامپ های خلاء داشته باشد، در ضمن بسیار سبک تر و کوچکتر نیز باشد.

بالاخره در سالهای ۱۹۴۰ تا ۱۹۴۷ با کشف بزرگ قطعات نیمه هادی (semiconductor) موفق به ساختن قطعه ای جدید با قابلیت های ذکر شده گردیدند که بعداً با توجه به کاربرد و اساس کار ؛ نام ترانزیستور (transistor = trans + resistor) را بر روی آن گذاشتند که دلیل این نام گذاری را در بخش بعد با توجه به ساختمان داخلی آن خواهیم فهمید.



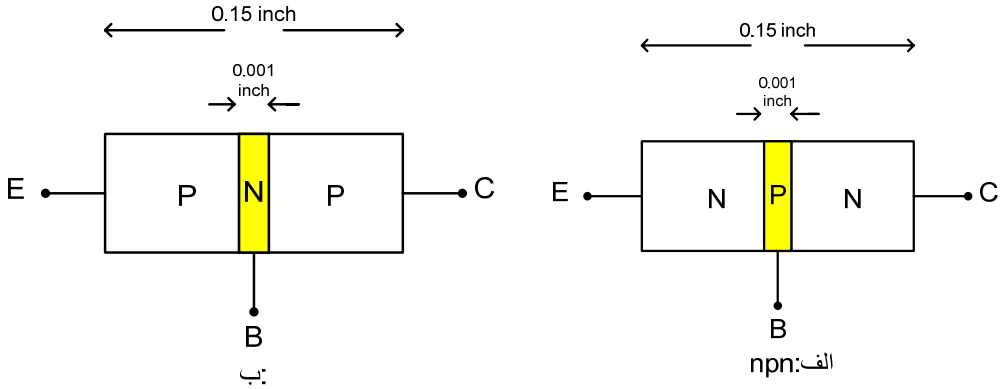
شکل ۱: اولین ترانزیستور

ساختمان ترانزیستور : (pnp , npn)

به طور کلی با توجه به ۳ پایه بودن ترانزیستور باید از سه نوع قطعه نیمه هادی استفاده شود. مشابه دیود که دو پایه بود؛ از دو نوع قطعه نیمه هادی یعنی در یک پایه از قطعه نوع p و دیگری نوع n استفاده شد. ولی چون دونوع قطعه نیمه هادی بیشتر نداریم (p-type), (n-type) , پس بنابراین باید از یک نوع ۲ بار استفاده کنیم و از نوع دیگر یکبار استفاده کنیم بدین ترتیب می توان گفت که یا از نوع n ؛ ۲ بار استفاده کنیم و از نوع p یکبار که در این صورت ترانزیستور نوع npn تولید کرده ایم و یا برعکس از نوع p، ۲ بار استفاده کنیم و از n ، یکبار که در این صورت ترانزیستور نوع pnp ساخته ایم.

در هر دو صورت اساس کار و ساخت قطعه با هم فرق اساسی ندارند و فقط با توجه به هدفی که هر ترانزیستور می تواند ما را به آن نائل کند؛ دو نوع pnp و npn می سازیم که فرق کاربرد هر یک از آنها در ادامه بحث گفته می شود.

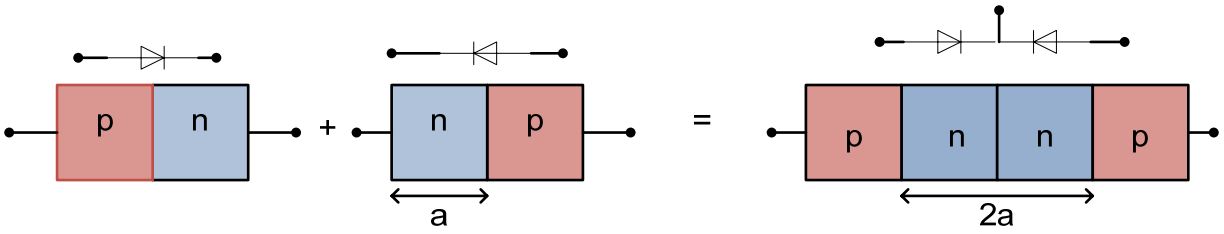
اگر بخواهیم نمای کلی از درون ترانزیستور BJT در دست داشته باشیم با توجه به توضیحات بالا به ۲ نحو می توان قطعات n و p را به هم وصل کرد که ترکیب آنها با هم متفاوت باشد این دو شکل در زیرر آمده اند.



شکل۲: انواع ترانزیستور

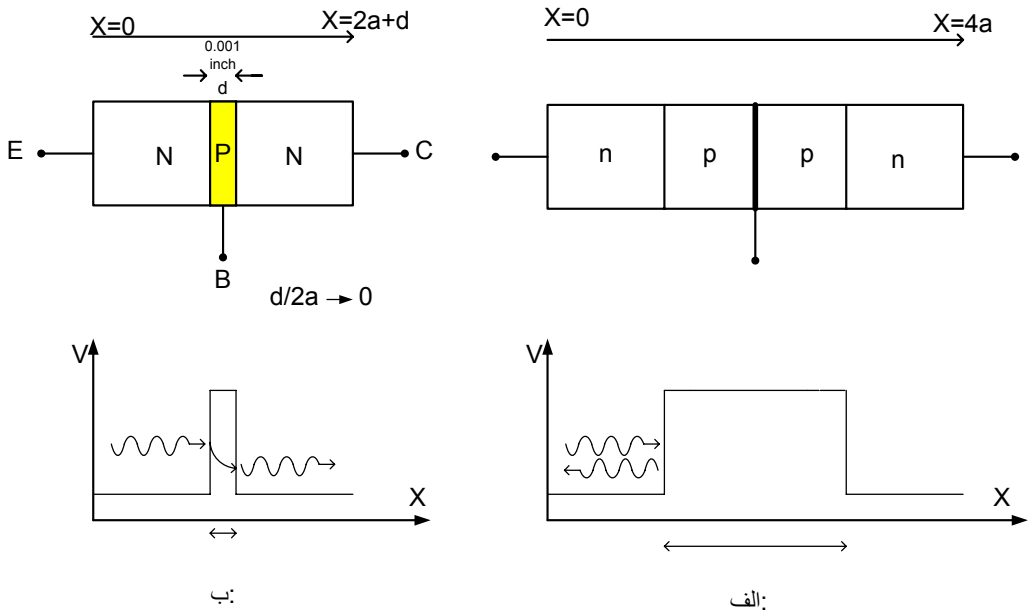
حال با توجه به اشکال ۲ این سوال مطرح می شود که آیا با داشتن ۲ پیوند مجزای p-n یعنی ۲ عدد دیود می توان یک ترانزیستور ساخت یا خیر؟ در جواب به این سؤال باید گفت

که خیر. زیرا با توجه به شکل ۲ مشاهده می کنیم که قطعه ای که با علامت B(base) نمایش داده ایم بسیار نازک تر از دو قطعه دیگر می باشد(در حدود ۰,۰۰۱ نسبت به ۰,۱۵۰ که طول کل قطعه است) بنابراین اگر دو پیوند مجزای p-n یعنی دو دیود را به هم وصل کنیم شکل ۳ حاصل می شود که با توجه به توضیحات گفته شده نه تنها ضخامت base کمتر از دو قطعه دیگر نیست بلکه دو برابر قطعه های دیگر نیز هست پس به هیچ وجه نمی توان از دو دیود قطعه ای ساخت که مانند ترانزیستور رفتار کند.



شکل۳: ترکیب دو دیود

این موضوع را با توجه به مسئله تونل زنی (tunneling) در مبحث مکانیک کوانتومی می توان توجیه کرد از این رو ترانزیستور قطعه ای است که بعد از کشف قوانین مکانیک کوانتومی اختراع شد و توجیه کلاسیکی برای آن نمی توان آورد. اگر بخواهیم توضیح مختصری از این مسئله بگوییم می توان گفت که در مبحث کوانتومی اگر سد پتانسیلی با طول محدود و کوچک داشته باشیم الکترون می تواند از درون این سد به خارج آن تونل بزند حتی اگر انرژی آن کمتر از سد باشد ولی اگر طول سد بزرگ باشد الکترون قادر نخواهد بود از سد بگذرد و احتمال تونل زنی با اضافه شدن طول سد کاهش و به صفر میل می کند. شکل ۴ با توجه به سد پتانسیل هر دو قطعه که ۴-الف تولید شده از دو دیود و ۴-ب شکل واقعی سد پتانسیل یک ترانزیستور است؛ می باشد.



شکل۴:با کوچک شدن طول سد، احتمال طونل زنی از ۰ به ۱ میل میکند.

مبحث مربوط به کوانتومی بودن ترانزیستور را بیشتر ادامه نمی دهیم و این موضـوع را بـه مبحث نیمه‌هادی ها که مفصل بحث شده است واگذار می کنیم و از این بخش به بعد تنها به بررسی کاربردی ترانزیستور در مدارهای الکترونیکی می پردازیم و تا حد ممکن از دیـدگاه الکترونیک کاربردی و مداری به ترانزیستور نگاه می کنیم ومدار معادل آن را همانند دیود و سایر قطعات الکترونیکی معرفی و بسط می دهیم.

ترانزیستور؛ قطعه ای برای کنترل جریان :

نامی که در بالا برای ترانزیستور انتخاب کردیم به خاطر کاربرد فراوانی است که این قطعه در الکترونیک؛ جهت کنترل جریان در مدارها دارد. از این رو در ساده ترین حالت می توان مدلی را برای این موجود ۳ پایه توصیف کنیم و همان طور که برای دیود مدلی توصیف و از آن استفاده کردیم در اینجا نیز با استفاده از قطعات اساسی الکترونیک (مثل مقاومت و باطری) مدلی ساده از ترانزیستور بیان می کنیم.

اصولاً با توجه به اینکه جریان در مدار بوسیله قطعه ای بخواهد کنترل شود یعنی کم و یا زیاد شود (تغییر کند)به شرط ثابت بودن ولتاژ، باید مقاومت آن تغییر کند زیرا طبق قانون اهم داریم :

1) $$I = \frac{V}{R} \Rightarrow \begin{Bmatrix} R \uparrow \Rightarrow & I \downarrow \\ R \downarrow \Rightarrow & I \uparrow \end{Bmatrix}$$

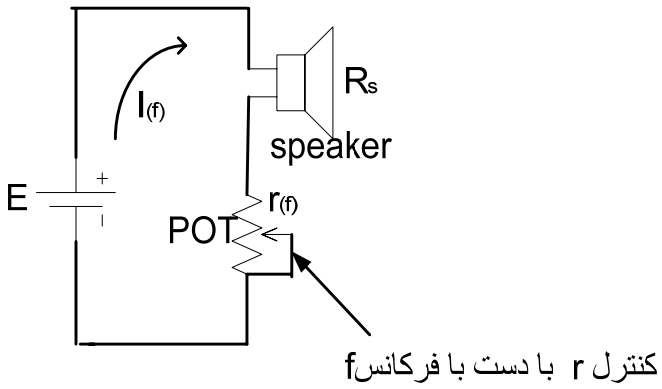
با توجه به رابطه (۱) برای تغییر ایجاد کردن در جریان یکی از راهها تغییر مقاومت قطعه ای است که جریان از آن می گذرد. پس با توجه به توضیحات اگر این قطعه ترانزیستور باشد باید از طریق تغییر مقاومت خود جریان گذرنده از مدار مربوط به خود را تغییر دهد بنابراین نام بهتری برای ترانزیستور می‌توان گذاشت وآن هم نوعی مقاومت متغیر می‌باشد. ولی چه نوع مقاومت متغیری؟ این موضوع را در قسمت بعد پی می‌گیریم.

ترانزیستور نمونه ای از مقاومت متغیر با جریان:

اصولاً پتانسیومتر که آنرا نیز نوعی مقاومت متغیر می گویند قطعه ای است که با چرخاندن پیچ آن با دست مقاومت آن تغییر می‌کند و به تَبَعِ آن جریان مدار کنترل می‌شود و یا تغییر می‌کند. (رئوستا نیز چنین است) ولی این قطعات نیاز به یک فرمان دهنده مکانیکی دارند(مثل دست) که از این رو محدودیت‌های فراوانی جلوی آنها قرار می‌گیرد که مهمترین آنها همان طور که در ابتدای درس گفته شد بحث فرکانس‌های بالا در صنعت الکترونیک می‌باشد.

اصولاً ما نمی‌توانیم از طریق یک رئوستا فرکانس‌های دلخواه و بالایی را تقویت کنیم زیرا این وسیله کاملاً مکانیکی است و سرعت بسیار کمی دارد.

خلاصه مطالب بالا را می‌توان در شکل ۵ دید که در آن می‌خواهیم جریان گذرنده از یک مصرف‌کننده (مثل بلندگو) را از طریق یک پتانسیومتر یا رئوستا تغییر دهیم و یا به اصطلاح سیگنالی را از بلندگو عبور دهیم. که در اینجا سیگنال ژنراتور؛ دست ما و تقویت‌کننده همان پتانسیومتر است:



شکل۵:مدار ساده کنترل کننده جریان یک speaker با استفاده از POTکه در این شکل طبق روابط زیر g تابعی از مقاومت r است که خود تابع فرکانس است.

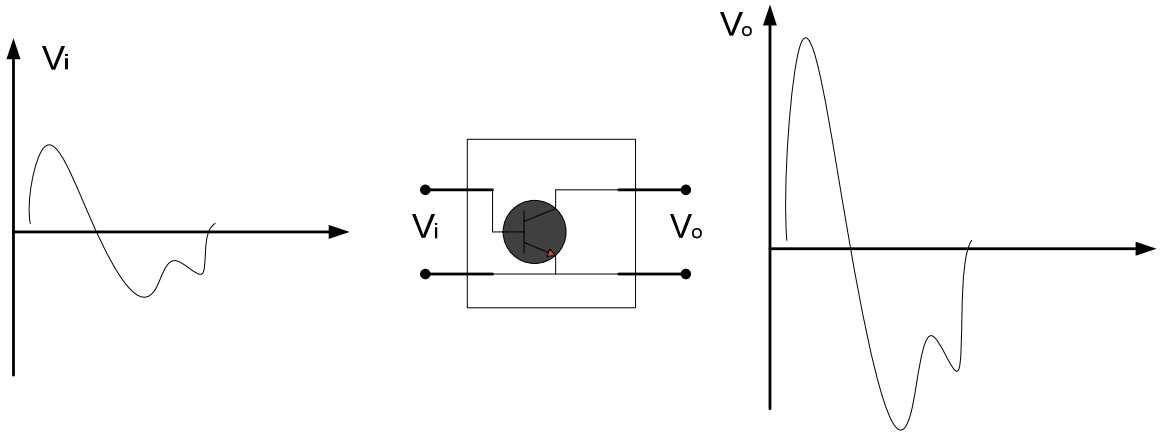
$$KVL: E - R - r(f)i(f) = 0$$

$$\Rightarrow i(f) = \frac{E}{R + r(f)} \Rightarrow i(f) =: g(r(f))$$

همان طور که دیدیم هر فرکانسی که با دست به پیچ پتانسیومتر وارد کنیم همان فرکانس باعث تغییر مقاومت pot شده که به آن r(f) گفتیم و با تغییر r(f) جریان کل مدار مطابق فرکانس اعمال شده کم و زیاد می شود بنابراین اگر بتوانیم پیچ پتانسیومتر را مثلاً برای فرکانس‌های صوتی (۲۰hz-۲۰۰۰۰hz) تغییر دهیم توانسته ایم که یک سیگنال صوتی را تولید و از طریق بلندگو پخش کنیم(تقویت کردن) اما آیا این کار امکان پذیر است؟ مسلماً خیر زیرا سیستم های مکانیکی اولاً کند هستند ثانیاً ما معمولاً می خواهیم سیگنال های الکتریکی ایجاد شده توسط یک وسیله مثلاً میکروفون را تقویت و از طریق بلندگو پخش کنیم که این کار را با وسایل مکانیکی ساده مثل پتانسیومتر یا رئوستا نمی توان انجام داد پس نیاز به یک قطعه داریم که سیگنال های کوچک الکتریکی را با فرکانس های مختلف گرفته و دامنه آنها را با همان فرکانس افزایش دهد. شکل (۶)

این قطعه همان ترانزیستور است که برای ما عمل تقویت را انجام می دهد پس مشابه مکانیکی یک ترانزیستور در ساده ترین حالت و پرکاربردترین حالت می تواند یک پتانسیومتر باشد.

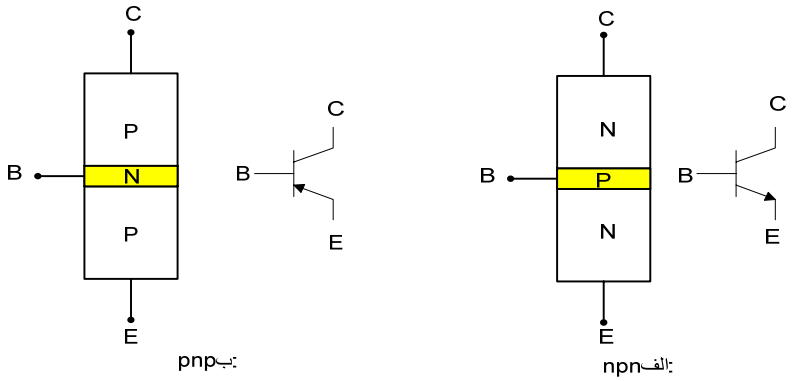
البته باید توجه داشته باشیم که پتانسیومتر مقاومت اهمی و خطی دارد ولی نیمه هادی ها غیر خطی هستند اما این مدل مطرح شده کاربردی‌ترین مدلی است که شهود بالایی از ترانزیستور را در ذهن ما ایجاد می‌کند. مباحث غیرخطی بودن ترانزیستور با توجه به منحنی‌های مشخصه در بخش‌های بعدی توصیف می‌شوند.



شکل۶:تقویت کنندگی ترانزیستور

نماد الکترونیکی ترانزیستور و انواع بایاس کردن (نصب در مدار) آن:

با توجه به اینکه هر ترانزیستور دارای ۳ پایه متفاوت است بنابراین با توجه به ویژگی هر پایه نامگذاری مناسبی روی آنها شده است و بر حسب قرارداد به دو نوع زیر نمایش داده می‌شوند. شکل (۷)

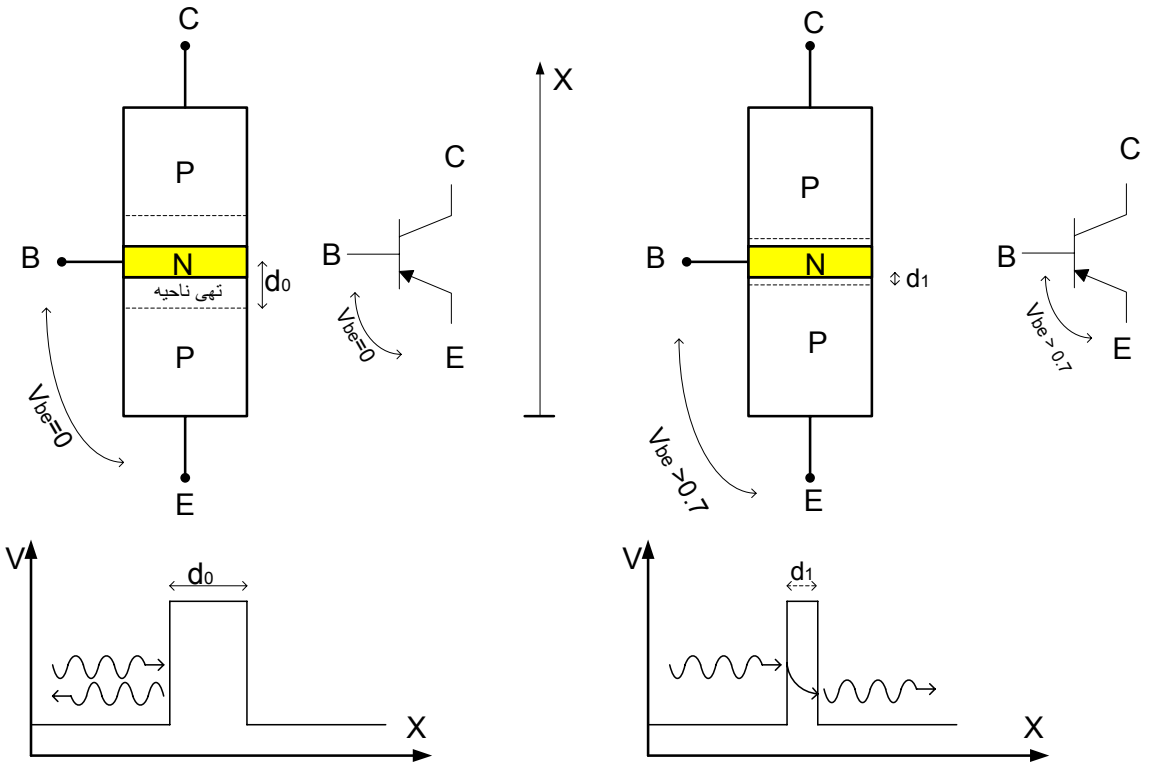


شکل۷:نماد الکترونیکی

در شکل (۷) توجه به این نکته ضروری است که تنها فرق بین npn , pnp جهت فلش بر روی امیتر(E) است. که با توجه به شباهت بین پیوند بیس- امیتر (B-E) با یک دیود پیوندی p-n می توان این جهت را در یاد نگه داشت. که جهت نگاه داشته شده هم جهت جریان E ترانزیستور است و هم بیانگر مفهوم دیودی بودن پیوندB-E می باشد. البته پیوند بیس-کلکتور هم همین ویژگی را دارد ولی بنابر قرارداد این علامت فقط بر روی E گذاشته می‌شود.

فرقی که بین پیوند بیس-امیتر و بیس-کلکتور است یکی از مهمترین ویژگی‌های ترانزیستور می‌باشد این فرق در میزان ناخالصی نیمه‌هادی امیتر، بیس و کلکتور است به طوری که ناخالصی امیتر بیشتر از بیس و ناخالصی بیس بیشتر از کلکتور است بنابراین پیوند بیس-امیتر(B-E) حامل‌های بار بیشتری از پیوند بیس-کلکتور B-C دارد. این بدین معناست که مقاومت بیس-امیتر کمتر از مقاومت B-C است که اگر طبق آنچه که برای یک پیوند p-n در بحث دیودها گفتیم؛ ولتاژ Forward-Bias برای سیستم حدود ۰,۷ ولت باشد این عدد برای پیوند p-n در بیس-امیتر به خاطر ناخالصی زیادتر، کمی کمتر از ۰,۷ است(حدوداً ۰,۶) و پیوند p-n در بیس-کلکتور همان ۰,۷ ولت خواهد بود.(در دیود و ترانزیستور ژرمانیم این عدد ۰,۳ ولت است.)

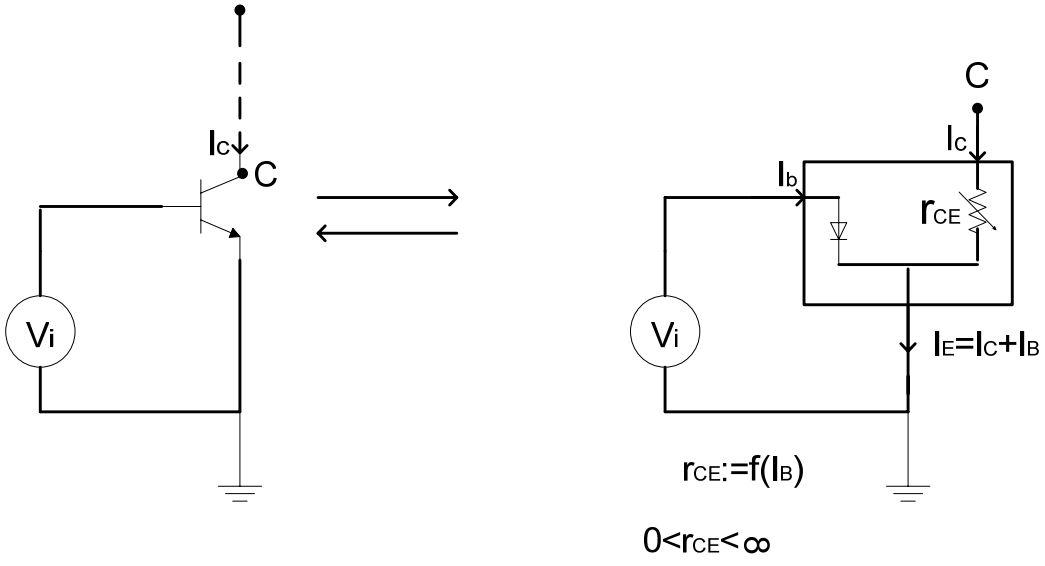
بنابراین ترانزیستورها متقارن نیستند و طوری طراحی می‌شوند که کلکتور به عنوان جمع-کننده جریانی که از امیتر ناشی می‌شود باشد و بیس هم در این میان نقش فرمان ترانزیستور را اجرا می کند. اینکه نام فرمان را به بیس دادیم به خاطر کوچک بودن عرض آن است و بسته به ولتاژی که به آن اعمال می‌شود عرض آن کم و زیاد شده و طول سد پتانسیل را کم و زیاد می‌کند از این رو مقدار الکترون‌هایی که از سد عبور می‌کنند را کم و زیاد می‌کند؛ بدین طریق با توجه به جریانی (یا ولتاژی) که به B اعمال می‌کنیم بلافاصله عرض B را تغییر می دهیم و این به معنای تغییر میزان تونل زنی (جریان) در مدار است. به خاطر همین است که به ترانزیستور، مقاومت متغیر با جریان می گویند. (شکل ۸) .



شکل۸ : الف:احتمال طونل زنی نزدیک۱ است. ب:با صفر بودن V_{be} احتمال طونل زنی تقریبا صفر است

همان طور که در شکل ۸ پیداست با اعمال ولتاژ به عرض B عرض ناحیه تهی به خاطر بایاس مستقیم کاهش یافته(ب-۸) بنابراین در حالتی که به B ولتاژ اعمال می کنیم احتمال طونل زنی را بیشتر میکنیم و این اساس کار تقویت ترانزیستور می‌باشد. در شکل ۸-الف قبل از اعمال V_B عرض ناحیه تهی d_0 است اما وقتی که به B ولتاژی بالاتر از ولتاژ وصل یک دیود معمولی (یعنی $V_{BE}=0.7$) اعمال می‌کنیم مثل این است که یک دیود را با ولتاژ Forward-Biase تغذیه کرده‌ایم که همان طور که در دیودها در حالت F-B عرض ناحیه تهی کم می‌شد اینجا هم همین اتفاق می‌افتد. بنابراین طول کل سد پتانسیلی را که جلوی الکترون را گرفته بود؛ کم می‌کند و الکترون می تواند از E به کلکتور تونل بزند یا به عبارتی جریان در مدار کلکتور-امیتر برقرار شود که این همان مطلوبی است که ما دنبال آن بودیم یعنی توانسته ایم قطعه ای را طراحی کنیم که با تغییر ولتاژ (جریان) یک قسمت از آن (در

اینجا B) ولتاژ (جریان) قسمتی دیگر از آن را (در اینجا ولتاژ C-E) تغییر دهیم کـه ایـن مفهوم را در ذهن تداعی می‌کند که با یک جریان (ولتاژ) متغیر؛ یک مقاومت متغیـر ایجـاد کرده‌ایم (زیرا اساس تغییر ولتاژ یا جریان تغییر مقاومت قسمتی از مدار است).
و این جاست که کلمه Transistor از ترکیب Trans؛ یعنی فرستادن جریانی برای تغییر مقاومت قسمتی دیگر یعنی Resistor ساخته شده است.
در شکل (۹) شماتیکی از ترانزیستور را مشاهده می‌کنیم که باز هم مانند یکpot یا رئوستا تداعی‌کننده یک مقاومت متغیر است.



شکل۹:مقاومت متغیر(r_{ce}) با جریان

تا اینجا فقط در مورد چگونگی سازوکار ترانزیستور توضیح دادیم و بیشتر پرکاربردترین حالت استفاده از ترانزیستور را که همان مقاومت متغییرات را شرح دادیم در بخش بعد انواع بایاس ترانزیستور را شرح می‌دهیم.

انواع بایاس کردن ترانزیستور:

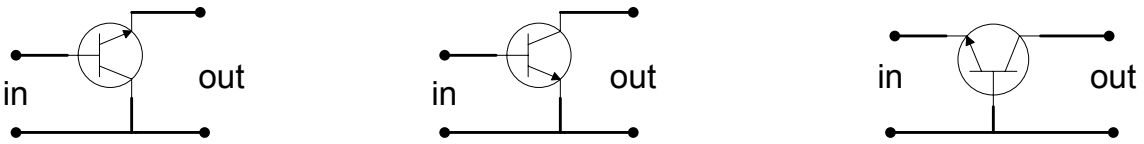
به طور معمول ۳ نوع بایاس وجود دارد :

۱- بایاس بیس مشترک

۲- امیتر مشترک

۳- کلکتور مشترک

همان‌طور که از اسم آنها پیداست در هر مدلی یک پایه بین ورودی و خروجی مشترک است وشکل آنها در زیر آمده است.

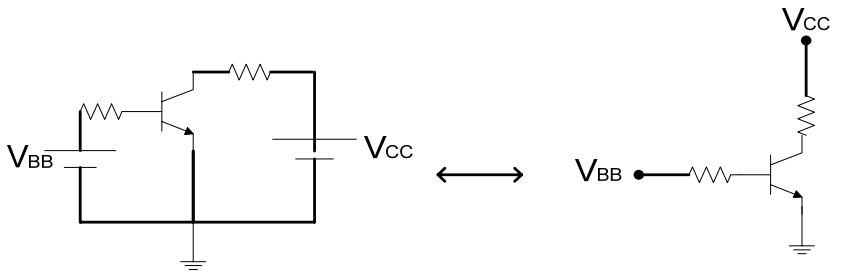


مشترک بیس:الف　　مشترگ امیتر :ب　　کلکتورمشترگ :ج

شکل۱۰: انواع بایاس

این سه نوع بایاس هر کدام کاربردها و ویژگی‌های متفاوتی با هم دارند و چون نوع بایاس امیتر مشترک پرکاربردترین آنهاست پس در ادامه به بررسی امیتر مشترک که نوعی تقویت‌کننده‌ی جریان ورودی i_B است می‌پردازیم و در انتهای بحث به طور خلاصه مثال-هایی از بیس مشترک و کلکتور مشترک می‌آوریم.

توجه: **برای ادامه بحث؛ ترانزیستور نوعnpn را که پرکاربردتر از pnp است مورد بررسی قرار دهیم و هرگاه بخواهیم ترانزیستور pnp را بررسی کنیم تنها کافی است که جهت جریان‌ها و علامت ولتاژها را در نوع npn عوض کنیم و بقیه تحلیل‌ها مانند هم هستند منتها با تغییر علامت و جهت جریان. همچنین برای سادگی شکل مدار از کشیدن باتری به طور شماتیک خودداری می کنیم و به صورت زیر باتری را نگاه می‌کنیم.**



امیترمشترگ

شکل۱۱: قرارداد در مورد کشیدن شکل باتری

هم‌چنین به این موضوع توجه کنید که تمام نقاطی که به صورت آزاد قرار می‌گیرند مثل نقاط C,B در شکل ۱۱-ب بیان‌گر ولتاژی هستند که جلوی آنها نوشته شده می‌شود. و نسبت به زمین سنجیده شده‌اند.
هم‌چنین از حروف بزرگ مانند R,I,V برای مقادیر نامی DC و از حروف کوچک مانند r,i,v برای مقادیر ac استفاده می‌کنیم.

بررسی مدار تقویت‌کننده ترانزیستوری در حالت بایاس امیتر مشترک :

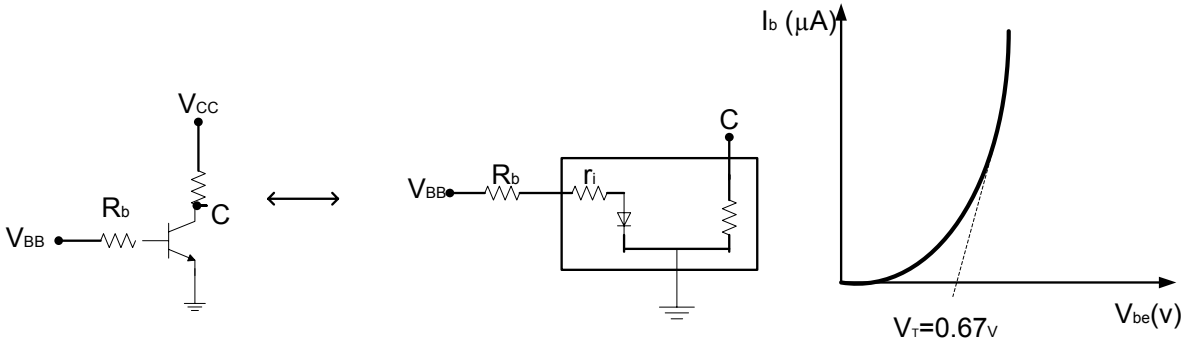
بررسی منحنی‌های مشخصه ترانزیستور؛ تعیین نقطه کار ترانزیستور :

هر کمپانی سازنده قطعات الکتریکی موظف است که برای استفاده مشتریان از قطعه ساخته‌شده، شناسنامه‌ای از آن قطعه را به مشتریان ارائه دهد. این شناسنامه یا datasheet باید شامل مهمترین مشخصه قطعه یا همان منحنی‌های کار ترانزیستور باشد.
هر نوع بایاسی منحنی مشخصه خاص خود را دارد و تفاوت کمی با هم دارند ولی برای کاربرد بهینه از ترانزیستور به خصوص حالت تقویت‌کنندگی آن منحنی مشخصه در حالت امیتر مشترک مهمترین آنها می‌باشد و معمولاً این منحنی در datasheet بیان می‌شود.

۱ : منحنی مشخصه ورودی ترانزیستور در حالت امیتر مشترک :

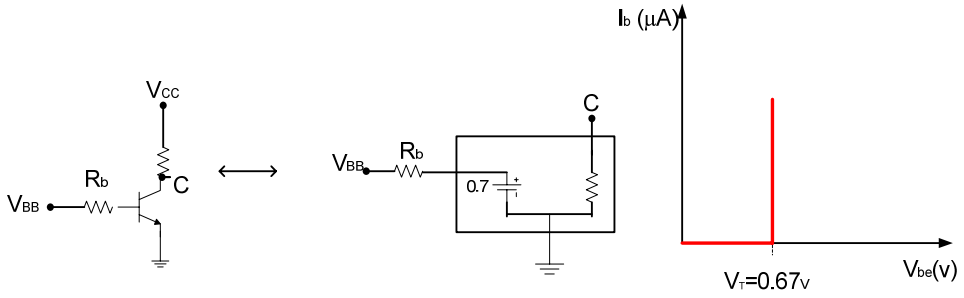
(***توجه :*** **از اینجا به بعد چون حالت امیتر مشترک را بررسی می‌کنیم دیگر از گفتن کلمه "امیتر مشترک" خودداری می‌کنیم.)**

با توجه به شکل (۱۲) می‌بینیم که ولتاژ ورودی مدار در مقابل خود یک دیود را می‌بینید، یعنی اینکه ولتاژ V_B به یک دیود در حالت بایاس مستقیم (f.b) وصل شده است؛ پس منحنی مشخصه ترانزیستور برای قسمت ورودی $(i_b - v_b)$ به صورت یک دیود معمولی در قسمت Forward-Bias است.



شکل۱۲:منحنی مشخصه ورودی(مانندیک دیود)

این منحنی مشخصات ورودی ترانزیستور را بیان می‌کند که دقیقاً مثل یک دیود است و وقتی که ولتاژ B به اندازه $V_T = 0.6v$ رسید در این حالت جریان یک دفعه افزایش می‌یابد و اگر مانند دیود ورودی ترانزیستور راایده‌آل فرض کنیم(یعنی از مقاومت داخلی دیود صرف نظر کنیم)منحنی مشخصه کاملاًخط راست با شیب بینهایت می‌شود.



شکل۱۳:حالت ایده آل

در شکل ۱۳ به جای دیود ورودی معادل آن یعنی باتری ۰,۷ ولتی (برای si) استفاده کردیم و توجه داریم که جهت باتری خلاف جهت جریان باید باشد.(همانند دیود)

مانند دیود برای ورودی ترانزیستور یک مقاومت دینامیک r_D و یک مقاومت استاتیک R_s تعریف می‌شود که بنا به تعریف :

$$R_s = \frac{V_{be}}{I_i}$$

(2)

$$r_D = \frac{\partial v_b}{\partial i_b}$$

$$v_b = V_{be} + v_{be}$$ حروف بزرگ : مؤلفه DC

$$I_b = I_i + i_b$$ حروف کوچک : مؤلفه ac

در دیود r_D در حالت ایده‌آل با توجه به شیب منحنی شکل ۱۳ به سمت صفر میل می‌کند پس :

در حالت ایده‌آل $r_D \to 0$

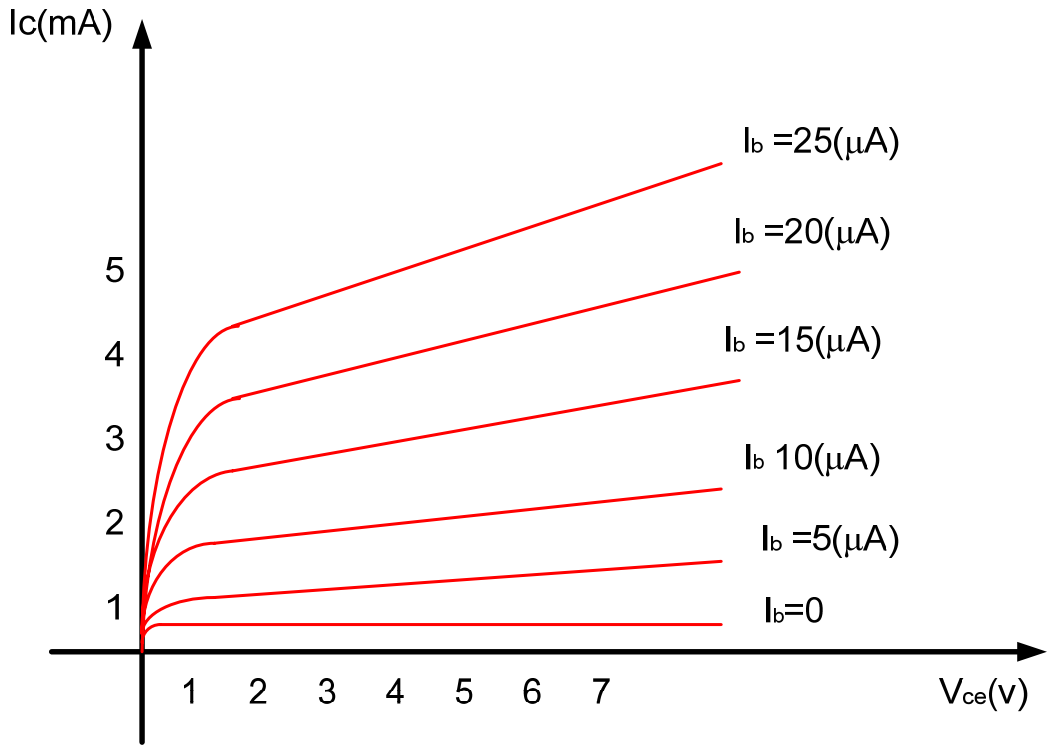
$$R_s = \frac{V_{be}}{I_i} = \frac{0.7}{I_i} \Rightarrow R_s I_i \cong 0.7 \cong V_{BE} \quad (3)$$

پس از این به بعد برای یک ترانزیستور معمولی در قسمت ورودی باید به اندازه ۰,۷ ولت از ولتاژ بیس کم کنیم این کار را به این دلیل می‌کنیم که هر چند ترانزیستور را تقریباً ایده‌آل فرض کردیم ولی چون ولتاژهای ورودی به بیس کوچک‌اند و در حد چند ولت (زیر ۱۰ ولت) هستند بنابراین ۰,۷ ولت ولتاژ قابل ملاحظه‌ای است و باید آن را (جهت دقت کار) در نظر گرفت. فراموش نشود که ما کاملاً کاربردی به بحث نگاه می‌کنیم و نباید دقت کار را خیلی پایین بیاوریم زیرا ۰,۷ در عمل خود یک اعوجاج در موج خروجی ایجاد می‌کند. بحث مربوط به اعوجاج مفصل است و به درس‌های بعدی موکول می‌شود.

۲- منحنی مشخصه خروجی ترانزیستور یا منحنی جریان کلکتور بر حسب ولتاژ کلکتور امیتر : $(i_C - v_{CE})$

دومین منحنی‌ای که کمپانی به همراه ترانزیستور می‌دهد منحنی $(i_C - v_{CE})$ است. که مهمترین منحنی ترانزیستور می‌باشد. این منحنی به صورت یک تک منحنی داده نمی‌شود.

بلکه برای جریان‌های مختلفی که به ورودی داخل می‌شود منحنی‌های زیادی برای خروجی می‌توان رسم کرد این منحنی‌ها همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است تنها در یک ضریب با هم فرق دارند و تا حدودی هم شیب آنها رو به افزایش است که در جای خود هم ضریب مورد نظر و هم اختلاف اندک شیب‌ها بحث خواهد شد.



شگل۱۴:منحنی مشخصه ترانزیستور(امیتر مشترک)برای خروجی به ازای ibهای متفاوت

در این منحنی باید به چند نکته توجه شود. مهمترین آنکه به ازای افزایش جریان بیس منحنی‌ها با یک ضریب بزرگ رو به افزایش هستند یعنی مثلاً به ازای یک جریان $i_b = 5\mu A$ جریان معادل با آن برای کلکتور در حدود $i_c = 1mA$ است. به واحدهای جریان‌ها توجه شود که به ازای یک ورودی در حد μA خروجی در حدود mA است و اگر ورودی بیشتر شود مثلاً $i_b = 10\mu A$ خروجی نیز به همان ترتیب حدوداً دو برابر می‌شود یعنی $i_C = 2mA$. در این صورت می‌توان بین جریان ورودی i_b و جریان خروجی i_C رابطه‌ای نوشت که مهمترین رابطه مربوط به یک ترانزیستور BJT می‌باشد.

ضریب β یا ضریب تقویت جریان :

هر ترانزیستوری با نمودار مشخصه‌اش بیان می‌کند که جریان خروجی را چند برابر جریان ورودی می‌تواند تقویت کند که در تقریب اول این رابطه بین جریان خروجی و جریان ورودی یک رابطه ساده و خطی خواهد بود :

$$i_C = \beta i_b \quad or \quad \beta = \frac{i_C}{i_b} \qquad if \begin{cases} i_b > 0 \\ v_{cc} = const \end{cases} \tag{4}$$

این رابطه با این فرض که شیب منحنی‌ها تقریباً ثابت است و تفاوت کمی با هم دارند بدست آمده است و مهمترین رابطه در بحث تقویت‌کننده‌های ترانزیستوری به خصوص در حالت امیتر مشترک است. اصلاً β را ضریب تقویت امیتر مشترک می‌نامند.

در ترانزیستورهای مختلف بزرگ بودن و ثابت بودن β یک حسن است و معمولاً β های بزرگ تا حدود ۱۰۰۰ هم می‌رسند و ترانزیستوری ایده‌آل ماست که β ثابتی نسبت به درجه حرارت و تغییرات v_c داشته باشد و تمام سعی کمپانی‌ها در استیبل کردن β در حالات مختلف می‌باشد.

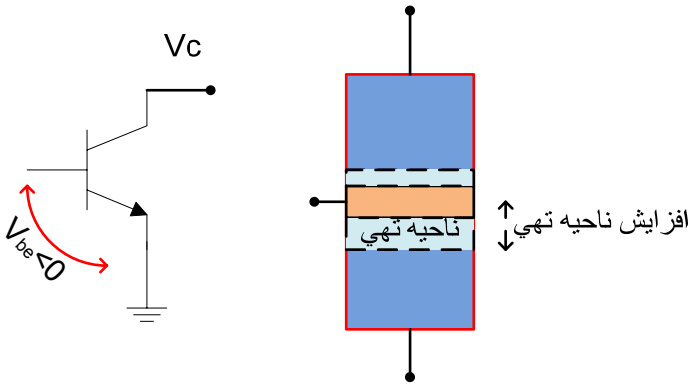
حال به منحنی مشخصه باز می‌گردیم و می‌خواهیم ببینیم که اگر بخواهیم مداری را با توجه به منحنی ترانزیستوری طراحی کنیم چگونه می‌توانیم از این منحنی بهره‌مند شویم.

ابتدا لازم است که چند تعریف ساده را بیان کنیم و پس با توجه به آنها به ادامه بحث متمرکز شویم.

۱- ناحیه قطع :

همان طور که از اسم آن پیداست؛ ناحیه‌ای از منحنی مشخصه است که در آن عملاً جریانی از کلکتور نخواهد گذشت. مشخصاً هویداست که این ناحیه تنها در حالتی که i_b کمتر از صفر است اتفاق می‌افتد و به ازای جریان‌های کمتر از صفر برای ورودی، جریان خروجی یا به عبارتی جریان کلکتور صفر می‌شود. بدین معنا به این ناحیه، ناحیه قطع گویند. در این حالت ترانزیستور در حالت off است. توجه به این نکته ضروری است که در این ناحیه گویی مقاومت خروجی ترانزیستور بینهایت است که این معادل قطع بودن ترانزیستور می باشد. از دید کوانتومی چنین توجیه می‌شود که اگر جریان بیس صفر یا کمتر باشد بدین معناست که v_{be} کمتر از صفر است. یعنی پیوند p-n ناحیه B,E به صورت معکوس بایاس شده است. که

این موضوع باعث زیاد شدن عرض ناحیه تهی یا اضافه شدن طول سد پتانسیل است. پس احتمال تونل زنی به صفر میل می کند وعملاً می گویند ترانزیستور در حالت قطع میباشد.(شکل۱۵)



شکل۱۵

این ناحیه در شکل ۱۶ نشان داده شده است. و بیشترین ولتاژ v_{CE} در این حالت اتفاق می افتد.(چرا؟)

۲- *ناحیه اشباع:*

این ناحیه همان طور که از اسم آن پیداست دقیقاً مخالف حالت قطع است یعنی جایی که جریان حداکثر از کلکتور می گذرد و از اینجا به بعد هر چه i_b را اضافه کنیم i_C از یک مقدار i_{Csat} بیشتر نخواهد شد. در این حالت است که می گویند جریان کلکتور به اشباع رسیده یا اصطلاحاً ترانزیستور در حالت سچوره (saturation) است. با توجه به مطالب بالا و رابطه (۴) می توان شرط اشباع ترانزیستور را به صورت زیر بیان کرد :

$$5) \quad \beta I_b > I_{C(sat)} \qquad \beta\text{:constant}$$

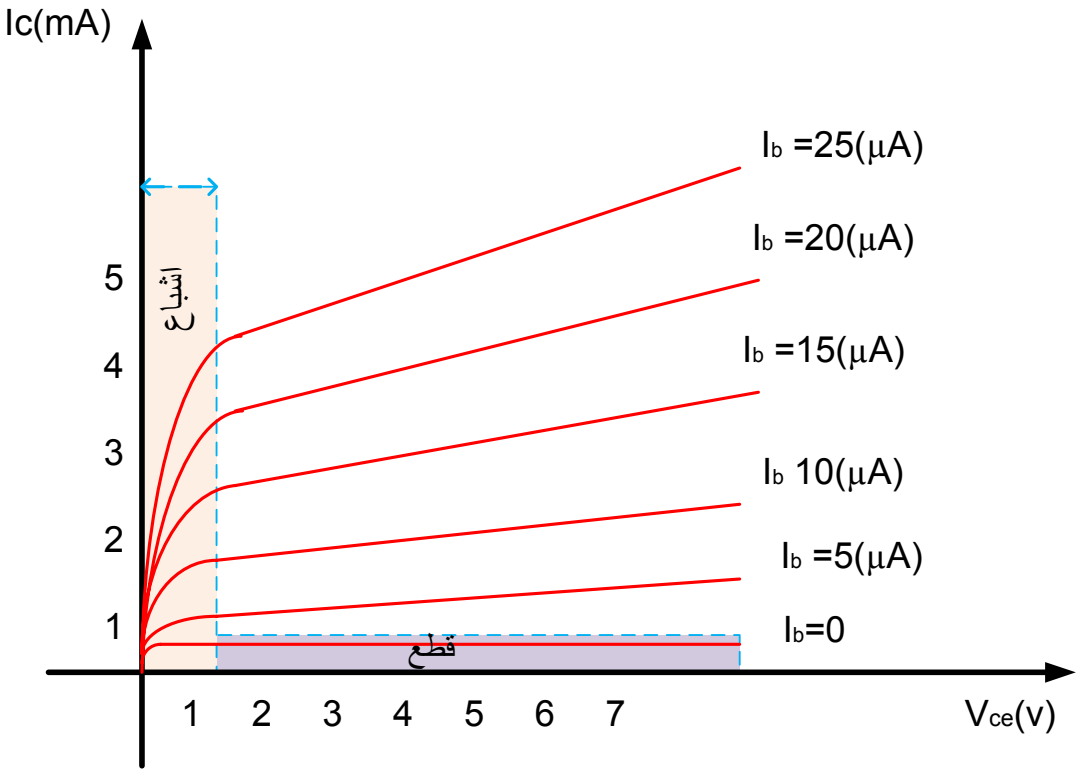
یعنی اینکه I_C تا یک حدی می تواند با I_b به صورت خطی افزایش پیدا کند تا جایی که مقدار I_c به $I_{c(sat)}$ برسد از این جا به بعد با افزایش I_b برای I_c هیچ اتفاقی نمی افتد و در این حالت رابطه (۴) تبدیل به نامساوی (۵) می شود. در این حالت جریان گذرنده از c ،

Max است و این به معنای حداقل بودن مقاومت کلکتور-امیتر است و به تبع آن ولتاژ کلکتور-امیتر حداقل خواهد بود(چرا؟). بنابراین ترانزیستور دراینجا کاملاً وصل است و فقط در حدود ۰٫۱ ولت بین کلکتور و امیتر اختلاف دارد که قابل صرف نظر کردن است.

در این حالت گفته می شود ترانزیستور on است.

به عنوان تمرین از دیدگاه کوانتومی این موضوع را توجیه کنید.

این ناحیه هم در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل۱۶:نواحی قطع و اشباع

۳- توان ماکسیمم: P_{max} :

قسمت سوم از جایی که در منحنی مشخصه حائز اهمیت است جایی است که از روی توان ماکسیمم تعیین می شود. با توجه به اینکه ترانزیستور دارای دو پیوند می باشد پس تمام

توانی که تلف می کند یکی در پیوند کلکتور-بیس و دیگری در پیوند بیس-امیتر اتفاق می افتد که با توجه به تعریف توان مصرفی یک ترانزیستور داریم :

$$P = I_C V_{CB} + I_E V_{BE} \quad (6)$$

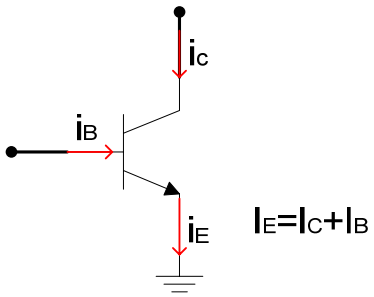
که در رابطه بالا جمله اول $I_C V_{CB}$ توان تلف شده در پیوند کلکتور- بیس و جمله دوم $I_E V_{BE}$ توان تلف شده در پیوند بیس-امیتر است.

از آنجایی که درترانزیستور ها (با توجه به شکل۱۷) رابطه زیر برقرار است :

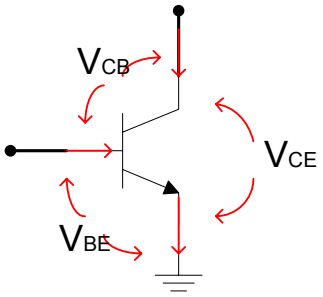
$$I_E = I_C + I_B \quad (7)$$

با توجه به 4 داریم:

$$I_E = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) I_B \quad (8)$$



شکل۱۷:



شکل۱۸:

در رابطه بالا می توان از عدد ۱ در برابر β (که حدود ۲۰۰ است) صرف نظر کرد و نوشت :

$$I_E \cong \beta I_B = I_C \Rightarrow I_E \cong I_C \quad (9)$$

این رابطه همواره در ترانزیستورها برقرار است وفقط چند میکروآمپر مقدار I_E از I_C بزرگتر است. حال به رابطه (۶) باز می گردیم و با توجه به رابطه (۹) خواهیم داشت :

$$P = I_C (V_{CB} + V_{BE}) \quad (10)$$

که مقدار داخل پرانتز از جمع دو ولتاژ کلکتور-بیس V_{CB} و ولتاژ بیس- امیتر تشکیل شده است که این ولتاژ با توجه به شکل۱۸ همان ولتاژ کلکتور-امیتر است.

$$V_{CB} + V_{BE} = V_{CE} \quad (11)$$

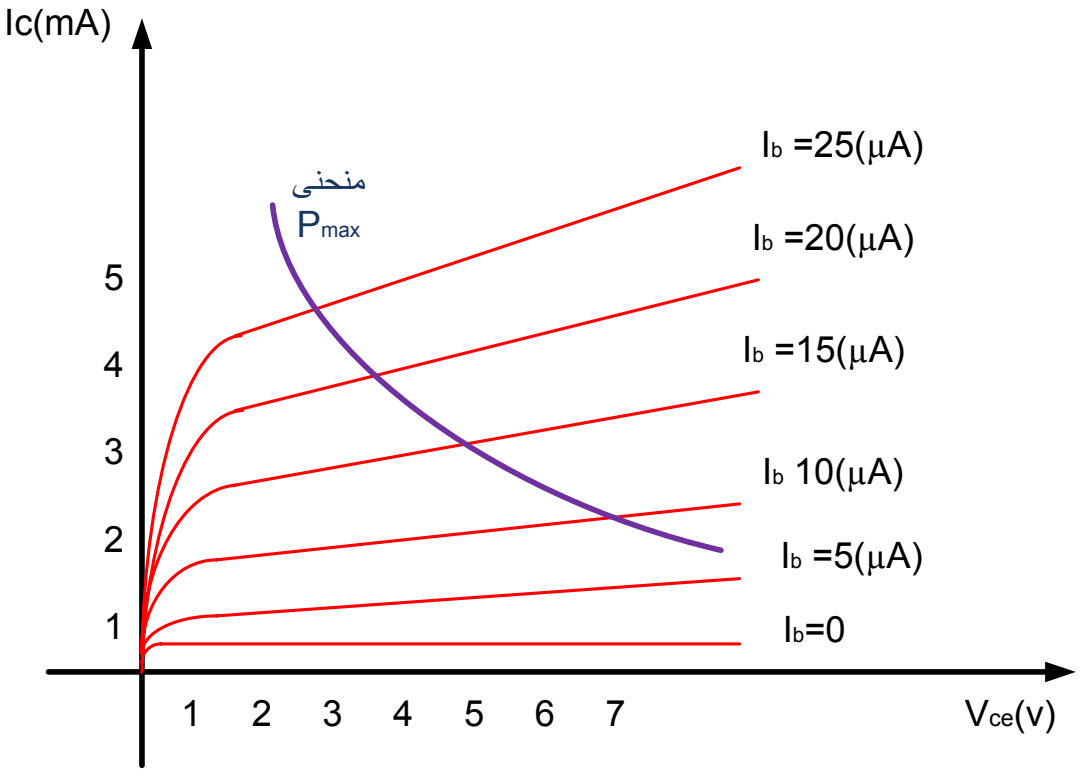
در این صورت توان کل مصرفی ترانزیستور بدست خواهد آمد :

$$P = I_C V_{CE} \qquad (12)$$

از آنجایی که توان توأماً از ضرب جریان کلکتور در ولتاژ کلکتور بیس بدست می آید پس می توان گفت که این توان میزان توانی است که نباید بیشتر از آن از ترازیستور توان کشید به عبارتی این *توان اسمی* ترانزیستور است. بنابراین مانند سایر وسایل الکترونیکی که از توان اسمی آن نباید تجاوز کرد؛ می توان نوشت :

$$P_{\max} = I_C V_{CE} \qquad (13)$$

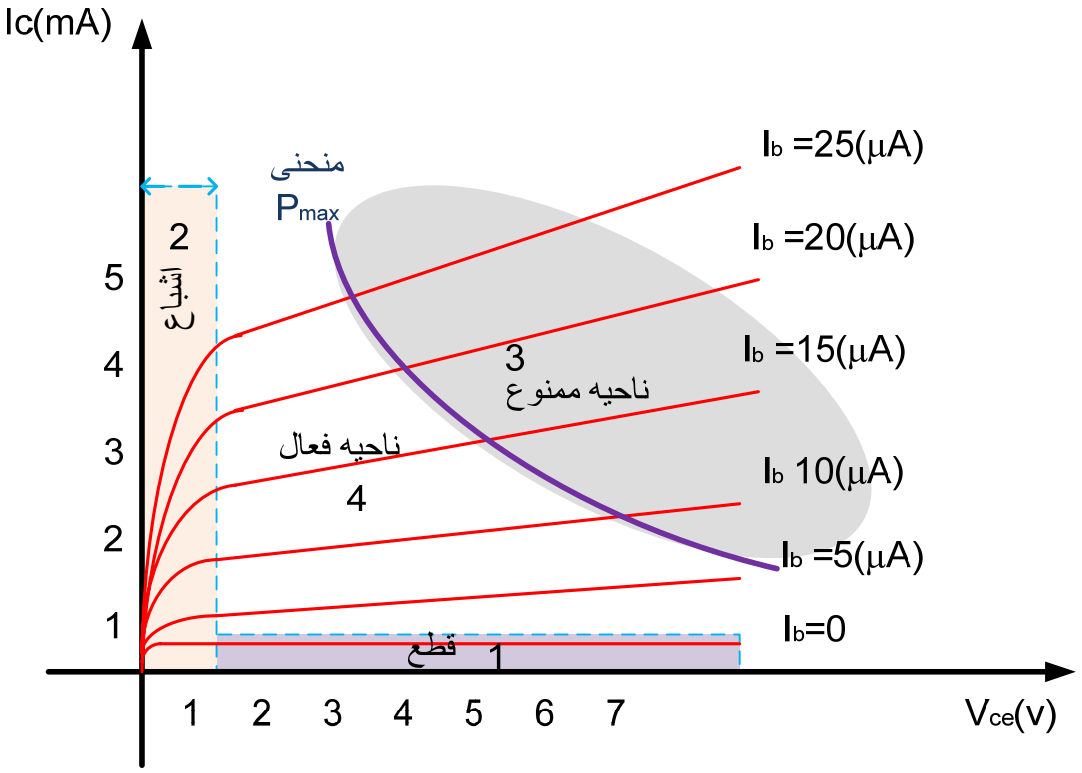
حال با توجه به مشخص بودن P_{max} و با فرض ثابت بودن آن نسبت به تغییرات i_b می توان منحنی توان ماکسیمم یک ترانزیستور را در مختصات (i_C, v_{CE}) رسم کرد.(شکل ۱۹)



شکل۱۹:منحنی توان ماکسیموم به همراه منحنی مشخصه آن

حال با توجه به این سه تعریف نگاهی دوباره به منحنی مشخصه ترانزیستور می اندازیم و ناحیه ای که مایلیم ترانزیستور برای ما عمل کند را بر روی آن مشخص و از روی آن مدار معادل یک ترانزیستور را به صورت کاملاً کاربردی نمایش می دهیم.

با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می کنیم که تنها ناحیه ای که مجازیم در آن قرار بگیریم تا یک قطعه با مقاومت متغیر نسبت به جریان ورودی داشته باشیم (تا بتوانیم یک تقویت کننده داشته باشیم) ناحیه بین سه قسمت بیان شده است(ناحیه ۴)



شکل۲۰:انواع نواحی کار ترانزیستور

۴-ناحیه فعال:

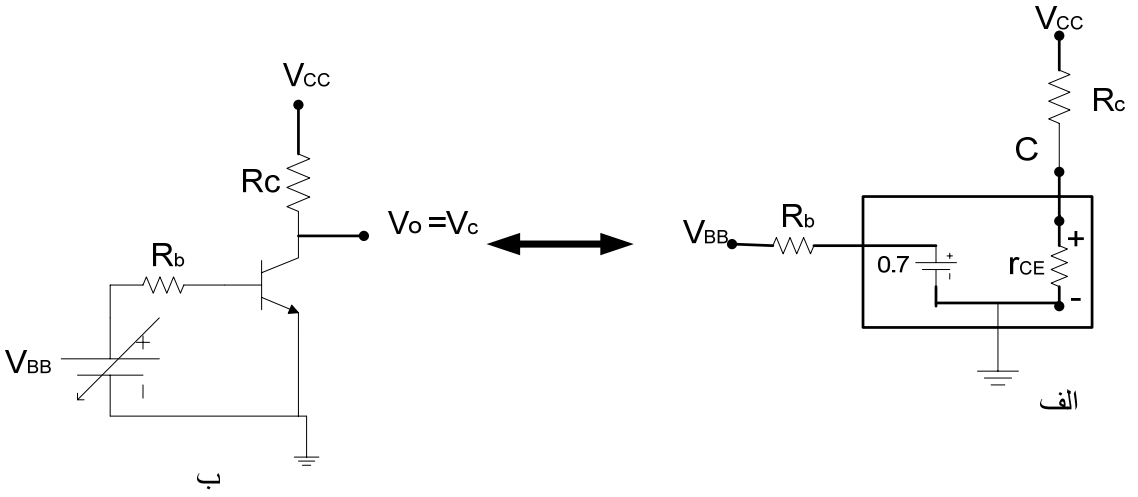
این ناحیه که مهمترین قسمت منحنی مشخصه است در اصل تنها جایی است که ترانزیستور به حالت خطی رفتار کرده و هر چه در جریان بیس وارد شود به شرطی که در این محدوده باشد β برابر آنرا در جریان کلکتور، به خروجی می دهد. بنابراین اگر بخواهیم

تقویت کننده ترانزیستوری بسازیم باید محوطه کار ترانزیستور را در این ناحیه تنظیم کنیم. منظور از محوطه کار؛ تعیین نقطه ای درون این ناحیه است که ترانزیستور بهینه ترین تقویت را به ما می دهد. بدین منظور برای سیگنال های معمولی و خصوصاً صوتی استفاده از حدوداً وسط این ناحیه بهترین و مطمئن ترین راه تعیین نقطه کار ترانزیستور خواهد بود.
نواحی دیگر از جمله ناحیه قطع و اشباع در مبحث *دیجیتال* یا *سوئیچینگ* مفصلاً بحث خواهد شد. و در یکی از کاربردهای مهمِ کلیدزنی (switching) در مبحث الکترونیک ،استفاده از این دو ناحیه جهت صفر یا یک کردن ولتاژ در مدارهای منطقی می باشد که در جای خود بحث می شوند.
ناحیه دیگر ناحیه *توان غیر مجاز* است که در آن ناحیه ترانزیستور خواهد سوخت و نباید نقطه کار به آنجا انتقال یابد که این خود مبحثی مهم در تعیین ثبات کار ترانزیستور د راثر تغییرات دمایی و محیطی از قبیل میدان های الکتریکی و ... است.
حال توجه خود را فقط در ناحیه فعال معطوف کرده و نقطه کار ترانزیستور را با روش های ساده در زیر می یابیم. باید توجه داشته باشیم که نقطه کار دست خود ماست و این ما هستیم که بسته به نیازمان این نقطه را دقیقاً تعیین می کنیم.

تعیین نقطه کار و خط بار DC در بایاس امیتر مشترک :

منظور از نقطه کار یافتن نقطه ای از منحنی مشخصه است که ما می خواهیم ترانزیستور در آن نقطه کار کند و منظور از نقطه کار تعیین زوج مرتب (v_{CE},i_C) می باشد. هم چنین منظور از خط بار DC خطی است که معادله آن در رابطه بین v_{CE} , i_C با توجه به ولتاژهای اعمال شده به مدار و مقاومت های درون مدار؛ صدق کند. بنابراین خط بار DC چیزی نیست چون خطی راست با شیب مشخص که نقطه کار ترانزیستور دقیقاً روی آن قرار دارد وتغییرات جزئی جریان ورودی (سیگنال ac) حول آن نقطه تغییر می کند و β برابر آن سیگنال از خروجی یا کلکتور خارج می شود.
در ادامه برای اینکه اهمیت تعیین نقطه کار درک شود با مدارهای خیلی ساده شروع و در نهایت به یک مدار کامل تقویت کننده ساده مبحث را خاتمه می دهیم.

مدار ساده زیر را در نظر بگیرید. در این مدار از یک مقاومت R_C به عنوان مصرف کننده استفاده شده است و خروجی مدار v_0 از کلکتور گرفته شده است پس نوع بایاس آن امیتر مشترک است زیرا امیتر به زمین وصل است.

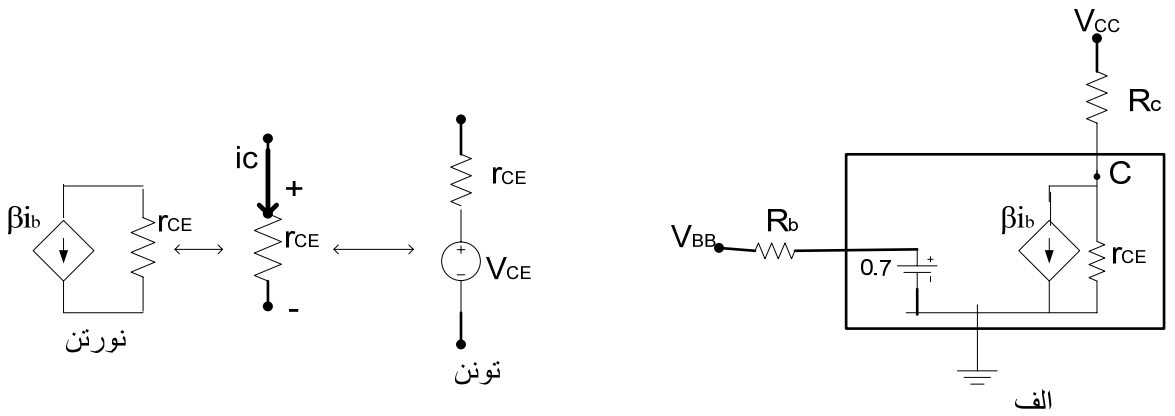


شکل۲۱: **الف**_مدار تقویت کننده DC ب_ مدار معادل آن

در مدار معادل معنای r_{CE} مقاومت بین کلکتور و امیتر می باشد و چون مقدار آن متغیر است آنرا با حرف کوچک r_{CE} نمایش می دهیم همان طور که می دانیم مقدار آن تابعی از جریان بیس i_b است یعنی :

$$(14) \qquad r_{CE} := f(i_b)$$

از طرفی در مدار معادل علامت +و - بر روی مقاومت r_{CE} (شکل۲۲) بیانگر نوعی مفهوم است یا به عبارتی دیگر بیانگر V_{CE} می‌باشد پس در مدار معادل می‌توانیم از نماد قراردادی زیر استفاده کنیم:



شکل ۲۲-مدار معادل ترانزیستور مطابق قرارداد

در شکل ۲۲ نماد لوزی نماد *منبع شدت جریان وابسته*(وابسته به ib) است و اینکه با یک مقاومت موازی شده است بیانگر جریانی است که از درون مقاومت در حال عبور است و به آن معادل نورتن گویند معادل تونن آن هم که با دایره مشخصی به عنوان منبع ولتاژ نشان داده شده است دقیقاً بیانگر همان حالت +و- بر روی مقاومت r_{CE} می‌باشد که هر سه حالت با هم یکی هستند و طبق روابط تبدیل زیر با هم معادل می‌شوند:

$$r_{CE}I_C = V_{CE} \quad (15)$$

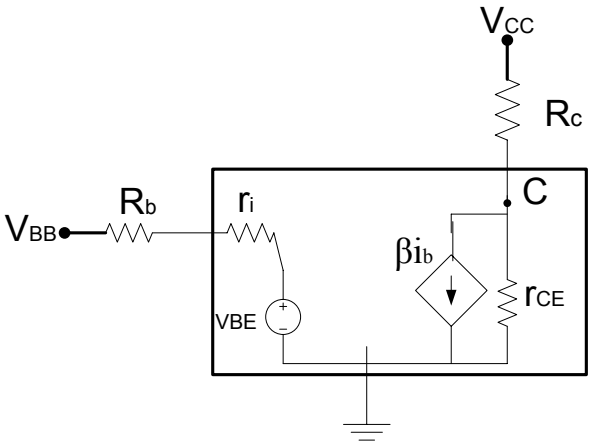
I_C: جریان معادل نورتن

V_{CE}: ولتاژ معادل تونن

در اینجا هدف ساده سازی مدار ترانزیستور با استفاده از نمادگذاری جدید است و نامهای تونن و نورتن را طبق قرارداد بر روی آنها گذاشته ایم که از هم تفکیک شوند.

به دلیل اینکه ترانزیستور عمل تقویت جریان را با استفاده از تابعی از جریان ورودی انجام می‌دهد پس شایسته‌تر است که از مدار معادل نورتن استفاده کنیم که در اکثر کتابها از این نمادگذاری استفاده شده است و برای اینکه کاملاً مطابق قراردادهای بین المللی عمل کرده باشیم به جای باتری ۰/۷ ولتی درون ورودی از نماد یک منبع ولتاژ معمولی به همراه یک مقاومت داخلی استفاده می‌کنیم.

در این صورت در کامل‌ترین حالت مدار معادل یک ترانزیستور مطابق زیر خواهد شد:



شکل ۲۳: مدار معادل ترانزیستور در کامل‌ترین حالت

در عمل می‌توان به جای V_{be} , r_i به خاطر اینکه سرعت بیشتری در محاسبات داشته باشیم برای نوشتن KVL در حلقه بیس- امیتر فقط به اندازه ۰/۷ ولت درگذر از بیس به امیتر از V_{BB} کم کنیم و این همواره درست است. در این حالت تقریباً r_i را صفر در نظر گرفته‌ایم. پس همواره داریم:

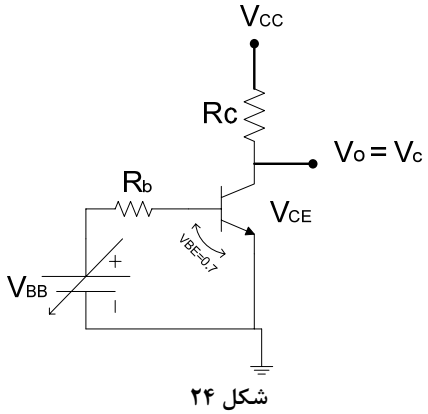
$$V_{BE} = 0.7v$$

حال به مدار شکل ۲۱ بازمی‌گردیم و می‌خواهیم که نقطه کار و خط بار DC مدار را به دست بیاوریم و از این به بعد فراموش نمی‌کنیم که در تحلیل DC:

۱. **هرگاه از بیس به امیتر عبور کردیم ۰/۷ ولت از V_{BB} کم می‌کنیم.**

۲. **هرگاه از کلکتور به امیتر عبور کردیم به اندازه $V_{CE}=r_{CE}I_C$ از V_{CC} کم می‌کنیم.**

با توجه به این دو قرارداد دیگر لازم نیست که هر دفعه مدار معادل را رسم کنیم.(شکل۲۴)



شکل ۲۴

پس با توجه به مطالب بیان شده برای حلقه BE داریم:

$$(16)\quad B-E: \qquad V_{BB}-R_b i_b-0.7=0 \Rightarrow i_b=\frac{V_{BB}-0.7}{R_b}$$

$$(17)\quad C-E: \qquad V_{CC}-R_C i_C-V_{CE}=0 \Rightarrow V_{CE}=V_C=V_{CC}-R_C i_C$$

هدف یافتن زوج مرتب (V_{CE},i_C) است. تا نقطه کار تعیین شود.

می‌دانیم:

$$(18)\quad i_C=\beta i_b$$

پس طبق (۱۶) داریم:

$$(19)\quad i_C=\beta\left(\frac{V_{BB}-0.7}{R_b}\right)$$

و طبق ۱۷ داریم:

$$(20)\quad V_{CE}=V_{CC}-R_C\,\beta\, i_b$$

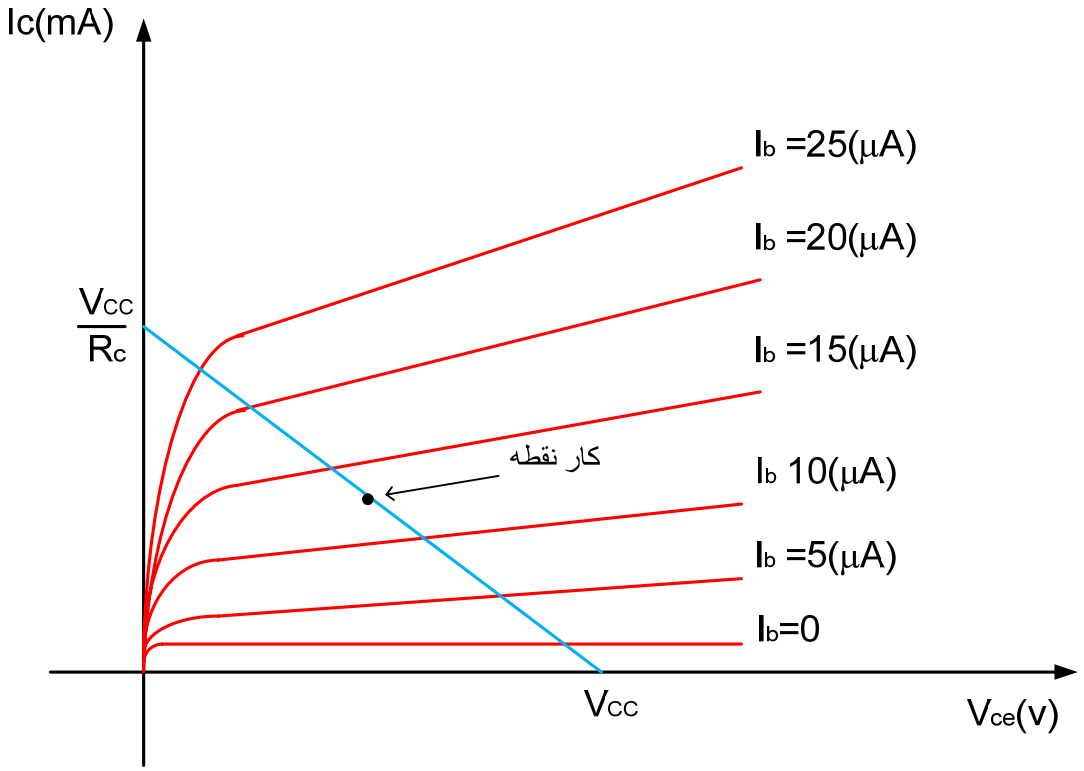
بنابراین نقطه کار ترانزیستور را با معلوم بودن V_{CC},V_{BB},β که β را کارخانه مشخص می‌کند و دوتای دیگر دست ماست، مشخص می‌کنیم.

حال به یافتن خط بار DC مبادرت می‌ورزیم.

گفتیم که خط بار DC معادله خطی راست است که رابطه بین i_C , V_{CE} است پس می‌توانیم از رابطه (۱۷) این معادله را تعیین کنیم:

$$(17)\quad V_{CE}=V_{CC}-R_C i_C$$

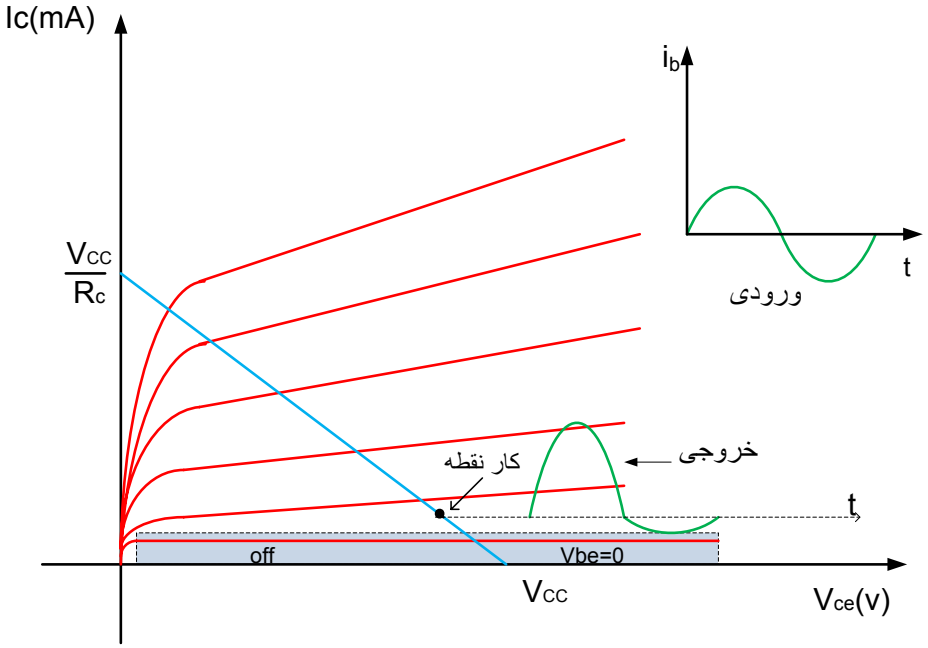
چون که V_{CC} , R_C باید ثابت باشد پس می‌توان شیب معادله بالا را تعیین کرد که برابر با $(-1/R_C)$ می‌باشد. پس خط بار DC به صورت زیر بر روی منحنی مشخص می‌شود.



شکل ۲۵:خط بار ***DC***

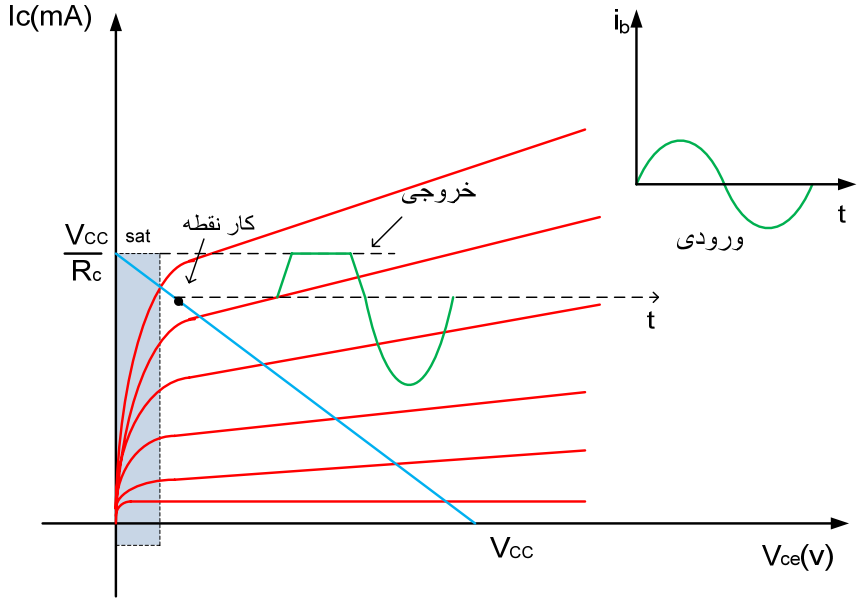
در تعیین نقطه کار که کاملاً دست ماست توجه داریم که:

۱. **این نقطه نباید خیلی پایین باشد. در این صورت به ناحیه قطع نزدیک می‌شویم و در این صورت نمی‌توان سیگنالهای *ac* که علامت منفی دارند را تقویت کرد زیرا از قسمت پایین در حالت *off* قرار می‌گیریم. این موضوع را می‌توان در شکل ۲۶ مشاهده کرد:**



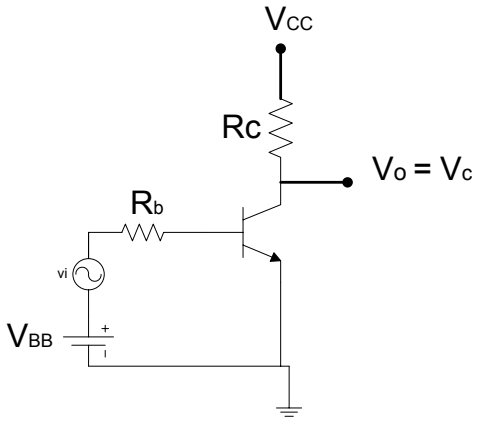
شکل ۲۶: *CV* شدن سیگنال *ac* با دامنه منفی در اثر تعیین نقطه کار نامناسب

۲. **این نقطه نباید خیلی بالا انتخاب شود زیرا به ناحیه اشباع نزدیک می‌شویم. در این صورت سیگنال *ac* که دارای دامنه + است *Cut* می‌شود و عمل تقویت ناقص انجام می‌شود. شکل ۲۷.**



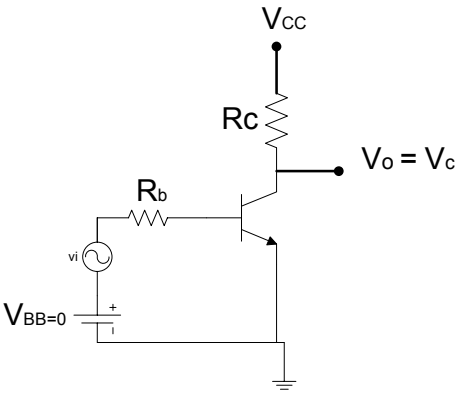
شکل ۲۷: تعیین نقطه کار نامناسب و ایجاد بریدگی در دامنه + سیگنال ورودی

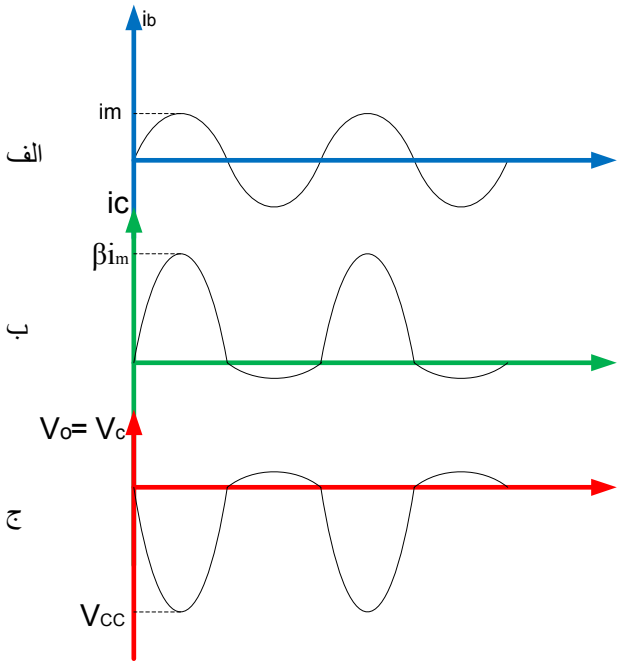
در دو موردی که در بالا ذکر شد فقط خواستیم مثالی از تعیین نقطه کار نامناسب را آورده باشیم و این کار را با این فرض انجام دادیم که به ورودی(مانند شکل زیر) یک منبع سیگنال ac نیز جهت تقویت وصل کرده‌ایم که دراین صورت توضیحات بالا کامل خواهند شد.



شکل ۲۸: اضافه شدن منبع سیگنال ac به ورودی جهت بررسی شکل سیگنال خروجی

در اینجا ۳ حالت را که می‌توان برای تعیین نقطه کار استفاده کرد نمایش می‌دهیم.





شکل۲۹:

شکل ۲۹ برای حالتی است که نقطه کار نزدیک ناحیه قطع است یعنی I_C (دقت شود جریان DC کلکتور که وابسته به I_b است) به صفر نزدیک است. پس در این صورت قسمت منفی سیگنالها تقویت نمی‌شوند. این حالت را می‌توان با کم کردن V_{BB} به راحتی ایجاد کرد.

در شکل الف-۲۹ شکل موج جریان ورودی را نشان داده‌ایم که کاملاً متقارن است ولی این شکل در ۲۹-ب که جریان خروجی مدار است یا به عبارتی جریان کلکتور را نشان می‌دهد از ناحیه منفی‌ها cut شده است که این به خاطر انتخاب نادرست نقطه کار است.
شکل ۲۹-ج نیز ولتاژ خروجی($V_o = V_{CE}$) را نشان می‌دهد که با توجه به شکل ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با ولتاژ(جریان) ورودی دارد و این به خاطر رابطه معکوس بین جریان ورودی و مقاومت r_{CE} است. زیرا:

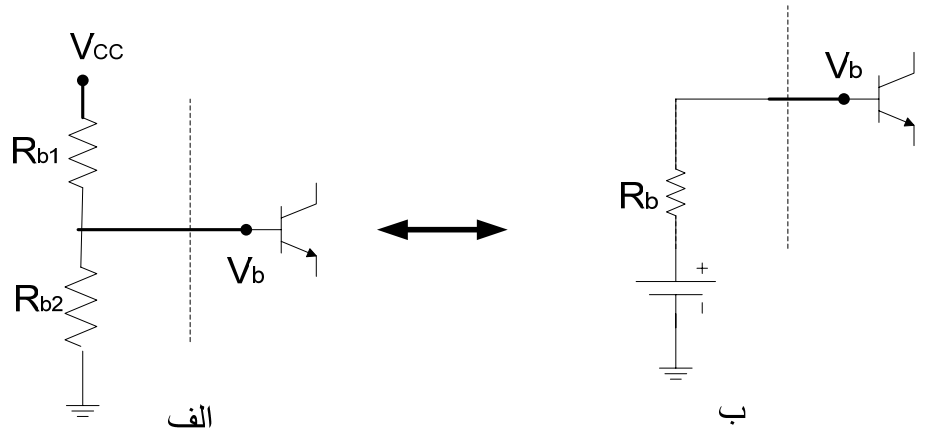
$$r_{CE} = \frac{V_{CC}}{i_C} - R_C \qquad (21)$$

در نتیجه:

$$r_{CE} \propto \frac{1}{i_C} \propto \frac{1}{\beta i_b} \qquad (22)$$

یعنی با افزایش i_b , r_{CE} کاهش و به تبع آن V_C کاهش می یابد. پس دلیل اینکه V_{CE} ۱۸۰ درجه با V_i اختلاف فاز دارد همین رابطه معکوس بین r_{CE} , i_b است.

حال مدار شکل ۲۱ را به شکل کاربردی‌تری مورد بررسی قرار می‌دهیم.
در الکترونیک معمولاً استفاده کردن از تعداد باتری کمتر خود یک هنر است زیرا هم حجم بالا و هم قیمت بالایی دارند از این رو تا جای ممکن سعی بر این است که از حداقل تعداد باتری استفاده کنند.
حال می‌خواهیم مدار را طوری تغییر دهیم که نیازی به ۲ باتری نباشد از این رو در صدد هستیم که مطابق معمول باتری V_{BB} را حذف ولی به جای آن از مدار معادلی استفاده کنیم که در زیر نمونه پرکاربردی از آن رسم شده است در اصل از یک دیوایدر ولتاژ استفاده می‌کنیم که دقیقاً معادل تونن آن همان شکل V_{BB} را به همراه R_b دارد:



شکل ۳۰: مدار تقسیم کننده ولتاژ جهت تغذیه بیس ترانزیستور و جلوگیری از مصرف باتری بیشتر. ب معادل تونن آن

در شکل ۳۰-می‌دانیم که به نقطه V_b؛ بیس ترانزیستور قرار است وصل شود و همچنین بین V_{BB} و عناصر مدار ۳۰-الف روابط زیر برقرار است:

$$V_{BB} = V_{th} \quad (23)$$

در حالی که V_{th} ولتاژ تونن مدار معادل در شکل ۳۰-الف است.

و به صورت زیر درمی آید:

$$KVL: V_{CC} - R_{b_1} I_1 - R_{b_2} I_2 = 0 \quad (24)$$

که در رابطه بالا KVL را برای مدار ۳۰-الف نوشته ایم و I_i جریان گذرنده از دو مقاومت است. به شرطی که طبق قرارداد تونن مدار را به صورت $open$ در نقطه V_b بررسی کنیم داریم:

$$I_1 = I_2 = I \quad (25)$$

بنابراین

$$V_{CC} - (R_{b_1} + R_{b_2})I = 0 \quad (26)$$

و جریان گذرنده به دست می‌آید:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_{b_1} + R_{b_2}} \quad (27)$$

حال قرار است که ما $V_{(b_2)_o}$ را حساب کنیم و از این رو می دانیم که:

$$V_{(b_2)_o} = V_{R_{b_2}} = R_{b_2} I = V_{th} \quad (28)$$

که منظور از $V_{(b2)o}$ ولتاژ مدار باز *(open circuit)* برای دو سر R_{b_2} است که طبق قرارداد نام ولتاژ تونن را به آن می‌دهیم V_{th}.

پس طبق ۲۷:

$$(29) \quad V_{(b_2)_o} = \frac{R_{b_2}}{R_{b_1} + R_{b_2}} V_{CC}$$

حال با توجه به رابطه ۲۳ ولتاژ معادل با تونن یعنی V_{BB} را یافته‌ایم. پس:

$$(30) \quad V_{BB} = \frac{R_{b_2}}{R_{b_1} + R_{b_2}} V_{CC} = V_{th}$$

توجه شود نام تونن به خاطر قرارداد و ذکر اصولی بودن کار؛ بیان می شود.

بهتر بودکه ما V_{th} را$V_{(b2o)}$ نامگذاری کنیم ولی به دلیل اهمیت معادلهای تونن و نورتن در مهندسی برق؛ بهتر بود یادی از تونن نیز بکنیم. هرچند نیازی به نامگذاری جدید نبود پس دچار گیجی نشوید!

حال به مدار شکل ۳۰ بازمی گردیم و می‌خواهیم R_b را محاسبه کنیم. می دانیم که:

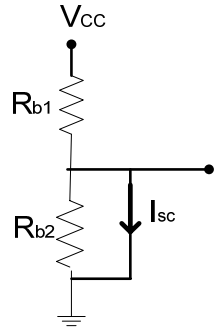
$$(31) \quad R_b = R_{th}$$

یعنی R_b مقاومتی است که از دید بیس ترانزیستور به آن وصل شده است و معادل است با مقاومت تونن یا R_{th}.

می دانیم که:

$$(32) \qquad R_{th} = \frac{V_{th}}{I_n} = \frac{V_{th}}{I_{sc}}$$

که در آن I_n جریان نورتن است و می دانیم که برابر با I_{sc} یا همان جریان گذرنده از مدار اتصال کوتاه دو سر مقاومت R_{b_2} :



شکل ۳۱: یافتن جریان نورتن یا I_{sc}

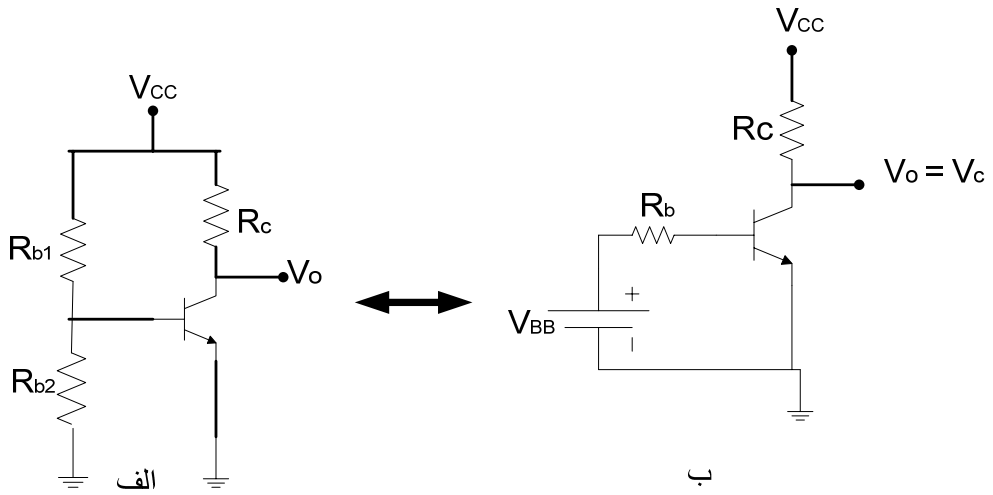
با توجه به شکل ۳۱، I_{sc} برابر با:

$$(33) \quad I_{sc} = \frac{V_{cc}}{R_{b_2}} = I_n$$

حال با توجه به (۳۲) و (۳۰) داریم:

$$(34) \quad R_b = \frac{R_{b_1} R_{b_2}}{R_{b_1} + R_{b_2}} = R_{b_1} \parallel R_{b_2}$$

رابطه اخیر را حتماً حفظ و به یاد داشته باشید چرا که همواره در تحلیل یک مدار تقویت کننده معمولی به آن نیاز دارید و یک دانشجوی معمولی حداقل باید بداند که مدار بایاس بیس یک ترانزیستور در شکل زیر (شکل ۳۲) دارای چنین معادلی است و این مسئله را یک بار برای همیشه به دست آورده ایم و همواره از آن استفاده می‌کنیم.



شکل ۳۲: مدار تقویت کننده ساده با مدار تقسیم کننده ولتاژ برای بیس جهت جلوگیری از استفاده دو باتری(ورانش گرمایی)، ب- مدار معادل آن

در شکل ۳۲-ب می‌دانیم که:

$$(30) \quad V_{BB} = \frac{R_{b_2}}{R_{b_1} + R_{b_2}} V_{CC}$$

$$(34) \quad R_b = R_{b_1} \parallel R_{b_2} = \frac{R_{b_1} R_{b_2}}{R_{b_1} + R_{b_2}}$$

و حال با دانستن این موضوع و یاد گرفتن اینکه چگونه مدار شکل ۲۱ را حل کردیم و خط بار DC و نقطه کار آن را به دست آوردیم؛ می‌توانیم به راحتی خط بار و نقطه کار DC مدار شکل ۳۲ را نیز با توجه به روابط (۳۰) و (۳۴) و یک جایگزینی ساده به دست آوریم که به عنوان تمرین رها می‌شود.

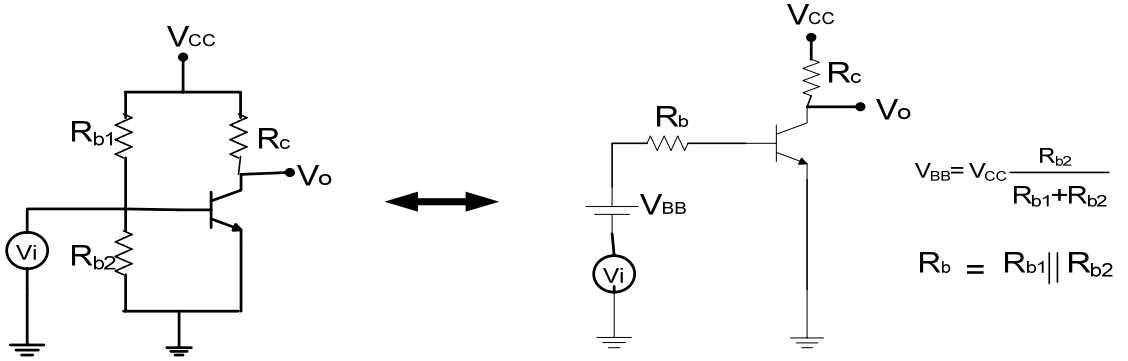
تحلیل ac مدار:

تا به حال صحبتی از سیگنالهای ac در بحث به میان نیامد. می دانیم که هدف اصلی در طراحی تقویت کننده، تقویت سیگنالهای ac بوده و به همین دلیل باید مدار را با سیگنالهای ac نیز ترکیب کنیم تا بتوانیم در خروجی مدار سیگنال تقویت‌شده‌ای به همان شکل به دست آوریم.

طبیعتاً با وارد شدن سیگنالهای ac بررسی مدار گسترده تر می‌شود و همان طور که در تحلیل DC مدار را از نظر نقطه کار و خط بار بررسی کردیم در اینجا نیز علاوه بر تحلیل DC باید یک تحلیل ac نیز انجام دهیم و همچنین نقطه کار و خط بار ac را نیز تعیین کنیم و در آخر بهترین نقطه کار را نیز تعیین کنیم.

نقطه کار و خط بار ac:

بدین منظور و با توجه به توضیحات بالا؛ هدف این بخش بررسی مدار از نظر سیگنال می‌باشد. بنابراین به مداری که در بخش پیش آن را بررسی کردیم یک منبع سیگنال هم اضافه می‌کنیم. طبیعتاً این منبع در ورودی مدار یعنی بیس ترانزیستور تعبیه خواهد شد.



شکل ۳۳- الف: مدار تقویت کننده با ورودی V_i ، ب: مدار معادل تونن آن

حال با توجه به تغییراتی که به مدار اضافه کردیم می‌خواهیم خط بارهای $DC\ ,\ ac$ را به دست آوریم.

توجه داریم که هر یک از بررسیها (ac یا DC) به طور مستقل از دیگری صورت می‌گیرد و در تحلیل هر کدام طوری با مدار رفتار می‌کنیم که گویی فقط همان منبع به مدار وصل و دیگری صفر است . مثلاً در تحلیل ac تمام منابع تغذیه DC را صفر می‌کنیم یا به عبارتی مدار را از نقطه نظر سیگنال نگاه می‌کنیم پس با توجه به این نکته در تحلیل ac؛ $V_{BB}\ ,$ V_{CC} هر دو صفر می‌شوند. این موضوع را قبلاً در تحلیلDC نیز به کار می‌بردیم با این تفاوت که در آنجا منبع ac را صفر می‌کردیم ولی چون در بحث گذشته منبع ac در مدار وجود نداشت پس این موضوع اصلاً مطرح نمی‌شد.

حال به مدار شکل ۳۳ بازمی‌گردیم. با توجه به معادل تونن آن (شکل ۳۳-ب) جریان بیس از دو مولفه $DC\ ,\ ac$ تشکیل شده است.

یعنی:

$$i_B = I_{BQ} + i_b \quad (35)$$

در رابطه بالا I_{BQ} به معنای جریان DC بیس در نقطه کار Q است و i_b جریان ac گذرنده از بیس می‌باشد. (توجه داریم که مولفه های ac را با حروف کوچک و DC را با حروف بزرگ نمایش می‌دهیم)

همین رابطه را از نقطه نظر کلکتور نیز می‌توان نوشت:

$$i_C = I_{CQ} + i_c \quad (36)$$

که در آن I_{CQ}جریان DC گذرنده از کلکتور در نقطه کار Q است و i_c مولفه ac گذرنده از کلکتور می‌باشد.

در مورد ولتاژ هم میتوان دو مولفه $DC\ ,\ ac$ را به صورت زیر تعریف کرد. اگر KVL را برای حلقه کلکتور- امیتر بنویسیم خواهیم داشت:

$$V_{CC} - R_C i_C - v_{CE} = 0 \quad (37)$$

یا

$$v_{CE} = V_{CC} - R_C i_C$$

با توجه به رابطه (۳۶) داریم:

$$v_{CE} = V_{CC} - R_C (I_{CQ} + i_C) \quad (38)$$

حال می دانیم که V_{CE} نیز به نوبه خود دارای دو مولفه DC , ac است پس:

$$v_{CE} = V_{CEQ} + v_{ce} \quad (39)$$

که در آن V_{CEQ} ولتاژ کلکتور- بیس در نقطه کار Q می‌باشد و v_{ce} ولتاژ ac کلکتور- امیتر است.

حال با جایگذاری این رابطه در (۳۸) داریم:

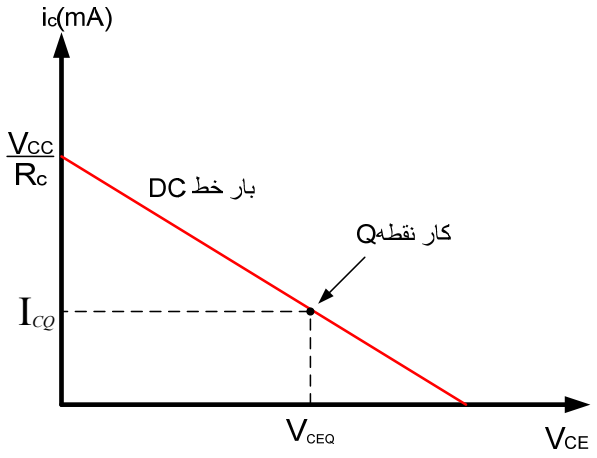
$$V_{CEQ}+v_{ce}=V_{CC}-R_cI_{CQ}-R_Ci_c \quad (40)$$

رابطه بالا را می‌توان از جمع دو رابطه زیر به دست آورد. پس:

$$\begin{cases} V_{CEQ}=V_{CC}-R_CI_{CQ} & (1) \\ v_{ce}=-R_ci_c & (2) \end{cases} \quad (41)$$

در این دو رابطه اخیر رابطه (۱) در حقیقت ولتاژ DC بین کلکتور و امیتر در نقطه کار Q است و رابطه (۲) ولتاژ ac بین کلکتور و امیتر را نشان می‌دهد که کاملاً گویای این مطلب نیز هست که ولتاژ کلکتور- امیتر نسبت به جریان، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارد. (علامت منفی)

یک بار دیگر به رابطه ۴۰ بازمی‌گردیم و با توجه به نمودار شکل ۳۴ که نقطه کار Q دلخواهی را روی آن انتخاب کردیم؛ می‌خواهیم نشان دهیم که رابطه (۲)-۴۰ بیانگر این است که در تحلیل ac یا به اصطلاح از دید سیگنال ولتاژهای DC؛ زمین می‌شوند (صفر می‌شوند).



شکل ۳۴-نقطه کار دلخواه Q روی خط بار DC

معادله خط بار DC را از قبل می‌دانیم.

$$V_{CE} = V_{CC} - i_C R_C \quad (42)$$

حال اگر فرض کنیم که نقطه دلخواه V_{CEQ} کسری از V_{CC} است. یعنی:

$$V_{CE} = V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{a} \quad (43)$$

که در آن a یک ثابت است در آن صورت با توجه به (۴۲) برای نقطه دلخواه I_{CQ} به دست می‌آوریم.

$$i_C = I_{CQ} = (1 - \frac{1}{a})\frac{V_{CC}}{R_C} \quad (44)$$

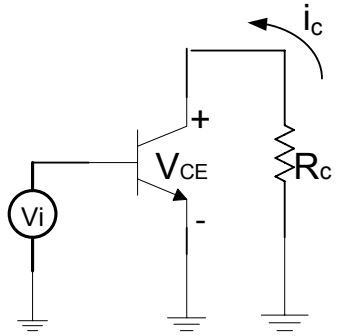
حال اگر (۴۳) و (۴۴) را در رابطه کلی یعنی رابطه ۴۰ قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\frac{V_{CC}}{a} + v_{ce} = V_{CC} - R_C(1 - \frac{1}{a})\frac{V_{CC}}{R_C} - R_C i_C \quad (45)$$

که با ساده کردن معادله بالا به معادله زیر می‌رسیم:

$$v_{ce} = -R_C i_c \quad (46)$$

که همان معادله (۲)-۴۰ می‌باشد و بیان می دارد که ولتاژهای DC زمین‌اند. حال که این مطلب روشن شد؛ مدار معادل سیگنال را برای شکل ۳۳ رسم می‌کنیم.



شکل ۳۵-مدار معادل سیگنال *ac*

که شکل گویای این مطلب است که:

$$v_{ce} = -R_C i_c$$

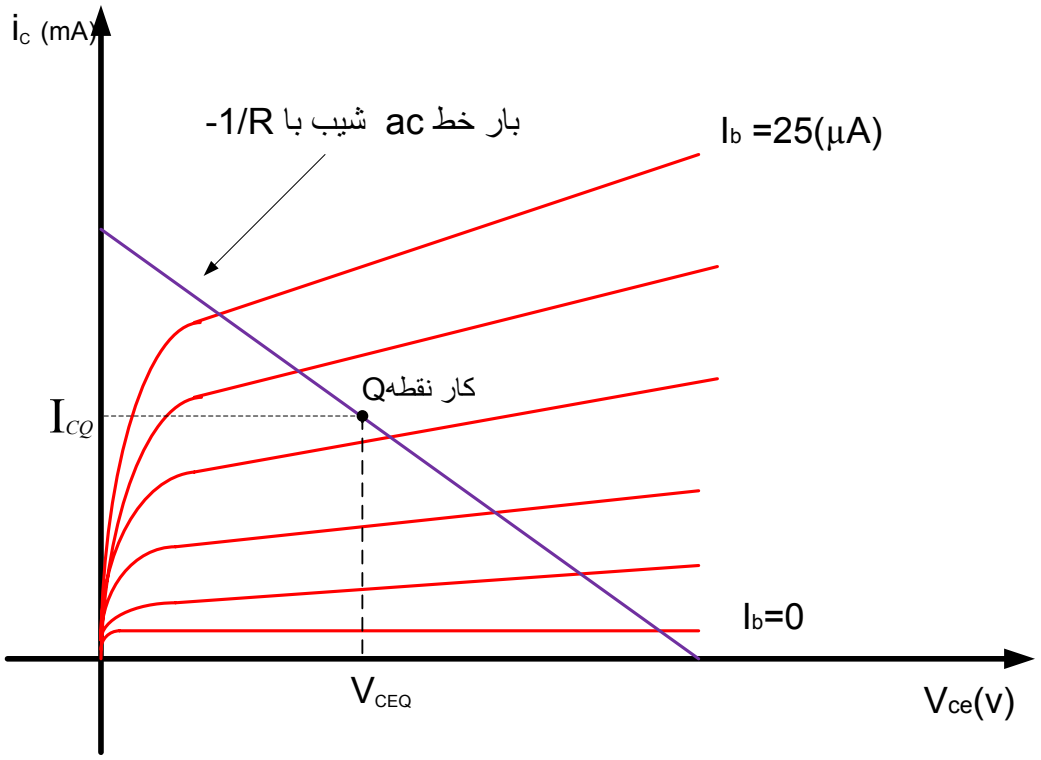
معادله بالا در اصل معادله ac مدار است که اگر بخواهیم آن را در مختصات منحنی مشخصه یعنی (i_C, v_{CE}) نمایش دهیم لازم است که با توجه به روابط (۳۶) و (۳۹) معادله بالا را بازنویسی کنیم.

$$\begin{cases} (36) \quad i_c = i_C - I_{CQ} \\ (39) \quad v_{ce} = v_{CE} - V_{CEQ} \end{cases}$$

$$(47) \quad v_{CE} - V_{CEQ} = -R_C (i_C - I_{CQ})$$

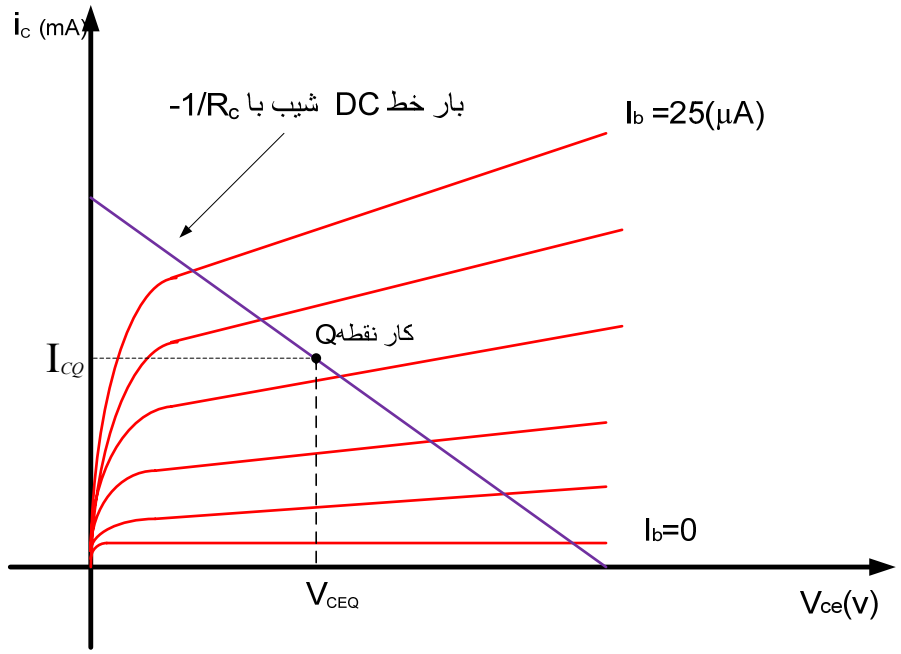
که معادله (۴۷) نمایش خط بار ac در مختصات منحنی مشخصه است.

این رابطه بیان می‌کند که شیب خط بار ac برابر با $(-\frac{1}{R_c})$ است و این خط از نقطه Q می گذرد یعنی اگر آن را رسم کنیم داریم:



شکل ۳۶: نمایش خط بار **ac** روی منحنی مشخصه

حال این خط را با خط بار DC به دست آمده از معادله (۱۷) در شکل ۲۵ مقایسه می‌کنیم:



شکل ۳۷: خط بار ***DC*** نشان داده شده در شکل ۲۵

مشاهده می‌کنیم که خط بار DC , ac دارای شیب یکسان $-\frac{1}{R_C}$ هستند و هر دو از نقطه Q می‌گذرند پس خط بار DC , ac این مداربر روی هم منطبق می‌شود.

حال این سوال مطرح می‌شود که آیا همیشه خط بار DC , ac بر هم منطبق‌اند؟
در جواب این سؤال باید گفت خیر. و در ادامه با توجه به اینکه مدارهای عملی را مورد بررسی قرار می‌دهیم خواهیم دید که در یک مدار کاربردی، که دارای قطعات بیشتری از جمله خازن و مقاومتهای بیشتری هستند این دو خط DC , ac بر هم منطبق نیستند و آن هم به دلیل اضافه کردن قطعات به مدار جهت استیبل کردن و کارکرد صحیح مدار است. مدار گفته شده در بالا تقریباً کاربرد عملی کمی دارد از این رو بخصوص در جریانهای ac مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

تکمیل مدار تقویت کننده ساده و استیبل نمودن آن:

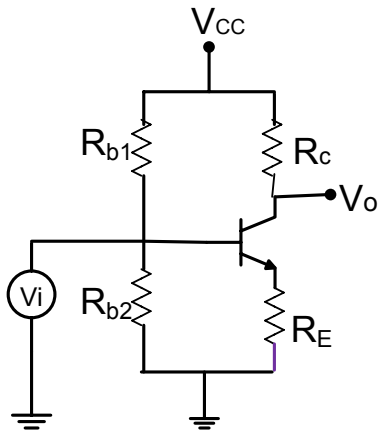
۱-*جلوگیری از رانش حرارتی*:

تقریباً هر نوع افزایش یا کاهش جریان در کلکتور فعالیت ترانزیستور یا به عبارتی نقطه کار آن را تغییر می‌دهد که این امر به دلیل افزایش دمای ترانزیستور در اثر توان مصرفی خود آن است.

از طرفی هم می دانیم که ولتاژ دو سر تمام دیودهای معمولی در اثر تغییر دما تغییر می‌کند (حدود ۲ میلی ولت بر درجه سانتیگراد برای دیود Si).

حال با توجه به این موضوع چون که ترانزیستور نیز پیوندهای دیود گونه ای دارد از این قاعده مستثنی نیست و باید به نحوی جریان آن را به خصوص جریان کلکتور را کنترل کرد.

یکی از رایج ترین این راهها استفاده از مقاومت امیتر یا R_E می‌باشد که در شکل ۳۸ رسم شده است.



شکل ۳۸: مقاومت امیتر جهت جلوگیری از رانش حرارتی

اساس کار آن بدین صورت است که اگر با افزایش دما، جریان کلکتور زیاد شود به دنبال آن جریان امیتر $(i_E = i_C+i_B)$ نیز افزایش می یابد و در نتیجه افت ولتاژ دو سر R_E زیاد خواهد شد که در نتیجه آن اختلاف ولتاژ پیوند بیس - امیتر کاهش یافته و در نهایت جریان کمتری از بیس خواهد گذشت بدین ترتیب تا حد زیادی جلوی افزایش بی رویه جریان کلکتور و تغییر نقطه کار گرفته می‌شود.

این کار علاوه بر مزایای ذکر شده دارای عیبی نیز می‌باشد و آن اینکه چون جریان بیس کاهش پیدا می‌کند، جریان کلکتور نیز به دنبال آن بسیار کاهش پیدا می‌کند زیرا $i_C = \beta i_B$ بنابراین ترانزیستور تا حدی در تقویت سیگنال ضعیف عمل می‌کند. از طرفی هم وجود مقاومت R_E الزامی است پس چه باید کرد؟

یکی از راههایی که به ذهن خطور می‌کند این است که: اگر قرار است از طریق ترانزیستور سیگنالهای ac تقویت پیدا کنند پس باید مسیر خروجی را برای سیگنال ac هموار کنیم یعنی اینکه کاری کنیم که با وجود بودن R_E سیگنال ac این مقاومت را جلوی خود نبیند !

این کار را از طریق یک خازن می‌توان انجام داد. می دانیم که از خازن جریان ac عبور می‌کند در حالی که برای جریان DC امپدانس آن بی نهایت شده به طوری که جریان DC از خازن عبور نخواهد کرد. زیرا:

$$(48) \quad X_C = \frac{1}{C\omega} \quad , \quad \omega \to 0 \Rightarrow X_C \to \infty$$

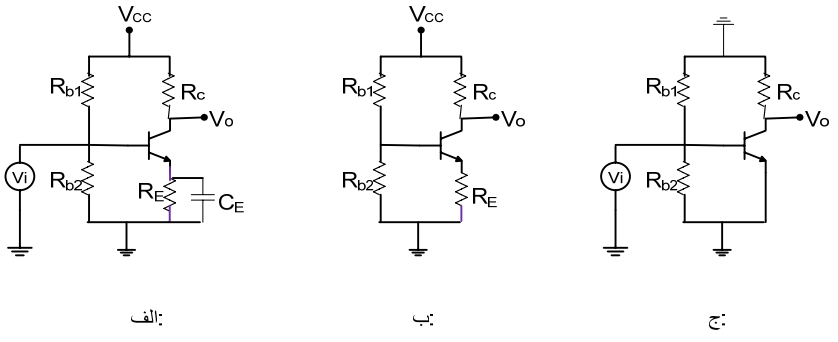
بنابراین؛ قطعه دومی که به مدار اضافه می‌کنیم، جهت افزایش تقویت آن است که نام آن خازن کنارگذر یا خازن بای پس است.

۲)خازن کنارگذر یا بای پس:

با توجه به توضیحات بالا این خازن در کنار R_E نصب می‌شود و امپدانس آن باید طوری انتخاب شود که در فرکانسهای متوسطی که قرار است وارد آن شود اتصال کوتاه باشد به عبارتی در فرکانس متوسط باید داشته باشیم:

$$(49) \quad X_C << R_E$$

در این صورت امیتر مدار از دید ac اتصال کوتاه و از دید DC دارای مقاومت R_E می‌باشد. شکل ۳۹ بیانگر این موضوع است.

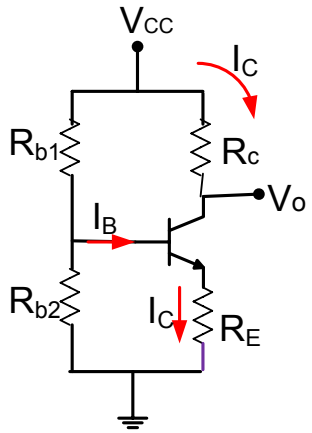


شکل ۳۹: الف: مدار اصلی. ب: مدار از دید *DC* ج: مدار از دید *ac*

حال با توجه به مدار اخیر می‌توانیم پیش‌بینی کنیم که خط بارهای DC , ac باید با هم فرق کنند چرا که مدار برای هر جریان آرایشی مستقل به خود می‌گیرد بنابراین در بخش بعد به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

بررسی DC , ac مدار اصلاح شده با مقاومت و خازن امیتری:

بررسی DC: با توجه به شکل ۳۹-ب داریم:



شکل ۴۰- مدار از دیدگاه DC

که در آن:

$$I_E = I_C + I_B \quad (49)$$

که اگر:

$$I_C = \beta I_B \quad (50)$$

در آن صورت

$$I_E = (\beta + 1) I_B \quad (51)$$

در رابطه اخیر می‌توان از عدد ۱ در مقابل عدد بزرگ β $(\beta > 200)$ صرفنظر کرد و نوشت:

$$I_E = I_B \quad (52)$$

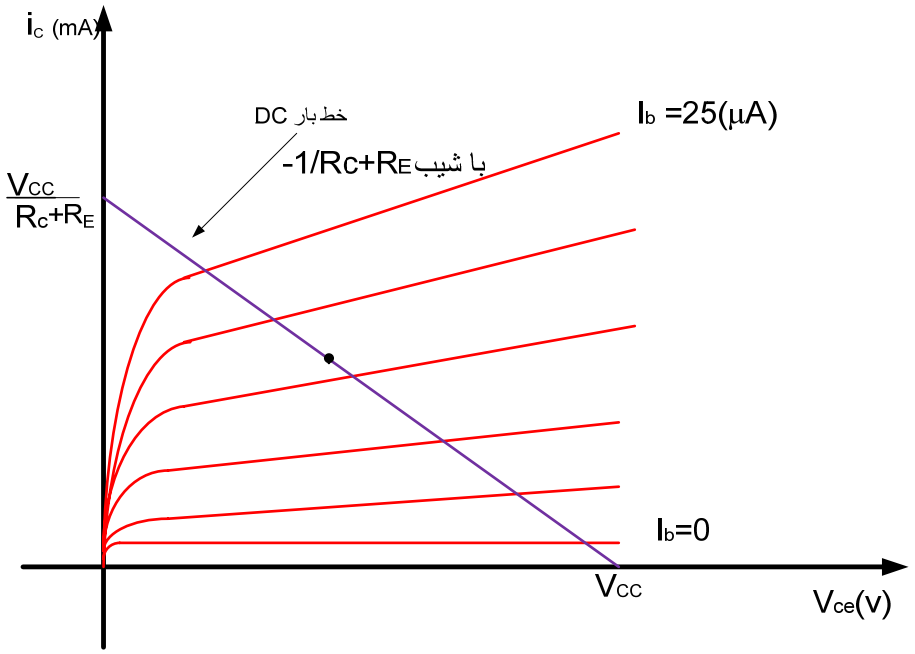
پس می‌توانیم KVL را برای حلقه کلکتور- امیتر بنویسیم:

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E I_C = 0 \quad (53)$$

در نتیجه خط بار DC را می‌توان در منحنی مشخصه رسم کرد.

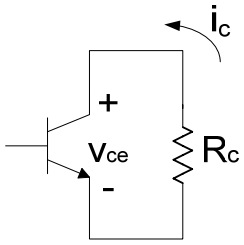
$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \quad (54)$$

و نمودار آن:



شکل ۴۱: خط بار *DC*

بررسی ac**: با توجه به شکل ۳۹-ج و قراردادهای گذشته که منابع** DC **را در بررسی** ac **باید زمین کنیم داریم:**



شکل ۴۲- مدار خروجی از دید *ac*

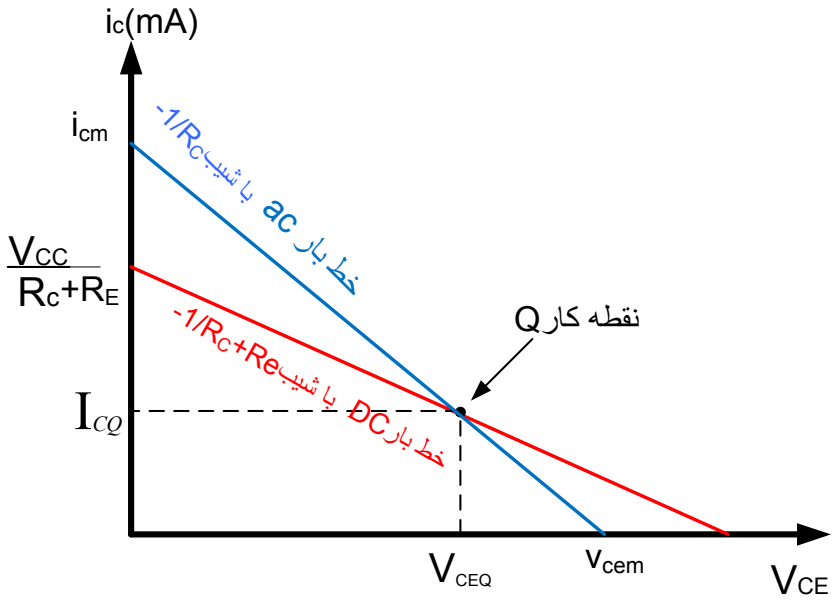
بنابر رابطه ۴۶ یا شکل بالا داریم:

$$v_{ce} = -R_C i_c$$

به عبارتی در مختصات منحنی مشخصه داریم:

$$v_{CE} - V_{CEQ} = -R_c (i_C - I_{CQ})$$

که این معادله را نیز قبلاً به دست آورده ایم معادله (۴۷).
شکل آن را نیز قبلاً رسم کرده ایم. شکل ۳۶:
حال شکل ۳۶ و شکل ۴۱ را در یک مختصات رسم می‌کنیم تا تفاوت خط های DC , ac مدار جدید را ببینیم.

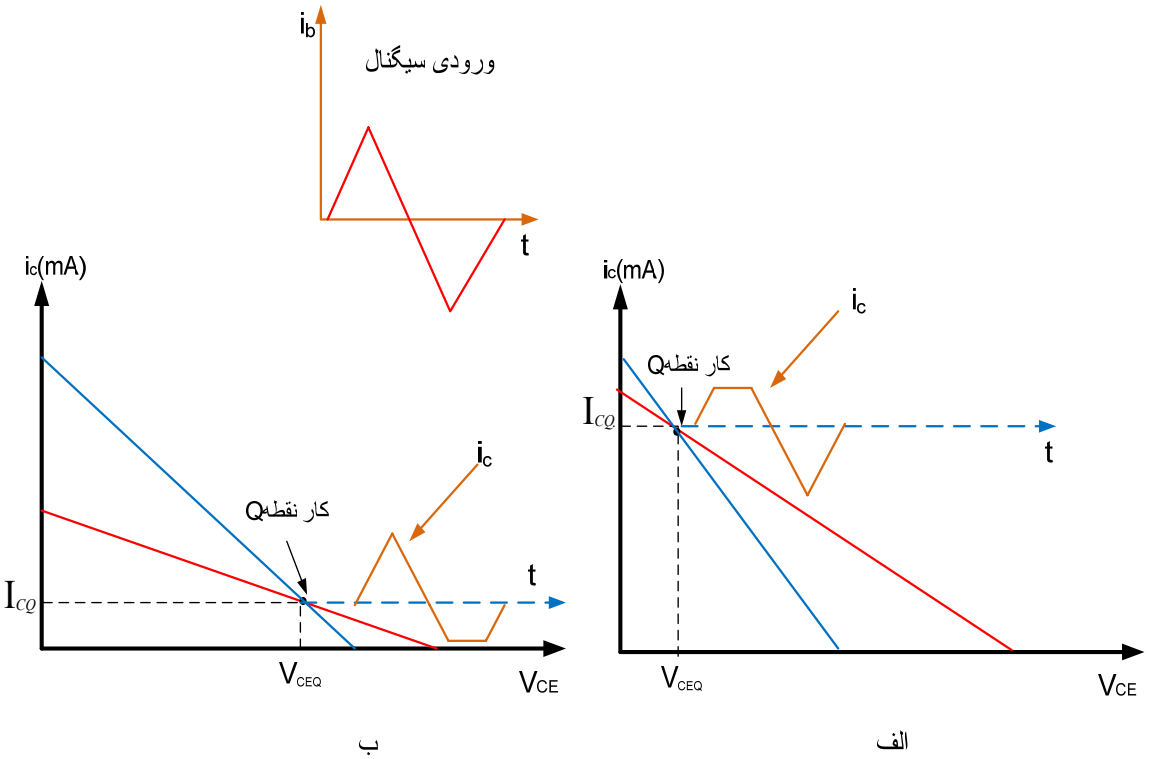


شکل ۴۳: مقایسه خط بار DC , ac به دلیل شلوغی زیاد از منحنی‌های مشخصه صرفنظر شده

طبق معادله ۵۴ و ۵۵ هر دو خط دارای نقطه Q هستند با این وجود که شیب آن دو با هم فرق می‌کند حال این سؤال مطرح است که بهترین نقطه کار کجاست؟.

انتخاب بهترین نقطه کار:

بدین منظور به دو شکل زیر توجه کنید:

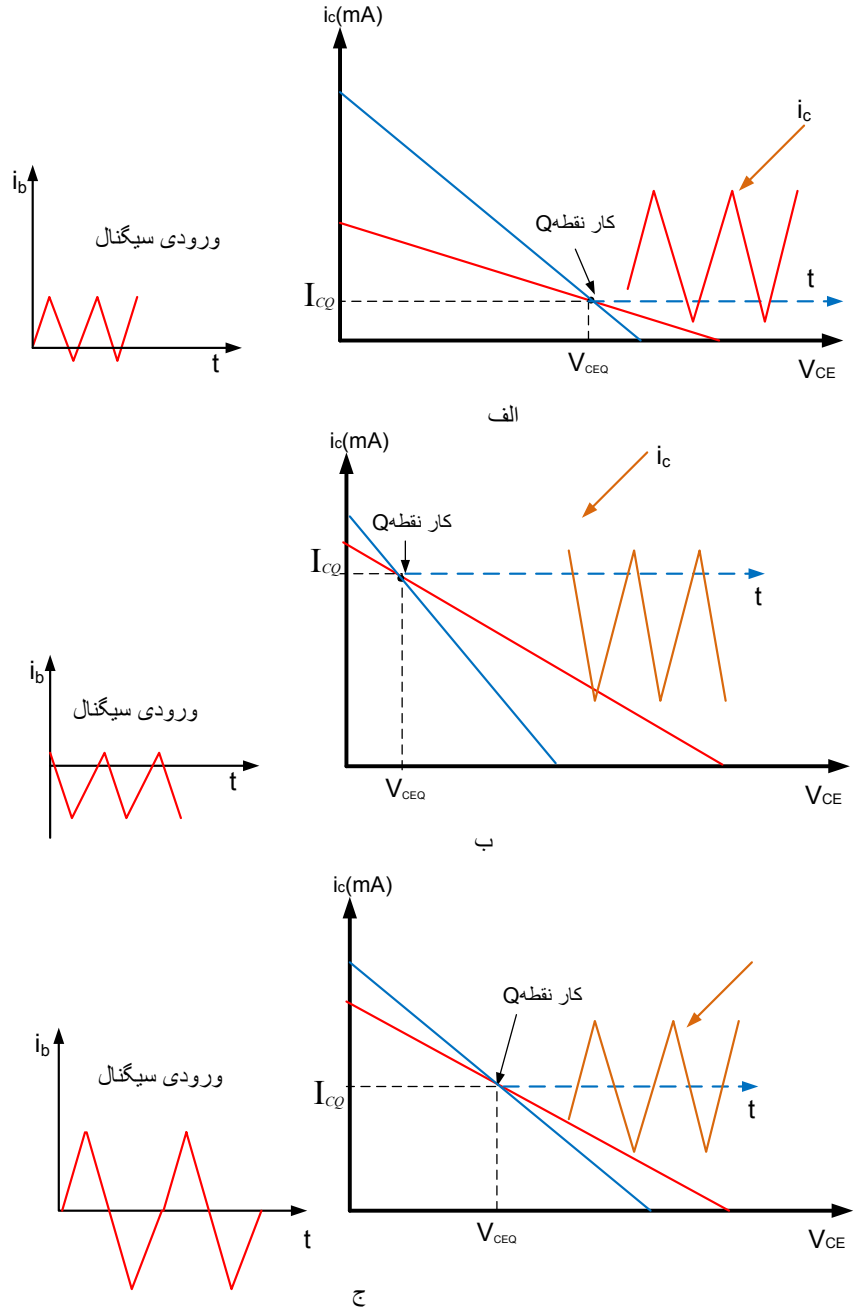


الف: تعیین نقطه کار نامناسب نزدیک ناحیه اشباع

ب: تعیین نقطه کار نامناسب نزدیک ناحیه قطع

شکل ۴۴:

در این دو شکل کاملاً مشخص است که سیگنال خروجی دچار *cut* شده است و شکل موج ورودی در خروجی تغییر کرده است که انتخاب نادرست نقطه کار باعث این امر شده است. پس می‌توان گفت که باید نقطه کار را نه خیلی بالا و نه خیلی پایین انتخاب کرد که البته بسته به نوع سیگنال ورودی می‌توانیم قسمت بالای منحنی یا پایین یا وسط خط بار را تعیین کرد.در شکل ۴۵ انواع نقطه کار آمده است.



الف: موج ورودی تمایل به قسمت + دارد.

ب: موج ورودی متمایل به منفی است.

ج: موج ورودی متقارن است.

شکل ۴۵: انواع نقطه کار

به عنوان مثال: شکل ۴۵-ج را در نظر می گیریم و می‌خواهیم نقطه کار این شکل را (I_{CQ}, V_{CEQ}) پیدا کنیم. اکثر کاربردها هم به این صورت‌اند و چون شکل موج ورودی (ج-۴۵) متقارن است پس بهترین نقطه کار جایی درست در وسط خط بار ac است (چرا ac؟) بدین منظور:

داریم:

$$I_{CQ} = \frac{1}{2} i_{cm} \qquad (1) \tag{56}$$

$$V_{CEQ} = \frac{1}{2} v_{CEm} \qquad (2)$$

که در آنها i_{cm} , V_{CEm} به ترتیب جریان کلکتور ماکزیمم و ولتاژ کلکتور امیتر ماکسیمم است که با توجه به فرضهای (۵۶) می‌توانیم بنویسیم:

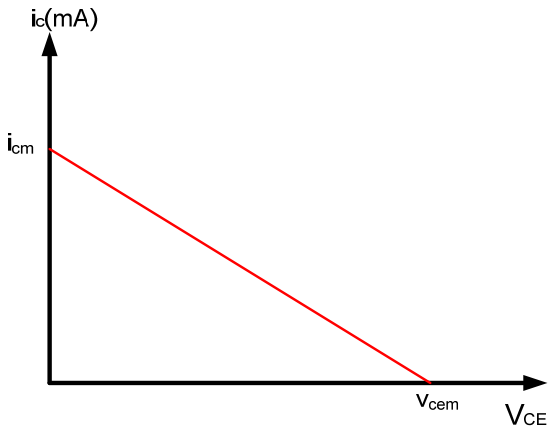
$$i_{cm} = 2I_{CQ} \tag{57}$$

که در این حالت نقطه متناظر با I_{CQ} برای V_{CE} معادل صفر است.

یعنی:

$$if \qquad i_{cm} = 2I_{CQ} \Rightarrow v_{CE} = 0 \tag{58}$$

این موضوع از روی نمودار با توجه به منفی بودن شیب خط بار کاملاً واضح است.



شکل ۴۶- ولتاژ و جریان ماکزیمم

پس با جایگذاری (۵۸) در معادله خط بار ac می رسیم به:

$$o - V_{CEQ} = -R_C(2I_{CQ} - I_{CQ}) \quad (59)$$
$$\Rightarrow V_{CEQ} = R_C I_{CQ}$$

حال چون نقطه کار الزاماً بر روی خط بار DC نیز قرار دارد پس:

این نقطه باید در معادله DC نیز صدق کند. یعنی:

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_{CQ} \quad (60)$$

این معادله خط بار DC برای مدار شکل ۳۹ است.

بنابراین با حل معادلات ۵۹ و ۶۰ نقطه کار مطلوب که وسط خط بار ac است یافت می‌شود.

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_C + R_E} \quad (61)$$

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}R_C}{2R_C + R_E}$$

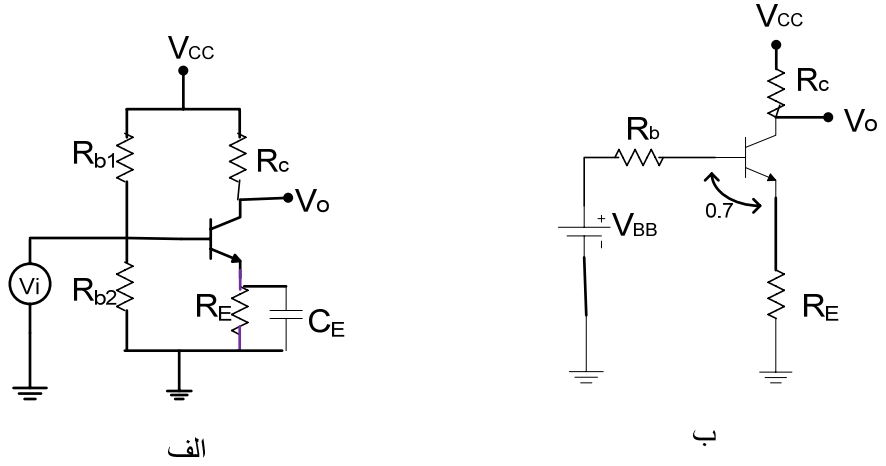
حال با توجه به مختصات یافت شده باید ترانزیستور بایاس شود که بایاس ترانزیستور در این حالت یعنی اینکه ولتاژ و جریان بیس را تعیین کنیم که در این صورت داریم:

$$i_C = \beta i_B \quad \Rightarrow I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \quad (62)$$

یعنی جریان گذرنده از بیس برای این نقطه کار باید برابر I_{BQ} باشد.

از طرفی اگر KVL را برای معادل تونن بیان شده در بیس (شکل ۴۷) بنویسیم داریم:

$$V_{BB} - R_b I_B - 0.7 - R_E I_E = 0 \quad (63)$$



شکل ۴۷-الف: تقویت کننده ب: معادل تونن بیس

در اینجا فرض می‌کنیم سیگنال ورودی دامنه زیادی ندارد یعنی ترانزیستور را به ازای سیگنال کوچک (در اصطلاح برقی‌ها) بررسی می‌کنیم پس در این صورت V_i تأثیر چندانی در مدار حلقه بیس از نظر نقطه کار ایجاد نمی‌کند. پس معادله ۶۳ را برای V_{BB} به ازای $I_E \cong I_C$ حل می‌کنیم

$$V_{BB} = R_b I_B + R_E I_C + 0.7 \quad (65)$$

و چون $I_C = \beta I_B$ داریم:

$$V_{BB} = (R_b + \beta R_E) I_B + 0.7 \quad (66)$$

حال از معادله (۶۲)؛ I_B را که قرار است برای نقطه Q تنظیم شود جایگزین می‌کنیم: که در این صورت V_{BBQ} به دست می‌آید:

$$V_{BBQ} = (R_b + \beta R_E) I_{BQ} + 0.7 \quad (67)$$

با استفاده از (۶۱) برای I_{BQ} داریم:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC}}{\beta (2R_C + R_E)} \quad (68)$$

بنابراین ولتاژی که باید به بیس اعمال کنیم به راحتی به دست می‌آید:

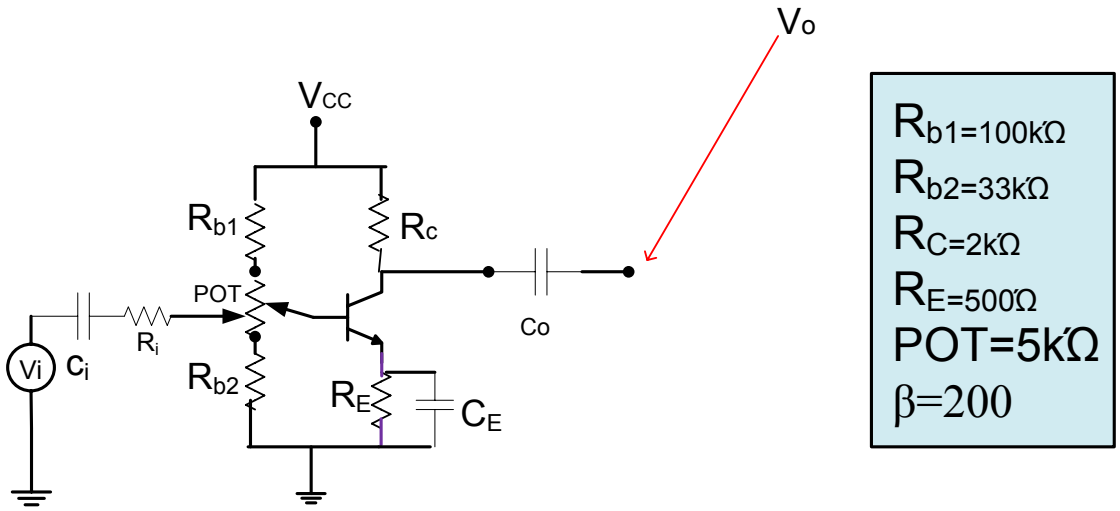
$$V_{BBQ} = (R_b + \beta R_E) \frac{V_{CC}}{\beta (2R_C + R_E)} + 0.7 \quad (69)$$

در معادله ۶۹ تمامی عناصر و مولفه‌ها به جز β دست خود ماست البته β هم به نحوی در اختیار ماست و با عوض کردن شماره ترانزیستور β نیز قابل تغییر است ولی برای یک ترانزیستور خاص با β ثابت و مشخص؛ باید با توجه به دیگر مولفه ها V_{BBQ} را تعیین کرد که در آن می‌توان با تغییر R_E, R_C و V_{CC} یا R_b مقدار آن را تغییر دادولی چونV_{BBQ} مربوط به ولتاژ بیس است بهتر است(وحتی لازم) که با تغییر R_b به تعیین V_{BBQ} بپردازیم.
از این رو نقطه کار به آسانی در حالت استیبل خود قرار می‌گیرد. توجه داریم که در تعیین R_b داریم:

$$R_b = R_{b_1} \| R_{b_2} = \frac{R_{b_1} R_{b_2}}{R_{b_1} + R_{b_2}}$$

که معمولاً بر اساس تجربه بهتراست اول R_{b_1} تعیین شود و سپس از روی آن R_{b_2} .

در اینجا با یک مثال کاربردیِ واقعی بحث مربوط به ترانزیستور و بایاس کردن آن را خاتمه می‌دهیم.



مدار شکل ۴۸: یک تقویت کننده واقعی با ویژگی تعیین نقطه کار دقیق

در این مدار از چند خازن بیشتر و یک POT و مقاومت R_i استفاده شده است.
کلیت مدار واقعاً همان چیزی است که در مدار شکل ۴۷ بررسی کردیم ولی با این تفاوت که برای تعیین نقطه کار به صورت دقیق از یک $POT\ (5k\Omega)$ استفاده شده است که این کار به ما قابلیت این را می‌دهد که R_b را به صورت $continue$ (پیوسته) تغییر دهیم یعنی نقطه کار را دقیقاً تعینی کنیم.
همچنین از دو خازن C_i , C_o استفاده شده که چون خازن از خود؛ جریان DC را عبور نمی دهد پس خیالمان راحت می‌شود که در ورودی فقط سیگنال ac و در خروجی هم فقط سیگنال ac داریم. به این شیوه؛ کوپلاژ خازنی جهت حذف DC گویند که مشابه آن کوپلاژ ترانسفورمری است که به عنوان تمرین داده می‌شود.
مقاومت R_i هم به خاطر اطمینان از کوچک بودن سیگنال ورودی به بیس گذاشته می‌شود که آن هم بسته به دامنه سیگنال ورودی مقدارش به راحتی تعیین می‌شود (معمولاً زیر ۵۰۰Ω است). در ضمن ظرفیت خازنها بر اساس مقدار فرکانس موج ورودی تعیین خواهد شد.

حالا در جایی هستیم که می توانیم یک تقویت کننده ساده تک ترانزیستوری را به راحتی طراحی کنیم. پس مدار شکل ۴۸ را همواره به یاد داشته باشید.
در درسنامه های بعدی سعی میشود با بدست آوردن ضریب تقویت و استفاده از مدار های چند طبقه بحث را ادامه دهیم که ادامه آن با توجه به اینکه مدار تک طبقه را در این درس فرا گرفته باشیم ؛ بسیار آسان است. همچنین مدل های ساده تری را با کمک هیبرید Π (هیبرید پای)که مدلی ریاضی است ؛ بیان می کنیم و ضرایب تقویت جریان و ولتاژ را نیز بدست می آوریم که در بررسی مدارها به کمکمان می آید.