محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

جلسه نهم

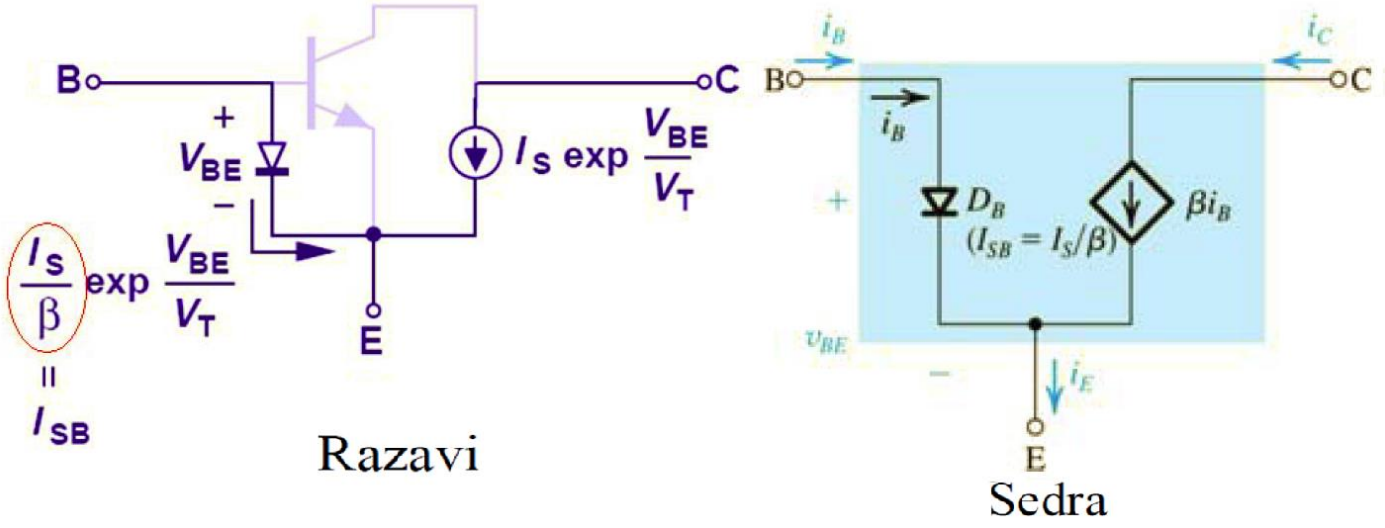
نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

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

برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

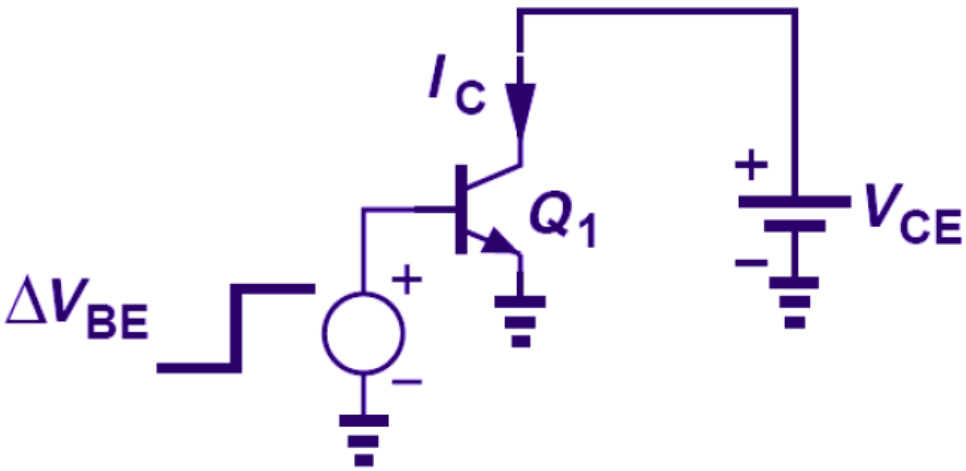
مدل سیگنال بزرگ ترانزیستور

در این مدل یک دیود بین بیس و امیتر قرار دارد. همچنین یک منبع جریان کنترل شده با ولتاژ بین کلکتور و امیتر قرار دارد.



هدایت انتقالی g_m

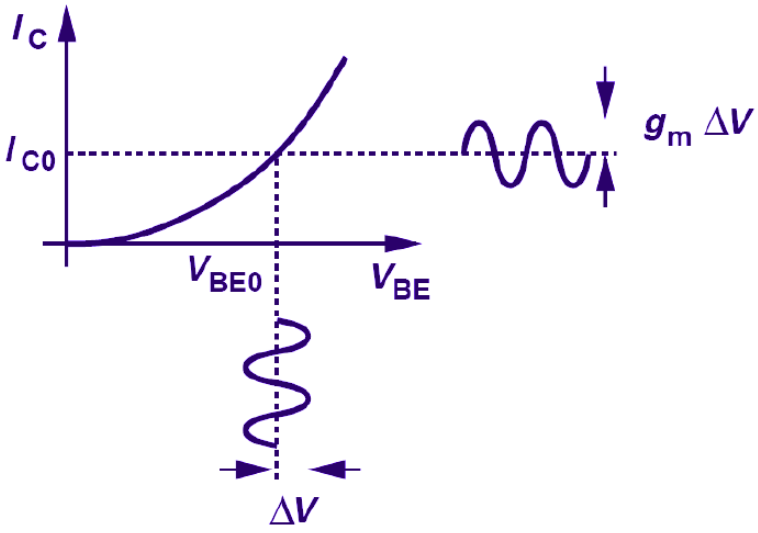
هدایت انتقالی ترانزیستور (g_m) به عنوان یک معیار مطرح است و نشان می دهد که آن ترانزیستور به چه میزان می تواند ولتاژ را به جریان تبدیل کند. g_m یکی از مهمترین پارامترهای ترانزیستور در طراحی مدار است.



$$g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}} \Rightarrow g_m = \frac{d}{dV_{BE}}\left(I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}\right)$$

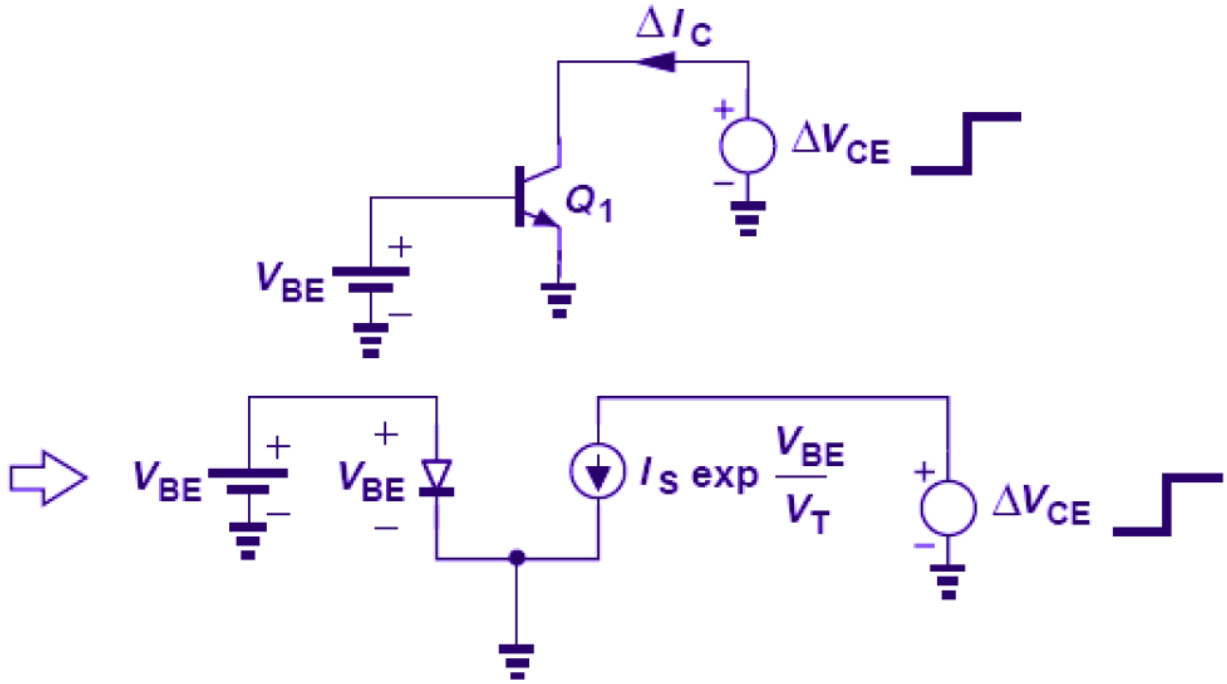
$$g_m = \frac{1}{V_T}\left(I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}\right) \Rightarrow g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

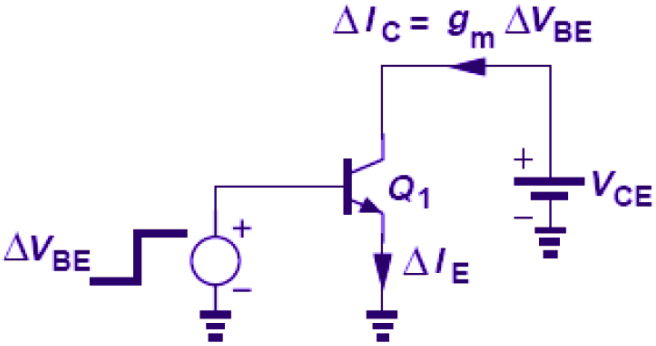
g_m بیانگر شیب منحنی I_C برحسب V_{BE} در نقطه کار ترانزیستور است. هر چه مقدار I_C بیشتر باشد شیب منحنی بیشتر و به تبع آن مقدار g_m بیشتر می شود.

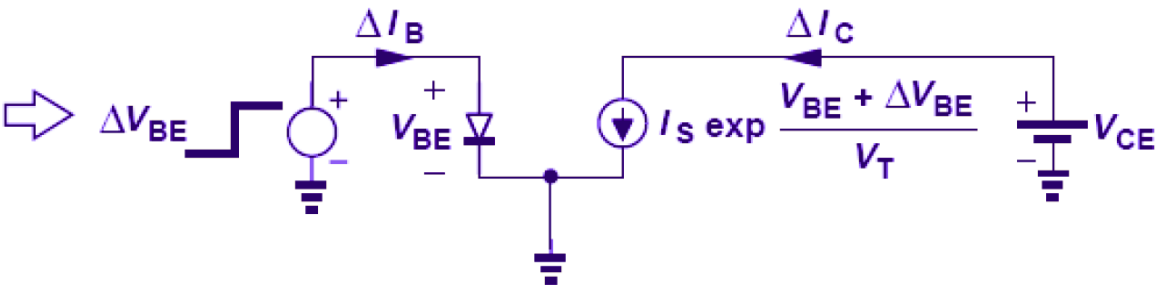


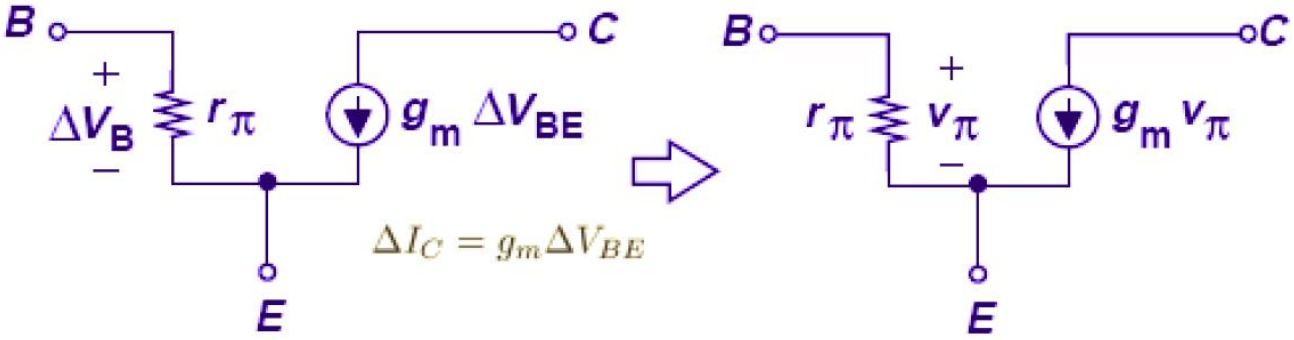
استخراج مدل سیگنال کوچک ترانزیستور

به منظور استخراج مدل سیگنال کوچک ولتاژ یکی از پایه های ترانزیستور را ثابت و ولتاژ پایه دیگر را به اندازه کوچکی تغییر می دهیم، سپس تغییرات جریان را در تمام پایه های ترانزیستور مورد بررسی قرار می دهیم. نهایتا سعی می کنیم این تغییرات را با مقاومت و یا منابع وابسته توصیف کنیم.



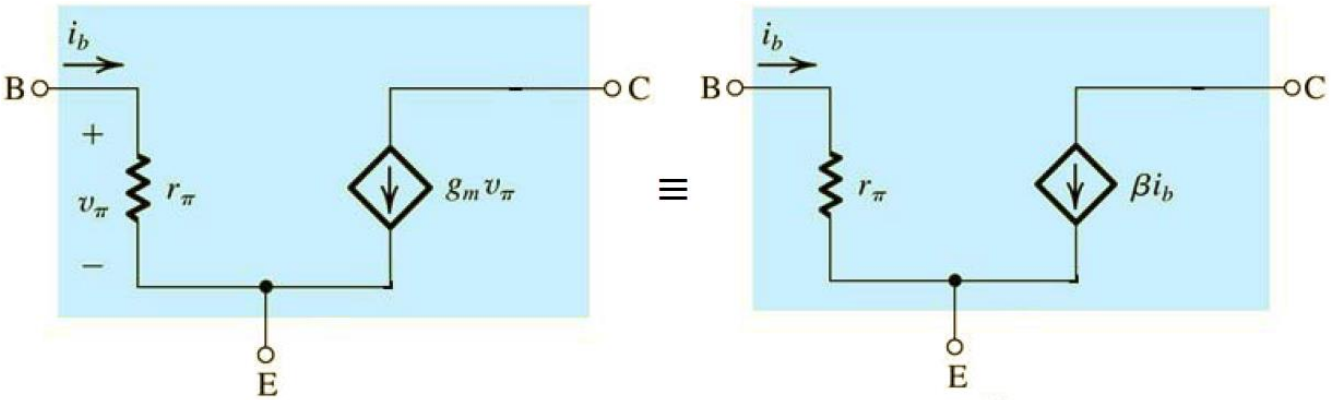






$$\Delta I_B = \frac{\Delta I_C}{\beta} = \frac{g_m \Delta V_{BE}}{\beta}$$

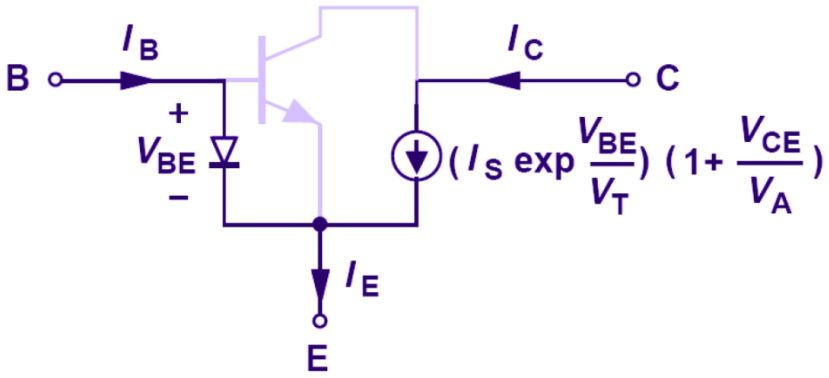
$$\Rightarrow r_\pi = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{\beta}{g_m}$$

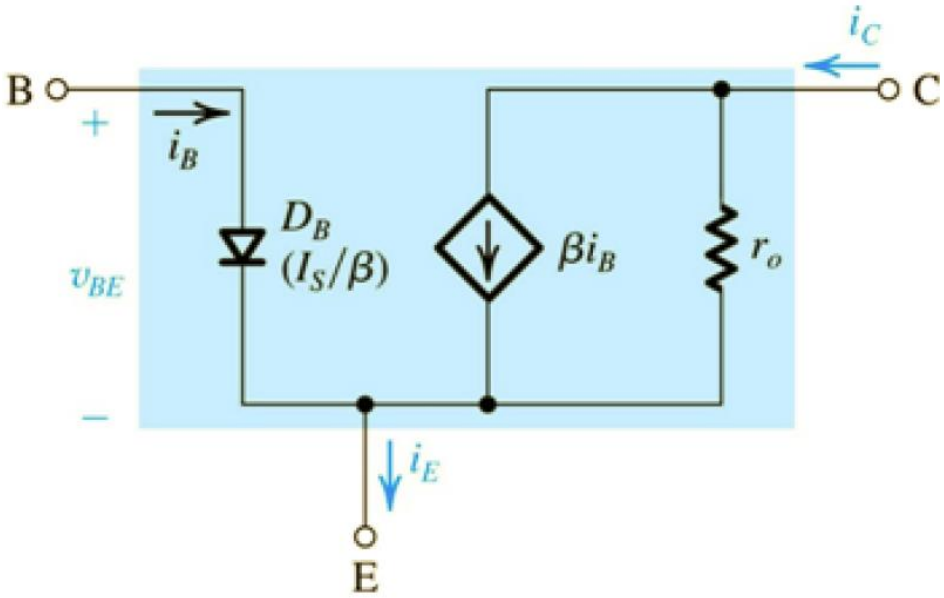


در نتیجه:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad , \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

مدل سیگنال بزرگ با لحاظ اثر ارلی

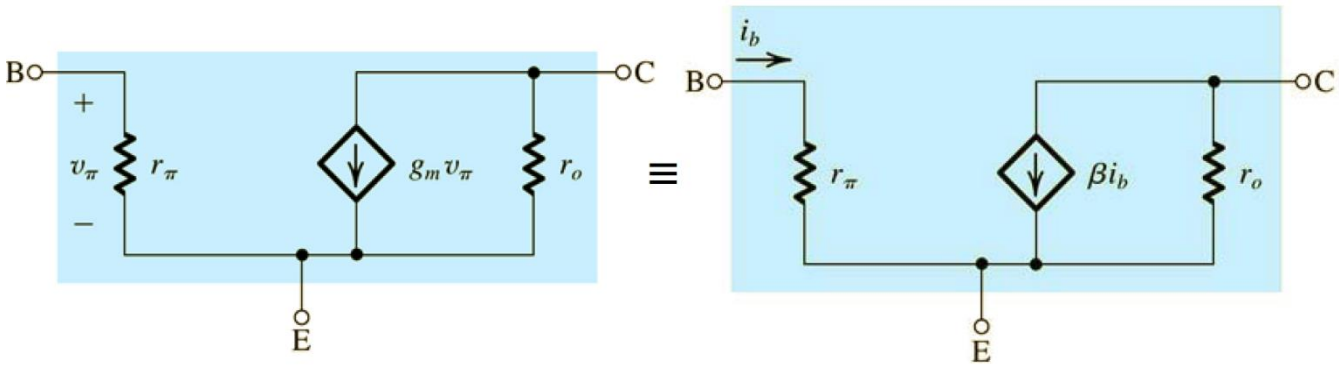




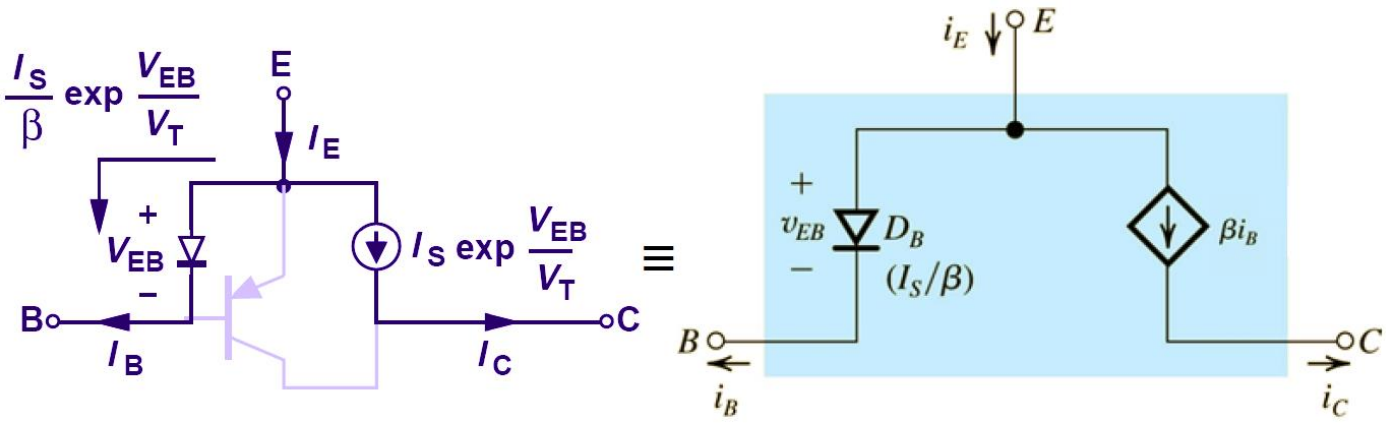
$$\Longrightarrow I_c = I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t} \times \left(1+\frac{V_{CE}}{V_A}\right), I_B = \frac{1}{\beta} I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}, I_E = I_C + I_B$$

$$\Longrightarrow I_c = \beta I_B \times \left(1+\frac{V_{CE}}{V_A}\right) = \beta I_B + \frac{V_{CE}}{\frac{V_A}{\beta I_B}} = \beta I_B + \frac{V_{CE}}{r_o}$$

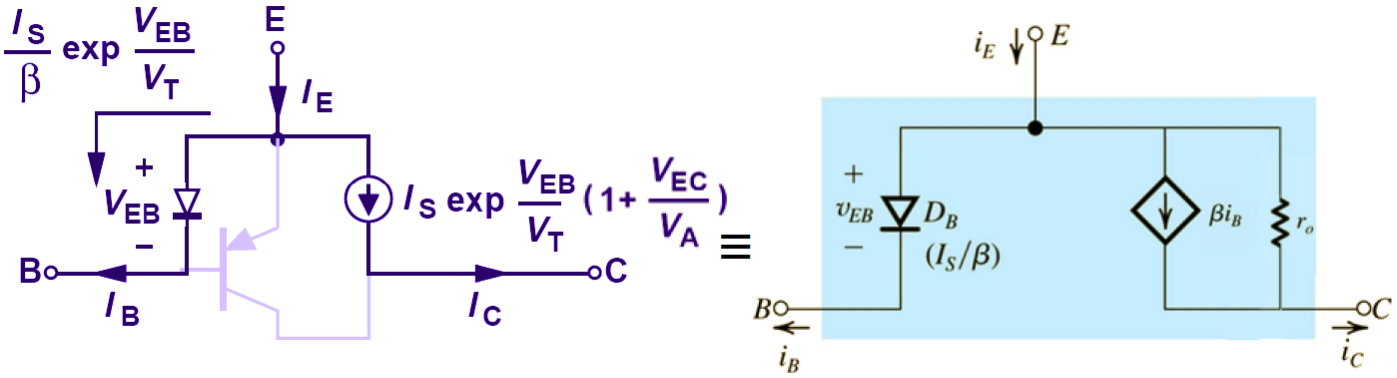
$$r_o \approx \frac{V_A}{\beta I_B} \approx \frac{V_A}{I_C} \xrightarrow{\text{می توان نوشت}} r_o = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \approx \frac{V_A}{I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}} \approx \frac{V_A}{I_C}$$



مدل سیگنال بزرگ ترانزیستور PNP



با در نظر گرفتن اثر ارلی



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

$$\Longrightarrow I_c = \beta I_B \times \left(1+\frac{V_{CE}}{V_A}\right) = \beta I_B + \frac{V_{CE}}{\frac{V_A}{\beta I_B}} = \beta I_B + \frac{V_{CE}}{r_o}$$

$$r_o \approx \frac{V_A}{\beta I_B} \approx \frac{V_A}{I_C} \xrightarrow{\text{می توان نوشت}} r_o = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \approx \frac{V_A}{I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}} \approx \frac{V_A}{I_C}$$

تقویت کننده های ترانزیستوری

یکی از مهمترین کاربردهای ترانزیستور BJT تقویت سیگنال‌های AC با دامنه کوچك است. بدین منظور بایستي ابتدا ترانزیستور در ناحیه هدایت (فعال) قرار گیرد. پس در تحلیل مدارهای ترانزیستوری هر دو مؤلفه DC و AC وجود دارد. بنابراین لازم است که تفکیک های مشخصی برای آن‌ها تدوین گردد.

معمولا از قراردادهای ذیل استفاده می شود :

۱) هر گاه اسم و اندیس یك پارامتر بزرگ نوشته شود، فقط مؤلفه DC را بیان می‌کند.

۲) هر گاه اسم و اندیس یك پارامتر کوچك نوشته شود، فقط مؤلفه AC را بیان می‌کند.

۳) هر گاه اسم و اندیس یك پارامتر به ترتیب کوچك و بزرگ نوشته شوند، هردو مؤلفه DC و AC را بیان می‌کند.

به عبارت دیگر چون مدار خطی است، مجموع دو مؤلفه را نشان می دهد.

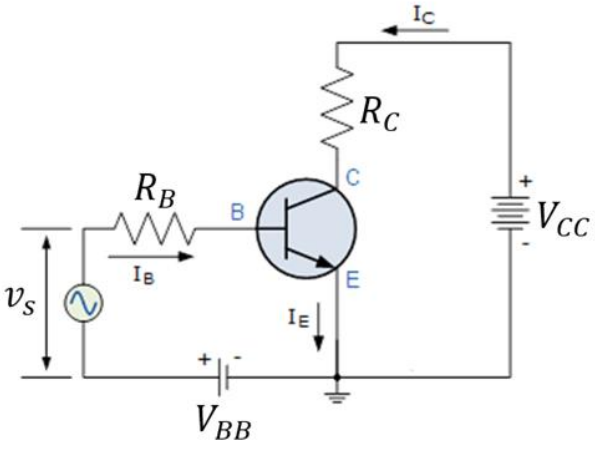
مقادیر DC: $I_C\ ,I_E\ ,I_B\ ,V_{BE}\ ,V_{CE}$

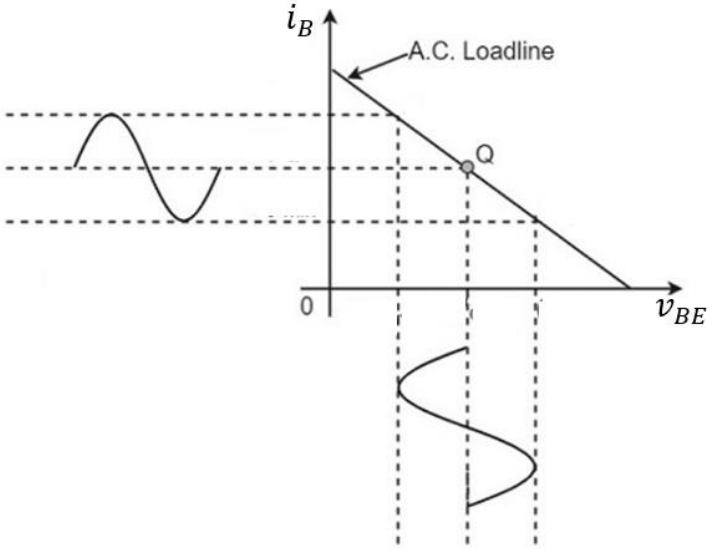
مقادیر AC: $i_c\ ,i_e\ ,i_b\ ,v_{be}\ ,v_{ce}$

مجموع مقادیر DC و AC (مقادیر لحظه‌ای): $i_C\ ,i_E\ ,i_B\ ,v_{BE}\ ,v_{CE}$

معمولا دامنه یك مؤلفه سینوسی را با اسم بزرگ و اندیس کوچك نمایش می‌دهند. $I_b \sin \omega t$

چون هر دو مشخصه ورودی و خروجی ترانزیستور غیر خطی است، برای اینکه بتوان آن را به عنوان عنصر خطی بکار برد، لازم است که سیگنال AC بکار رفته دامنه بسیار کوچکی داشته باشد.

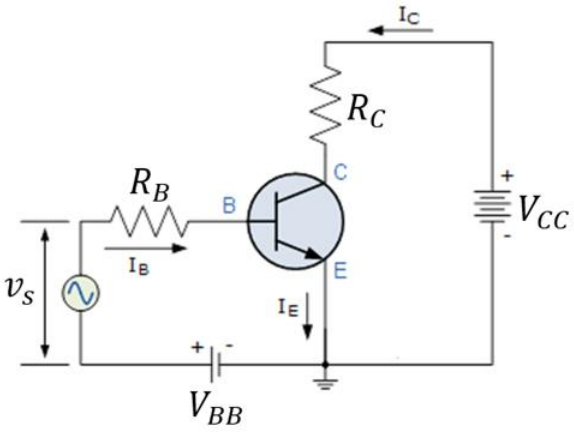


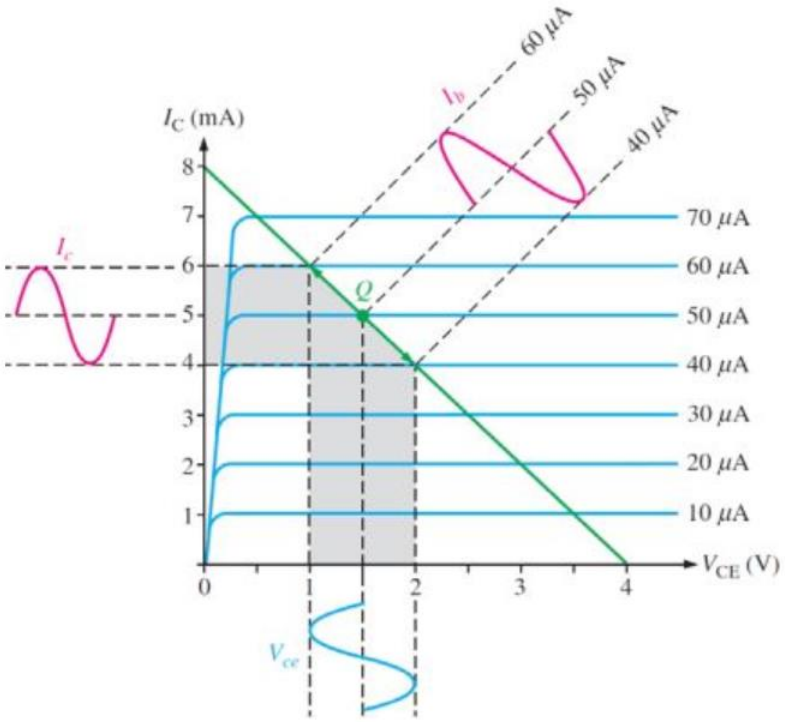


خط بار DC ورودی $$V_{BB} = R_B\ I_B + V_{BE}$$

$$v_s = R_B\ i_b + v_{be}$$

خط بار AC ورودی $$v_s = R_B(i_B - I_B) + (v_{BE} - V_{BE})$$





خط بار DC خروجی $$V_{CC} = R_C\, I_C + V_{CE}$$

منبع AC به خروجی متصل نیست $$0 = R_C\, i_c + v_{ce}$$

خط بار AC خروجی $$0 = R_C(i_c - I_C) + (v_{CE} - V_{CE})$$

نکته: خط بار AC از نقطه کار می‌گذرد. همانطور که مشاهده نمودید، سیگنال کوچك ورودی با دامنه چند میلی ولت به سیگنال بزرگ خروجی در کلکتور با دامنه چند ولت تبدیل می‌شود. پس تقویت سیگنال انجام شده است. چند سؤال در اینجا مطرح می‌شود:

۱) بزرگترین ولتاژی که در خروجی یك تقویت کننده می‌توان بدست آورد، به چه عواملی محدود می‌شود؟

همانطور که در مدار شکل قبل ملاحظه می‌کنید ، ماکزیمم و مینیمم جریان و ولتاژ کلکتور به اشباع و قطع ترانزیستور مربوط می‌شود.

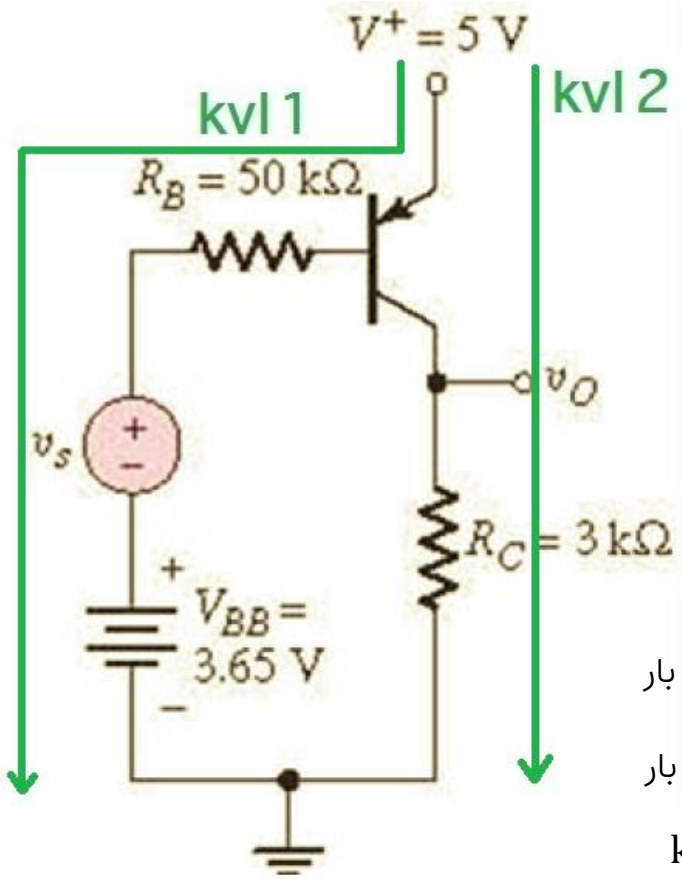
۲) بزرگترین ولتاژی که در خروجی یك تقویت کننده می‌توان بدست آورد، چگونه محاسبه می‌شود؟

هر چقدر نقطه کار به قسمت بالایی خط بار AC نزدیك باشد، ترانزیستور زودتر به اشباع می‌رود و هر چقدر نقطه کار به قسمت پائینی خط بار AC نزدیك باشد، ترانزیستور زودتر به قطع می‌رود، پس محل نقطه کار در میزان ماکزیمم سیگنال خروجی مؤثر است.

عامل مهم دیگر قدر مطلق شیب خط بار AC است. بیشتر بودن این پارامتر سبب می‌شود، ترانزیستور زودتر به قطع برود و کمتر بودن آن باعث دیرتر رفتن به قطع ترانزیستور می‌شود.

با توجه به محل نقطه کار و خط بار AC تعیین می‌شود.

مثال: برای شکل زیر محل نقطه کار ، خط بار AC و شیب خط بار در شرایط $\beta = 80$ و $V_{EB} = 0.7\ v$ و $V_A = \infty$ بدست آورید.



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

$$kvl1: -5 + 0.7 + +50k(I_B) + 3.65 = 0$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{5 - 0.7 - 3.65}{50k} = 13\mu A$$

$$\Rightarrow I_E = (1 + 80)13\mu A = 1.053mA$$

$$\Rightarrow I_{C_Q} = (80)\ 13\mu A = 1.04mA$$

خط بار $\text{kvl2}: -V_{CC} + V_{EC} + R_C(I_C) = 0$

$$\text{kvl2} - 5 + V_{EC} + 3k(I_C) = 0$$

خط بار $\Rightarrow V_{EC} = 0 \rightarrow I_{C_{V_{EC}=0}} = \frac{5}{3k} = 1.66mA$

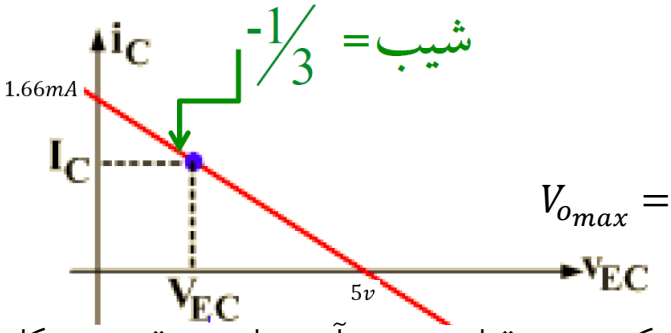
خط بار $\Rightarrow I_C = 0 \rightarrow V_{EC_{I_C=0}} = 5v$

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

$$\text{kvl2}: -5 + V_{EC_Q} + 3k(1.04mA\ ) = 0$$

$$V_{EC_Q} = 5 - 3.12 = 1.88v$$

$$V_{o_{max}} = V_P = V_{EC_Q} = 1.88\ , V_{P-P} = 1.88 \times 2 = 3.76$$



۳) برای بهبود بزرگترین ولتاژی که در خروجی یك تقویت کننده می توان بدست آورد، باید چه تدبیری بکار برد؟ بایستی نقطه کار وسط خط بار AC باشد.

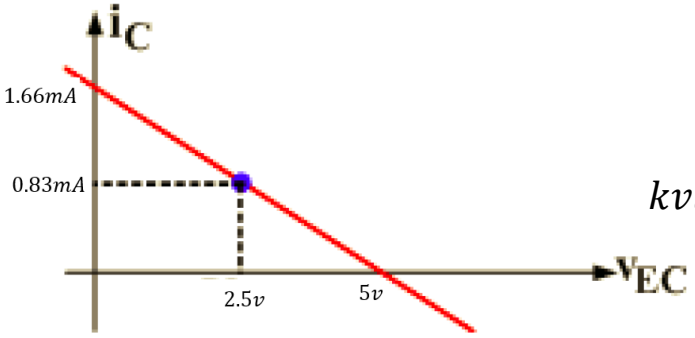
مثال: در مثال قبل مقاومت R_B چقدر باشد تا ماکزیمم سوئینگ متقارن ممکن در خروجی ایجاد گردد؟ در این صورت این ماکزیمم مقدار چقدر است؟

نقطه کار وسط خط بار AC باشد. $\text{kvl2}: -V_{CC} + V_{EC} + R_C(I_C) = 0$

$$\text{kvl2} - 5 + V_{EC} + 3k(I_C) = 0$$

خط بار $\Rightarrow I_C = 0 \rightarrow V_{EC_{I_C=0}} = 5v \Rightarrow$ نقطه کار وسط $\rightarrow \frac{5v}{2} = 2.5v$

$$\text{kvl2} - 5 + 2.5 + 3k(I_C) = 0 \Rightarrow I_C = \frac{2.5}{3k} = 0.83mA$$



$$\rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0.83mA}{80} = 10.37\mu A$$

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

$$kvl1: -5 + 0.7 + +R_B(10.37\mu A) + 3.65 = 0$$

$$\Longrightarrow R_B = \frac{5 - 0.7 - 3.65}{10.37\mu A} = 62.680k\Omega$$

۴) میزان تقویت سیگنال ورودی در هر مدار چگونه محاسبه می‌شود؟

برای پاسخ به این سؤال ، ابتدا باید مدل سیگنال کوچك AC ترانزیستور را ارائه کنیم. چون ترانزیستور را می‌توان بصورت يك شبکه دو دهنه (Two Port) نمایش داد، ابتدا به معرفی این شبکه ها می‌پردازیم.

تحلیل سیگنال کوچک همان تحلیل به ازای ورودی متناوب (تحلیل AC مدار) است. در نخستین گام برای تحلیل سیگنال کوچک مدار:

خازن ها: اتصال کوتاه

سلف ها: اتصال باز

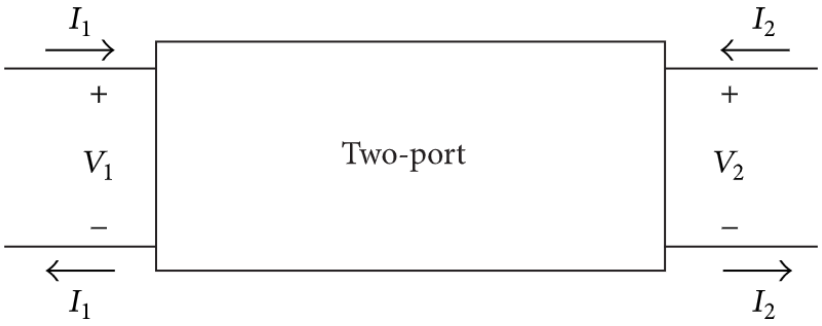
منابع مستقل DC : غیرفعال (منابع جریان: اتصال باز / منابع ولتاژ: اتصال کوتاه)

در گام بعد لازم است که به جای ترانزیستور از یک مدار با عناصر آشنا (منابع جریان و ولتاژ، مقاومت، سلف و خازن) استفاده شود. بدین منظور چند مدل (مدار معادل) وجود دارد که در اینجا به بررسی یکی از مدل ها (مدل هایبرید) بسنده می نماییم.

شبکه دو دهنه (Two Port):

در این شبکه دو پارامتر را بر حسب دوتای دیگر بیان می‌کنند.

فرم ترکیبی Hybrid:



$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \begin{cases} h_{11} = \left.\frac{V_1}{I_1}\right|_{V_2=0} , & h_{12} = \left.\frac{V_1}{V_2}\right|_{I_1=0} \\ h_{21} = \left.\frac{I_2}{I_1}\right|_{V_2=0} , & h_{22} = \left.\frac{I_2}{V_2}\right|_{I_1=0} \end{cases}$$

h_{11} را مقاومت ورودی در حالتی که خروجی اتصال کوتاه است، گویند. $h_{11} = h_i$

h_{12} را بهره ولتاژ معکوس در حالتی که ورودی باز است، گویند. $h_{12} = h_r$

h_{21} را بهره جریان مستقیم وقتی که خروجی اتصال کوتاه است، گویند. $h_{21} = h_f$

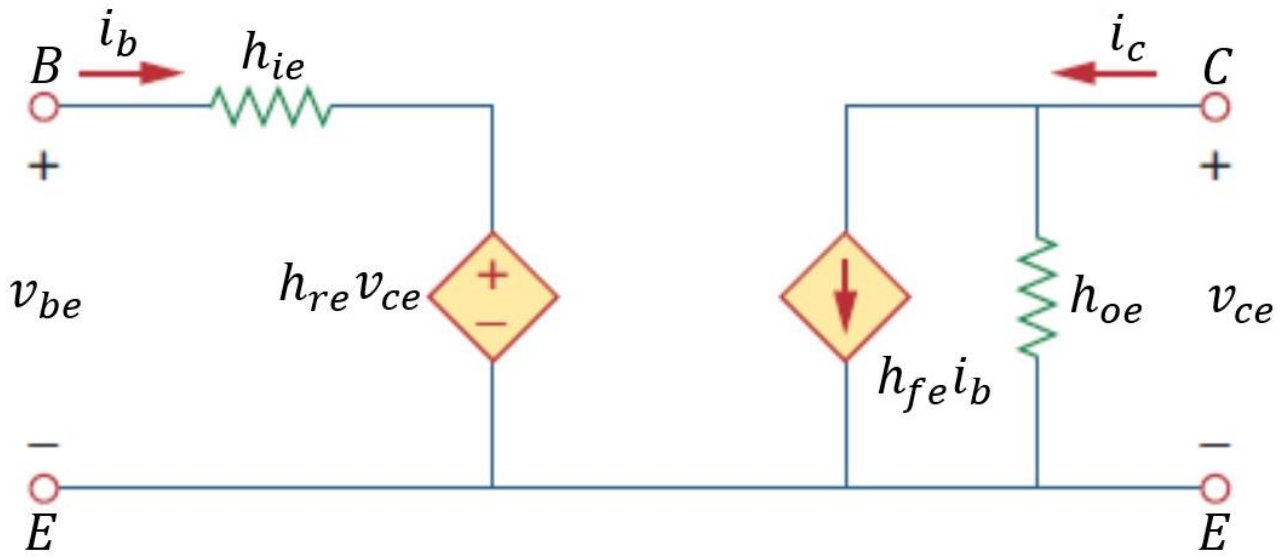
h_{22} را رسانایی خروجی در حالتی که ورودی باز است، گویند. $h_{22} = h_o$

همانطور که در مورد منحنی مشخصه ترانزیستور گفته شد، نمایش مدل سیگنال کوچك AC ترانزیستور نیز بستگی به این دارد که کدام ترمینال (پایه) را به عنوان مرجع (مشترك) بکار ببریم.

حرف β را برای بهره DC به کار می‌برند در جریان متناوب بهره جریان را با h_f نمایش می‌دهند.

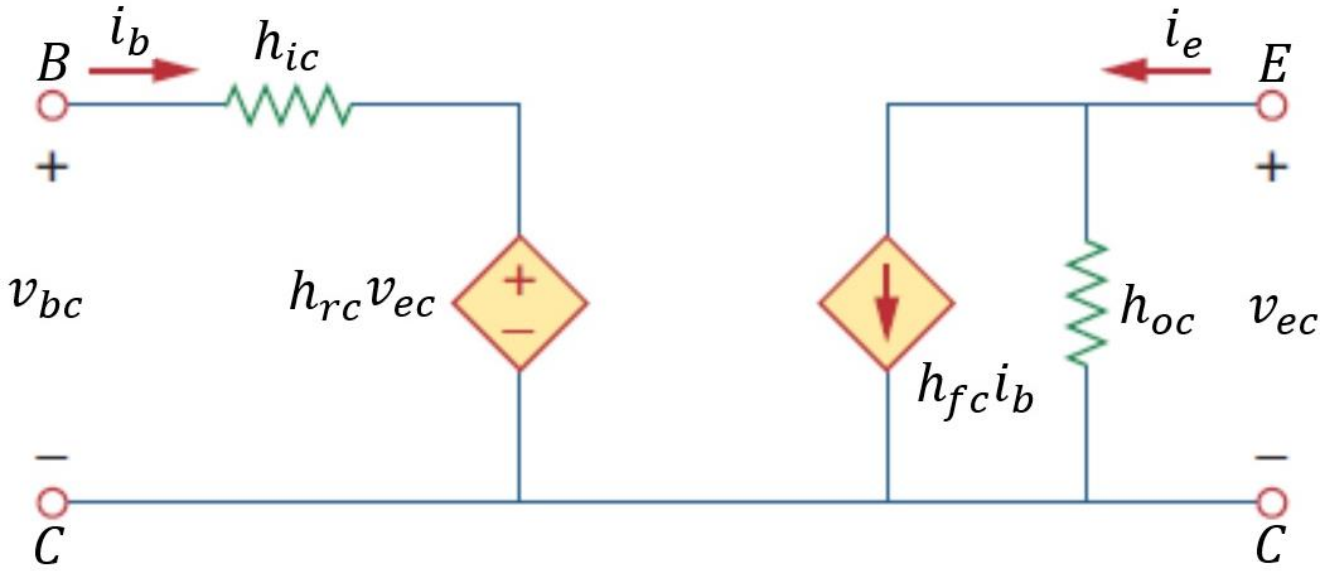
مدل‌های مختلف Hybrid ترانزیستور

امیتر مشترک:



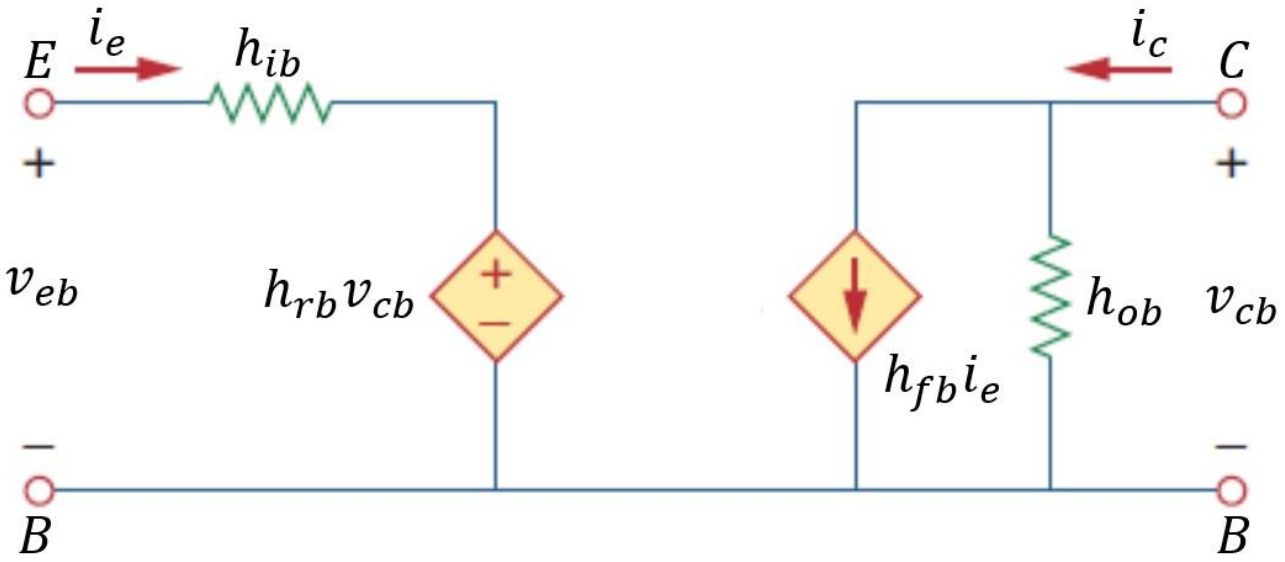
$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} \\ i_c = h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \end{cases}$$

کلکتور مشترک:



$$\begin{cases} v_{bc} = h_{ic}i_b + h_{rc}v_{ec} \\ i_e = h_{fc}i_b + h_{oc}v_{ec} \end{cases}$$

بیس مشترک:



$$\begin{cases} v_{eb} = h_{ib}i_e + h_{rb}v_{cb} \\ i_c = h_{fb}i_e + h_{ob}v_{cb} \end{cases}$$

بین پارامترهای سه مدل ارتباط وجود دارد و می‌توان از مدل‌های فوق در هر آرایشی از ترانزیستور استفاده نمود، ولی چون معمولا در عمل پارامترهای امیتر مشترك معلوم است، در ادامه از این مدل استفاده می‌کنیم.

تعیین پارامترهای **H** برای آرایش امیتر مشترك:

$$\begin{cases} v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE}) \\ i_C = f_2(i_B, v_{CE}) \end{cases}$$

این توابع را حول نقطه کار با استفاده از سری تیلور بسط می‌دهیم .

$$\Delta v_{BE} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial i_B}\right|_Q \Delta i_B + \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{CE}}\right|_Q \Delta v_{CE}$$

$$\Delta i_C = \left.\frac{\partial f_2}{\partial i_B}\right|_Q \Delta i_B + \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{CE}}\right|_Q \Delta v_{CE}$$

در این بسط از جملات مرتبه ۲ به بالا صرفنظر شده است. زیرا تغییرات حول نقطه کار بسیار کوچك است(سیگنال کوچك) و ترانزیستور به عنوان عنصر خطی فرض شده است.

Δv_{BE} و Δi_C تغییرات v_{BE} و i_C حول نقطه کار و در حقیقت همان مقادیر سیگنال AC است.

پس با مقایسه معادلات فوق با معادلات حالت امیتر مشترک به فرم **H** خواهیم داشت:

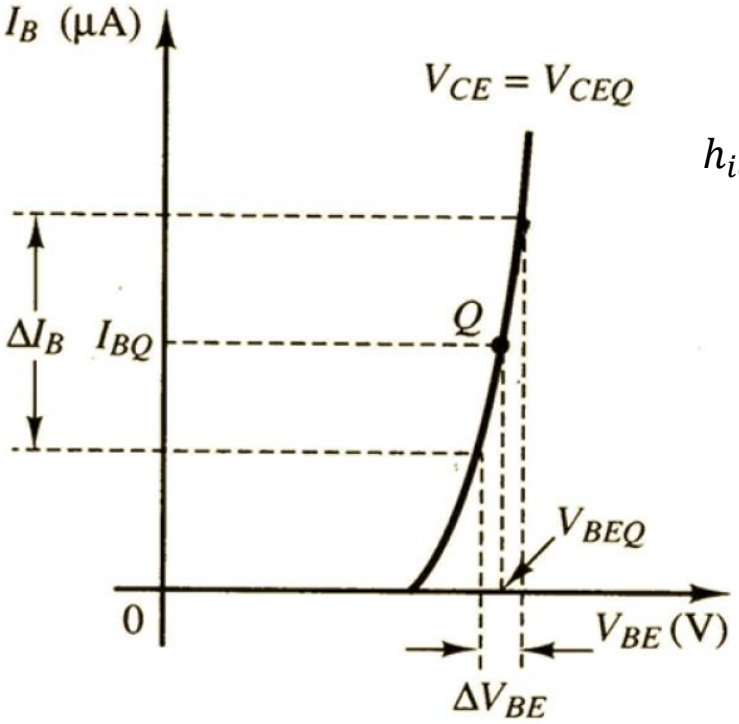
$$h_{ie} = \frac{\partial f_1}{\partial i_B}\bigg|_Q = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\bigg|_Q \quad , \quad h_{re}\frac{\partial f_1}{\partial v_{CE}}\bigg|_Q = \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\bigg|_Q$$

$$h_{fe} = \frac{\partial f_2}{\partial i_B}\bigg|_Q = \frac{\partial i_C}{\partial i_B}\bigg|_Q \quad , \quad h_{oe} = \frac{\partial f_2}{\partial v_{CE}}\bigg|_Q = \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\bigg|_Q$$

مشتقات جزئی فوق را می‌توان با نسبت تغییرات متغیرها در حول نقطه کار تقریب زد.

تعیین پارامترهای CE از مشخصه های ورودی و خروجی

$: h_{ie}$



$$h_{ie} = \frac{\partial f_1}{\partial i_B}\bigg|_Q = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\bigg|_Q = \frac{v_{BE_2} - v_{BE_1}}{i_{B_2} - i_{B_1}}$$

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_S \cdot e^{V_{BE}/V_t}$$

$$h_{ie} = \frac{\eta\, V_t}{I_B} = \frac{\eta\, V_t \beta}{I_C}$$

یادآوری

جریان کم (قبل از ولتاژ شکست لایه سد) در دیتاشیت دیود داده می‌شود.

$$\eta(Si) = 2 \quad , \quad \eta(Ge) = 1$$

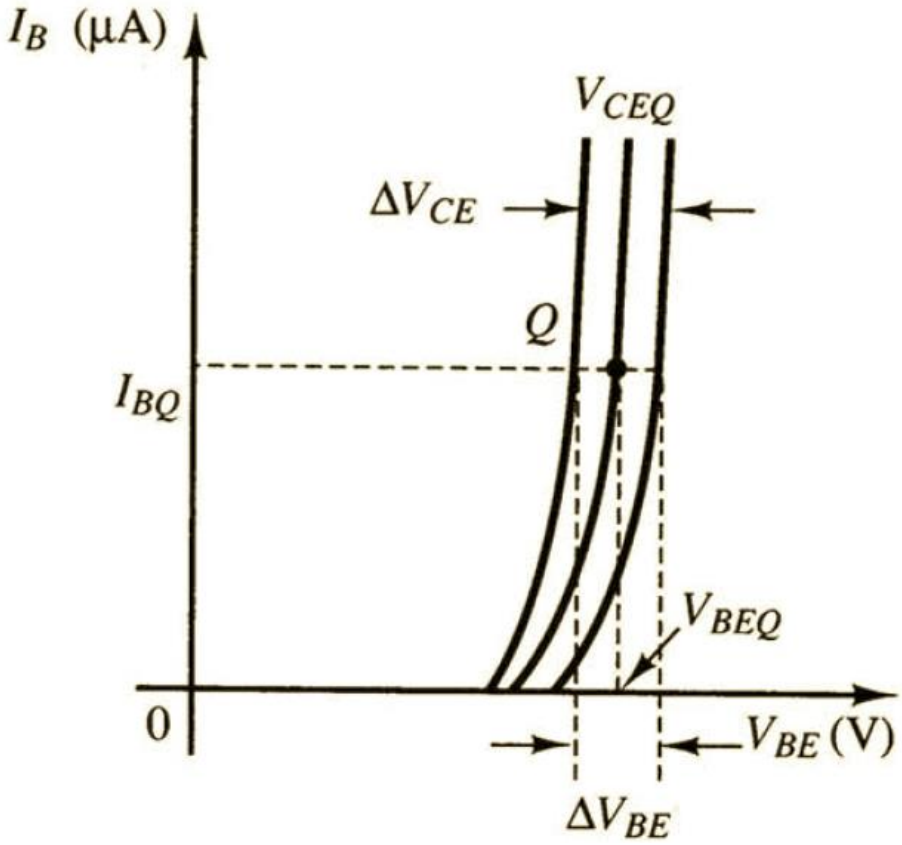
جریان زیاد (بعد از ولتاژ شکست لایه سد)

$$\eta(Si) = 1 \quad , \quad \eta(Ge) = 1$$

در این اندازه گیری بایستی V_{CE} ثابت فرض شود.

h_{re} : به علت کوچك بودن h_{re}، باید تغییرات زیادی V_{CE} داشته باشد تا V_{BE} تغییر محسوس و قابل اندازه‌گیری پیدا کند.

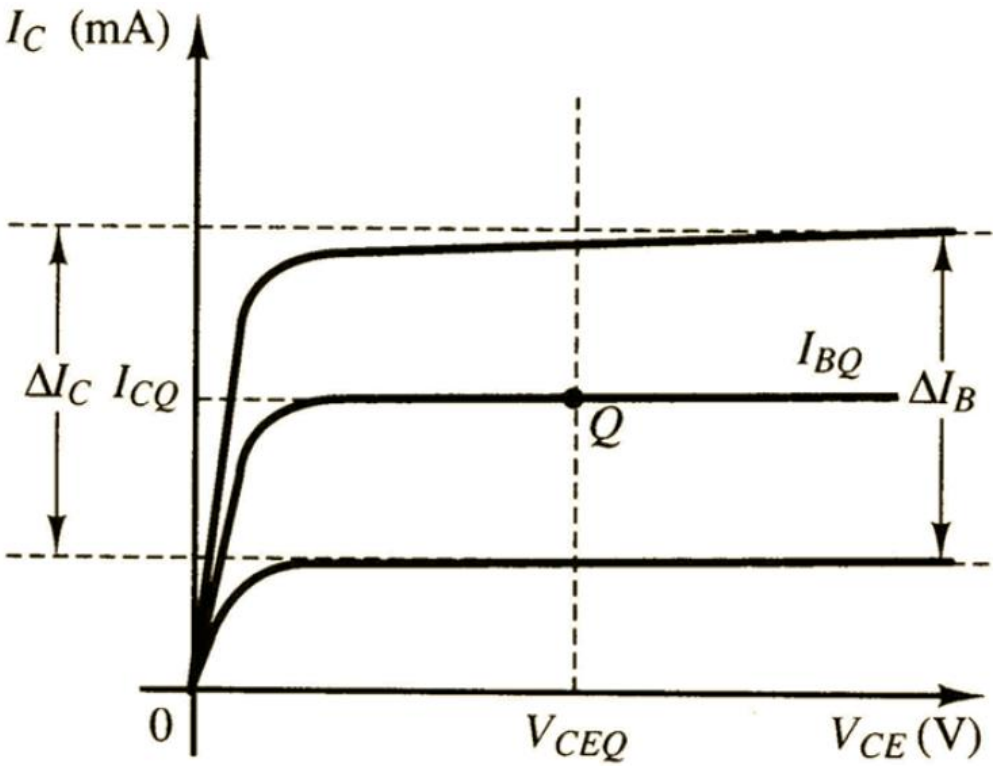
$$h_{re}\left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{CE}}\right|_Q = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\right|_Q$$



در این اندازه گیری بایستی جریان بیس ثابت فرض شود. از طرفی با بزرگ بودن V_{CE} و مسئله غیر خطی بودن مشخصه ، اندازه گیری h_{re} دقیق نیست.

h_{fe} : را بهره جریان AC ترانزیستور گویند.

$$h_{fe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial i_B}\right|_Q = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_Q = \frac{i_{C_2} - i_{C_1}}{i_{B_2} - i_{B_1}}$$

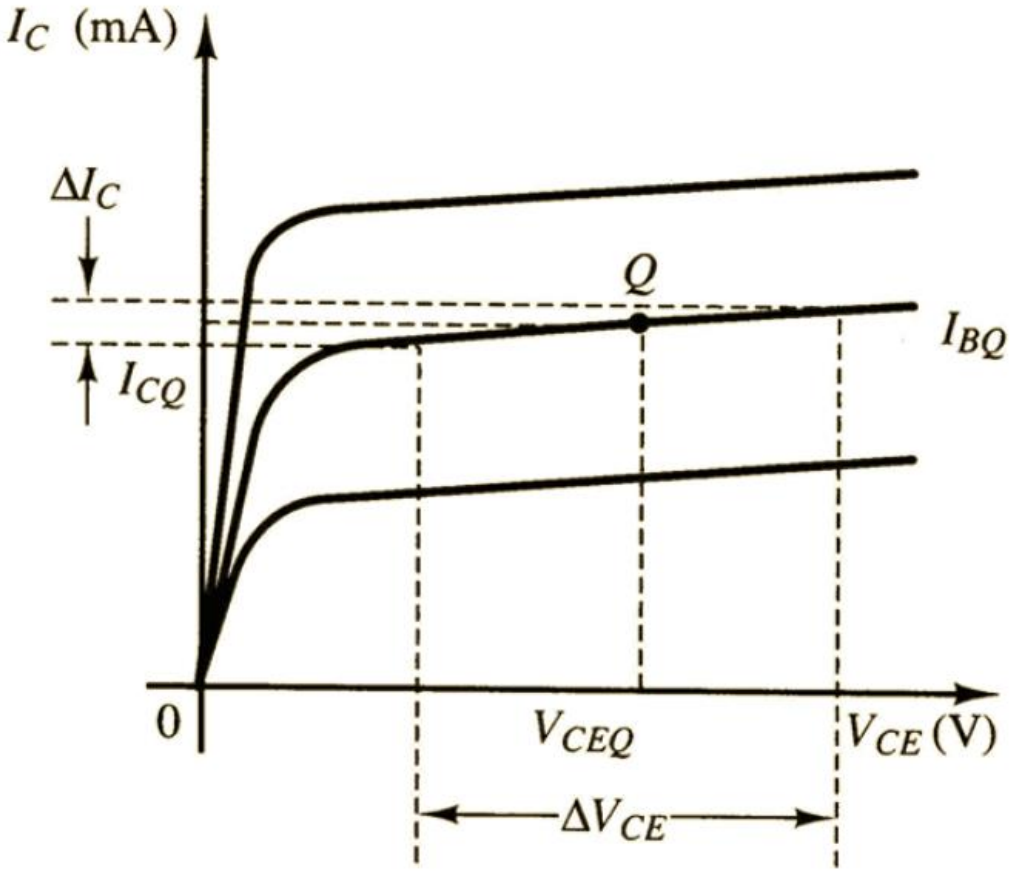


در این اندازه گیری بایستی V_{CE} ثابت فرض شود.

$: h_{oe}$

$$h_{oe} = \frac{\partial f_2}{\partial v_{CE}}\bigg|_Q = \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\bigg|_Q = \frac{i_{C_2} - i_{C_1}}{v_{CE_2} - v_{CE_1}}$$

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



در این اندازه گیری بایستی I_B ثابت فرض شود.

$$h_{oe} \approx \frac{I_C}{V_A}$$

چون h_{oe} کوچك است، و اندازه‌گیری تغییر جریان کلکتور از دقت کافی برخوردار نیست، تعیین h_{oe} با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه است.

خلاصه‌ی مراحل تحلیل سیگنال کوچک مدار:

تعیین نوع آرایش ترانزیستور (امیتر مشترک، کلکتور مشترک یا بیس مشترک)

رسم مدل هایبرید ترانزیستور

نام گزاری مدل هایبرید بر اساس نوع آرایش

اتصال عناصر دیگر به مدار معادل ترانزیستور با در نظر گرفتن مدل ac مدار

خازن ها: اتصال کوتاه

سلف ها: اتصال باز

منابع مستقل DC : غیرفعال (منابع جریان: اتصال باز / منابع ولتاژ: اتصال کوتاه)

ردیف	تعاریف	کلکتور مشترک	امیتر مشترک	بیس مشترک
۱	مقاومت ورودی در حالتی که خروجی اتصال کوتاه	$h_{ic}=\frac{v_{bc}}{i_b}$	$h_{ie}=\frac{v_{be}}{i_b}$	$h_{ib}=\frac{v_{eb}}{i_e}$
۲	بهره ولتاژ معکوس در حالتی که ورودی باز	$h_{rc}=\frac{v_{bc}}{v_{ec}}$	$h_{re}=\frac{v_{be}}{v_{ce}}$	$h_{rb}=\frac{v_{eb}}{v_{cb}}$
۳	بهره جریان مستقیم وقتی که خروجی اتصال کوتاه	$h_{fc}=\frac{i_e}{i_b}$	$h_{fe}=\frac{i_c}{i_b}$	$h_{fb}=\frac{i_c}{i_e}$
٤	رسانایی خروجی در حالتی که ورودی باز	$h_{oc}=\frac{i_e}{v_{ec}}$	$h_{oe}=\frac{i_c}{v_{ce}}$	$h_{ob}=\frac{i_c}{v_{cb}}$

منابع:

۱- جزوه استاد شمس

۲-جزوه استاد دلیر روی‌فرد

پایان جلسه نهم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان