Fundamentals of Microelectronics

- CH1 Why Microelectronics?
- CH2 Basic Physics of Semiconductors
- CH3 Diode Circuits
- CH4 Physics of Bipolar Transistors
- CH5 Bipolar Amplifiers
- CH6 Physics of MOS Transistors
- CH7 CMOS Amplifiers
- CH8 JFET Transistor

Chapter 5 Bipolar Amplifiers

- 5.1 General Considerations
- 5.2 Operating Point Analysis and Design
- 5.3 Bipolar Amplifier Topologies
- 5.4 Summary and Additional Examples

Bipolar Amplifiers

General Concepts

- Input and Output Impedances
- Biasing
- DC and Small-Signal Analysis

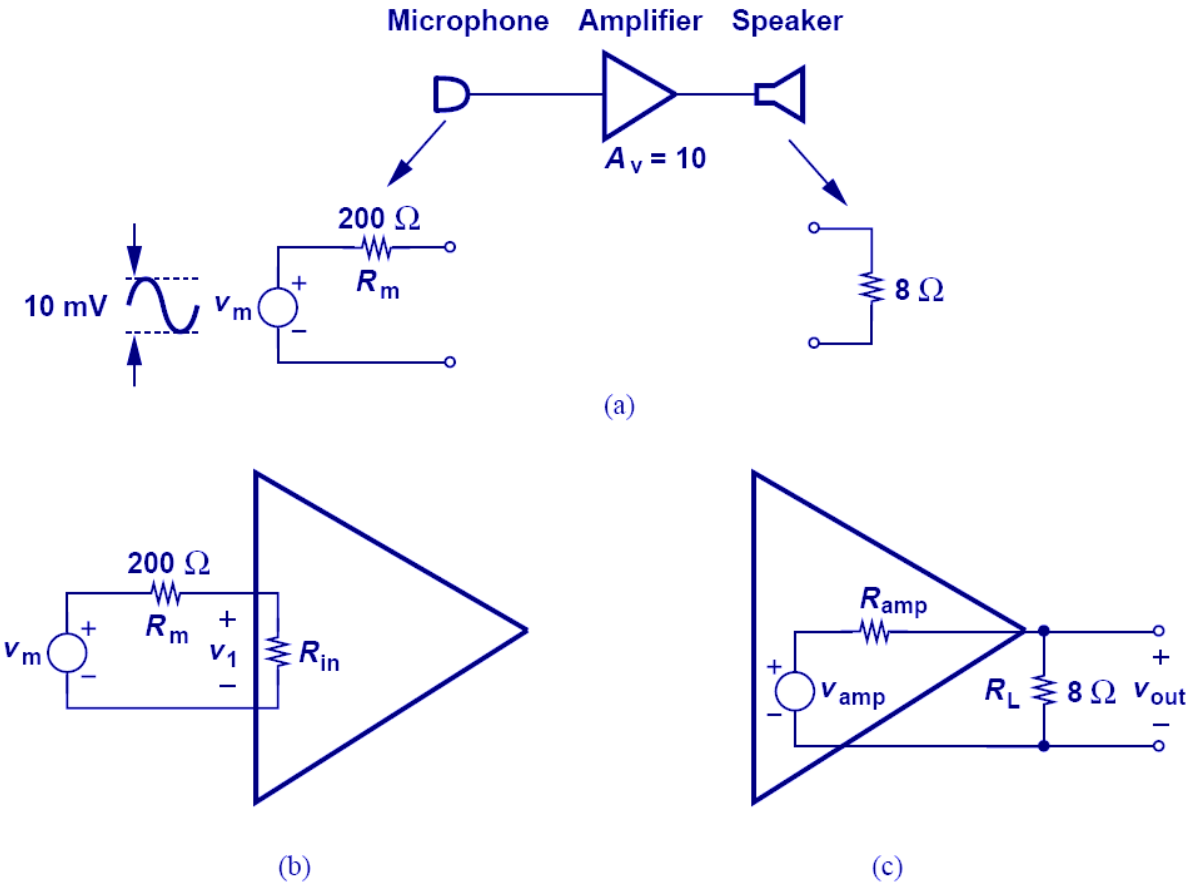
Operating Point Analysis

- Simple Biasing
- Emitter Degeneration
- Self-Biasing
- Biasing of PNP Devices

Amplifier Topologies

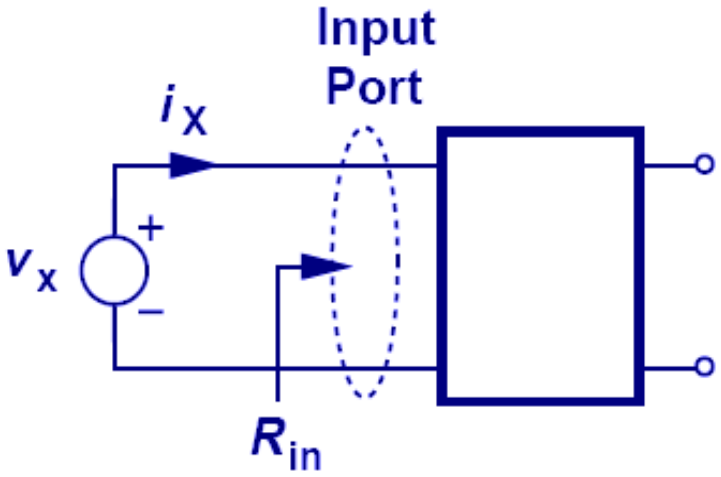
- Common-Emitter Stage
- Common-Base Stage
- Emtter Follower

تقویت کننده ولتاژ

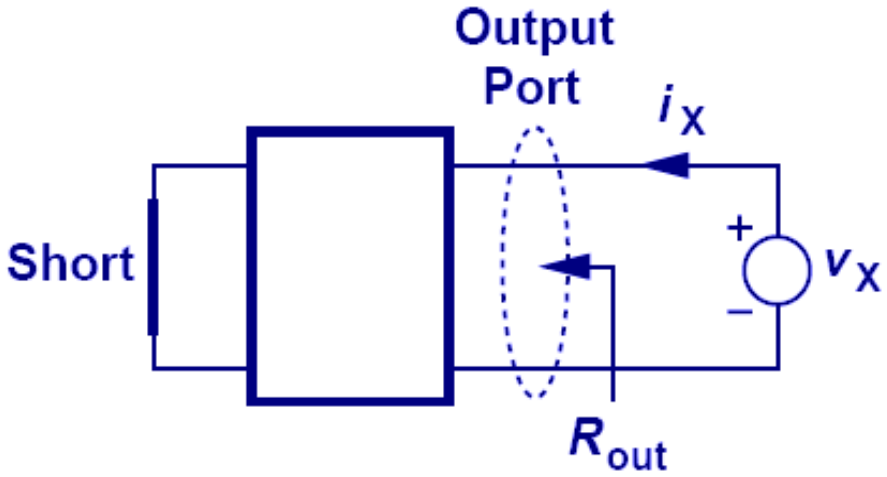


- در یک تقویت کننده ولتاژ ایده آل، امپدانس ورودی برابر با بی نهایت و امپدانس خروجی برابر با صفر است.
- اما در مدارهای عملی ما از امپدانس های ایده آل مزبور فاصله داریم.

نحوه محاسبه امپدانس های ورودی و خروجی



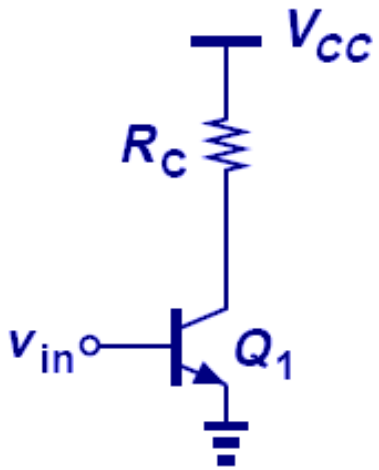
(a)



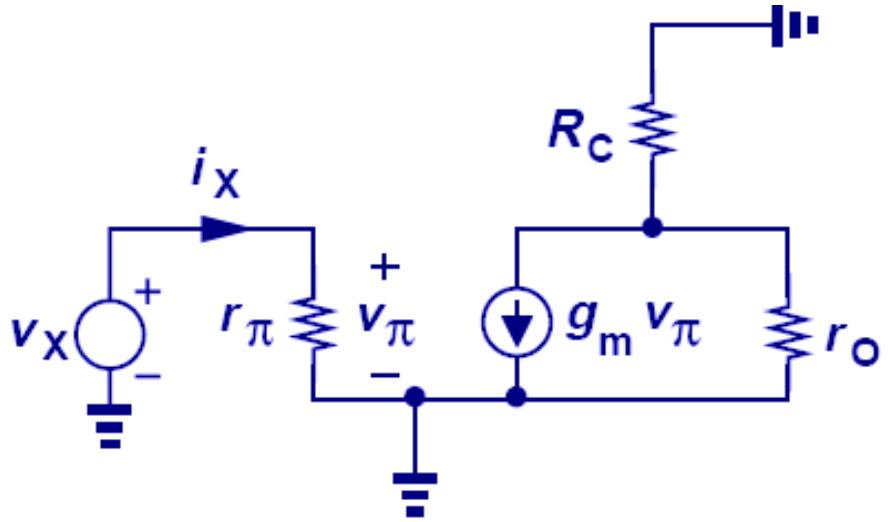
(b)

$$R_x = \frac{V_x}{i_x}$$

امپدانس دیده شده از بیس (مثال 1)



(a)

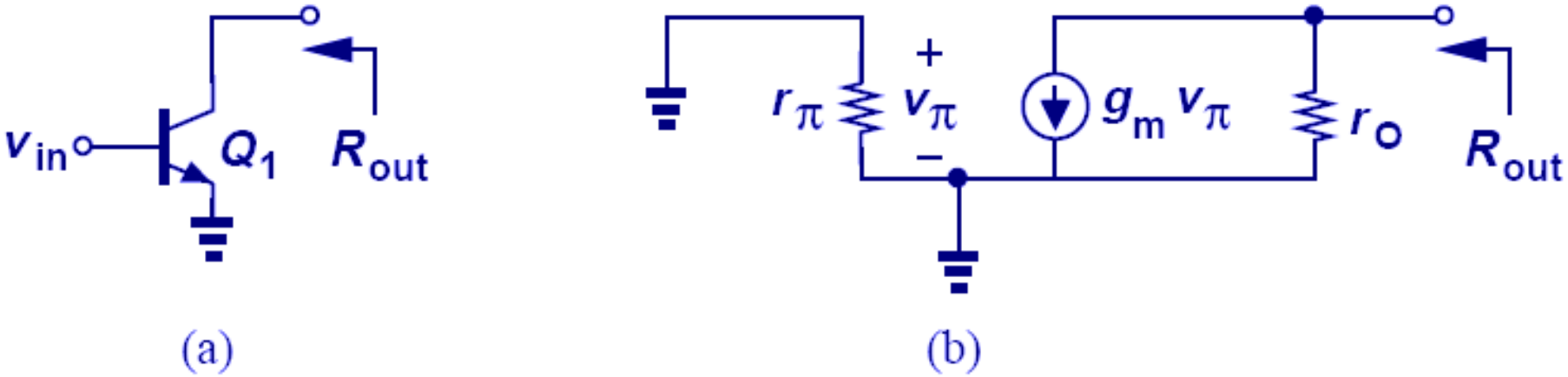


(b)

$$\frac{v_x}{i_x} = r_\pi$$

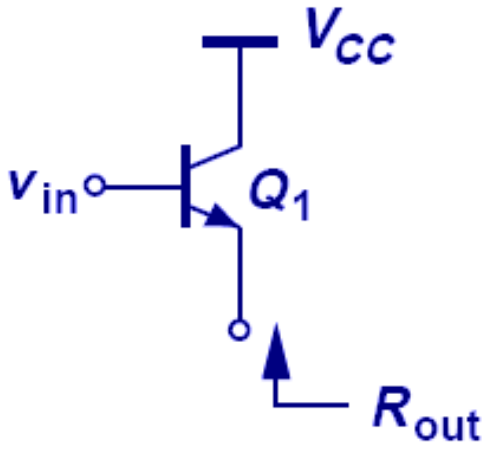
- نکته بسیار مهم: وقتی صحبت از محاسبه امپدانس می کنیم عملا فرض کرده ایم که این محاسبات مربوط به تحلیل AC یا همان تحلیل سیگنال کوچک است.

امپدانس دیده شده از کلکتور (مثال 2)

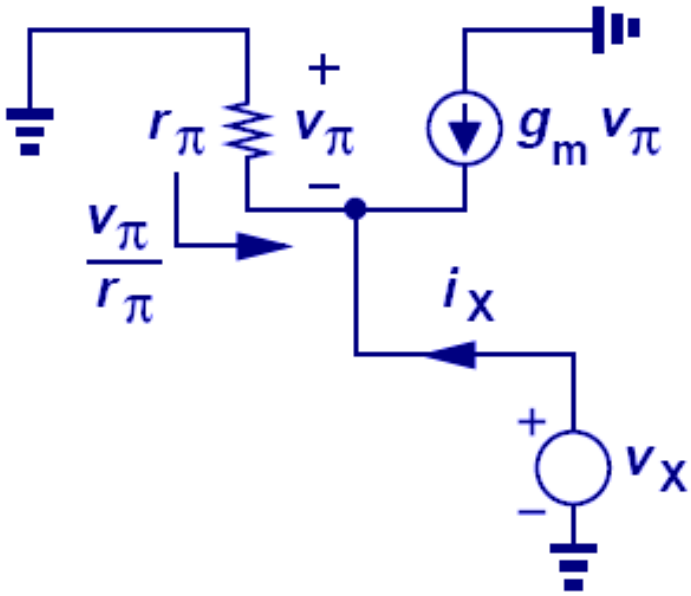


$$R_{out} = r_o$$

امپدانس دیده شده از امیتر (مثال 3)



(a)



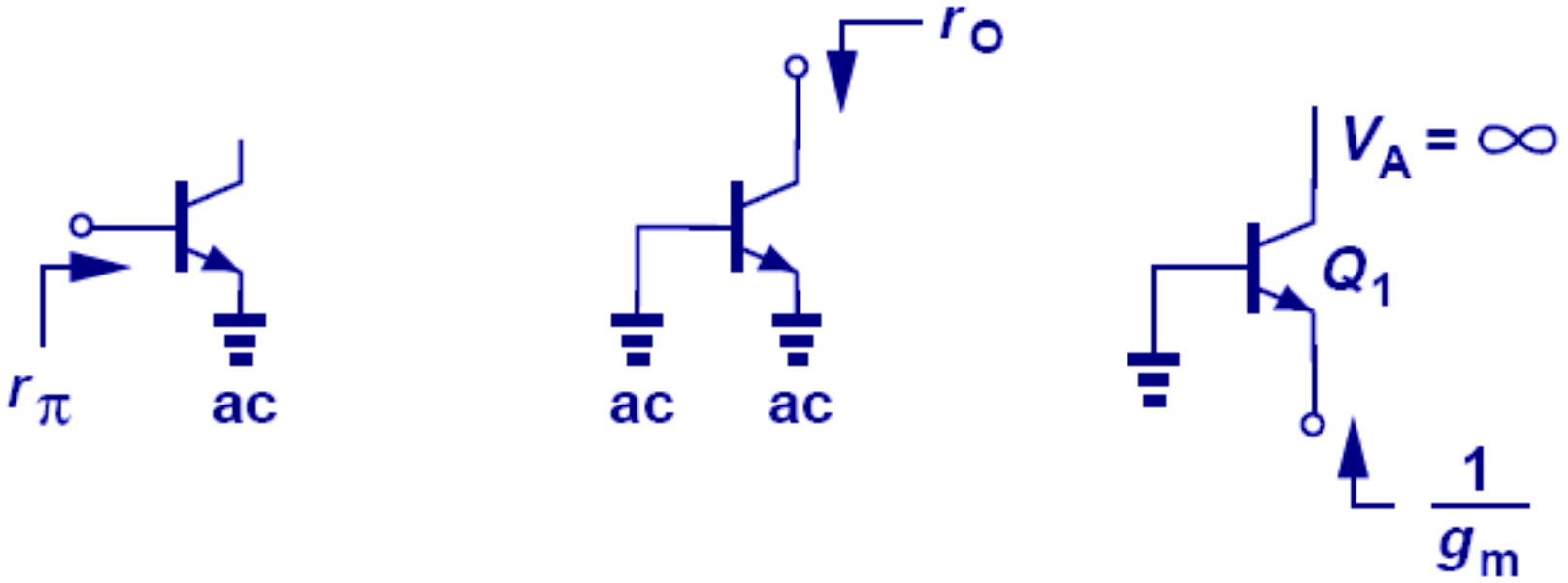
(b)

$$\frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{r_\pi}}$$

$$R_{out} \approx \frac{1}{g_m}$$

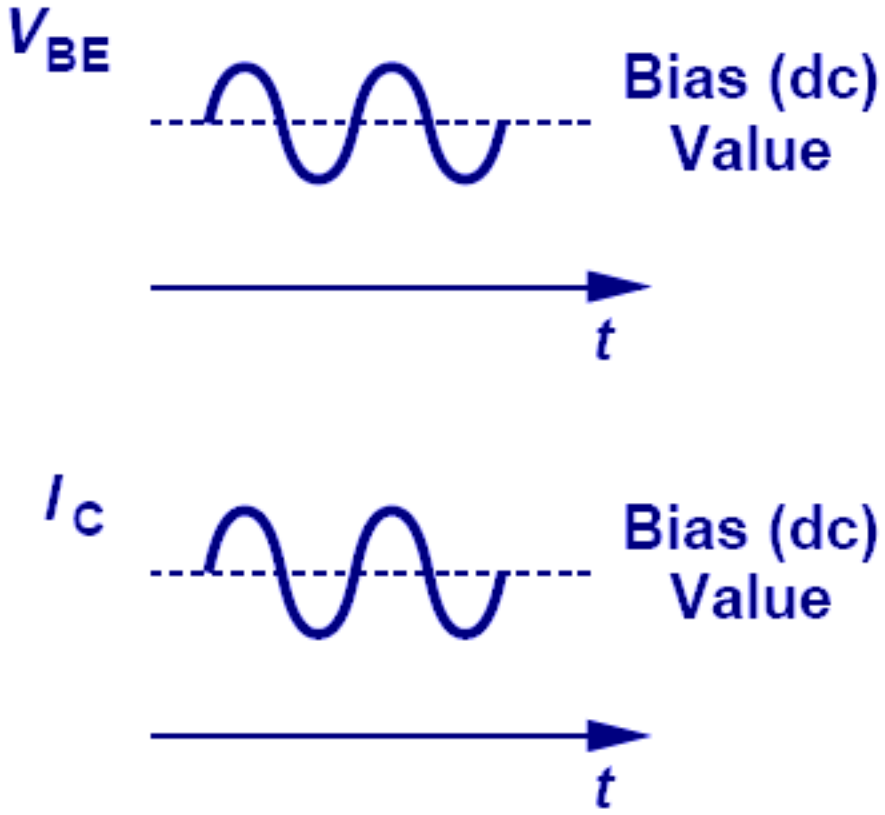
$$(V_A = \infty)$$

سه نکته مهم در مورد امپدانس ترانزیستور دوقطبی



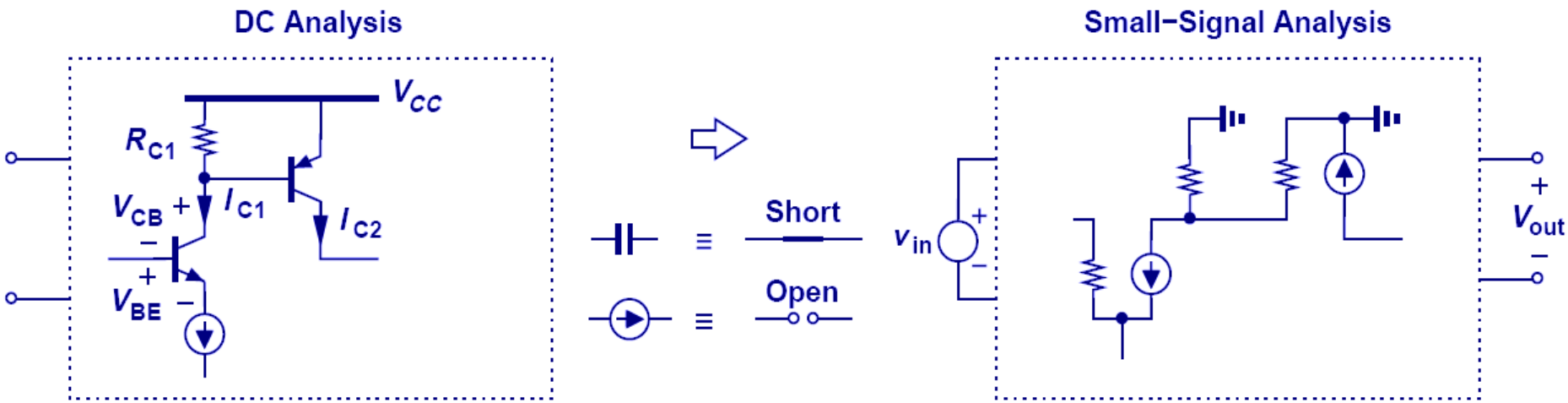
- نکته 1: اگر در تحلیل ac امیتر زمین شده باشد در آن صورت امپدانس دیده شده از بیس برابر با r_π است.
- نکته 2: اگر در تحلیل ac امیتر زمین شده باشد در آن صورت امپدانس دیده شده از کلکتور برابر با r_o است.
- نکته 3: اگر در تحلیل ac بیس زمین شده باشد و نیز بتوان از اثر ارلی اغماض کرد در آن صورت امپدانس دیده شده از امیتربرابر با $1/g_m$ است.

ضرورت بایاس ترانزیستور



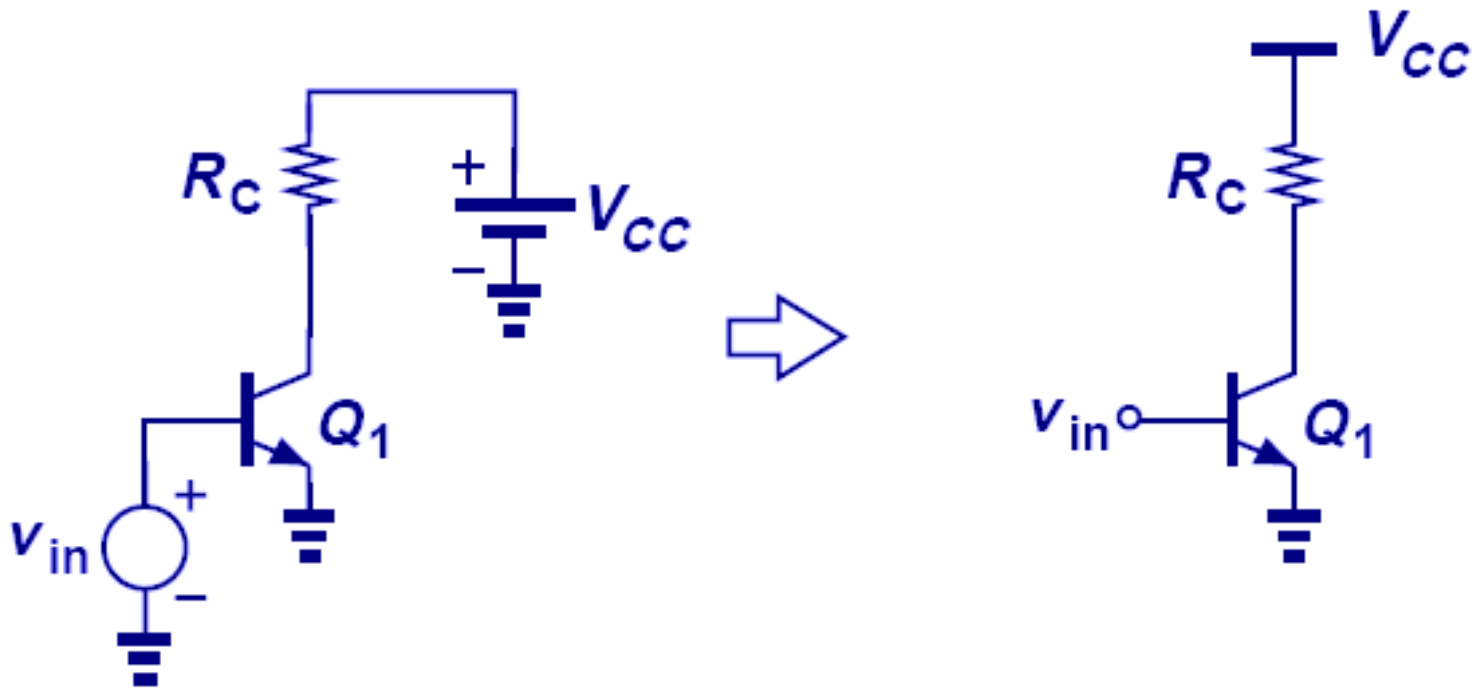
- به دو دلیل ترانزیستور حتما بایستی بایاس شود:
  - ترانزیستور حتما بایستی در ناحیه فعال کار کند.
  - مقدار پارامترهای سیگنال کوچک (g_m,r_π, r_o) به مقدار جریان dc گذرنده از ترانزیستور بستگی دارد.

ابتدا تحلیل DC- سپس تحلیل سیگنال کوچک

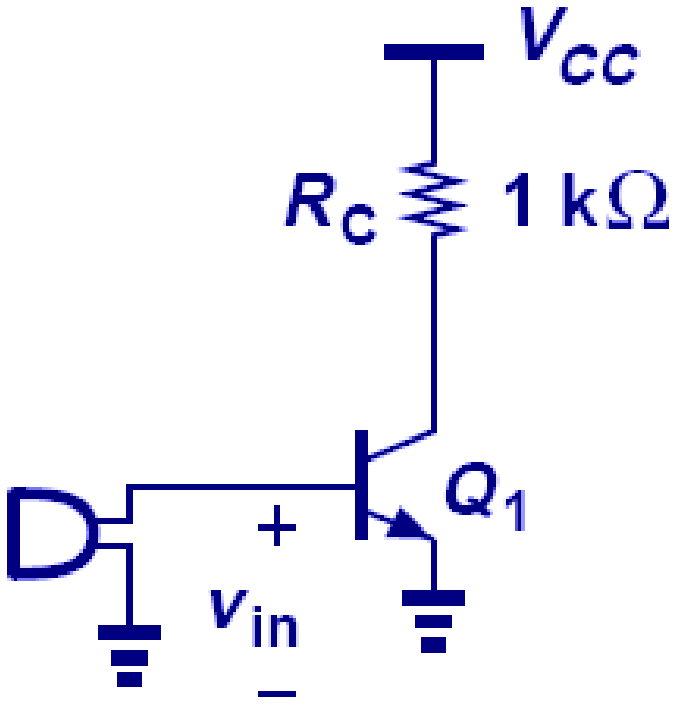


- همیشه ابندا تحلیل DC انجام می دهیم تا به تبع آن نقطه کار ترانزیستور مشخص شود و بتوانیم پارامترهای سیگنال کوچک را محاسبه کنیم.
- سپس منابع DC را صفر کرده و با استفاده از مدل سیگنال کوچک تحلیل AC را آغاز می کنیم.

خلاصه کردن شماتیک مدار

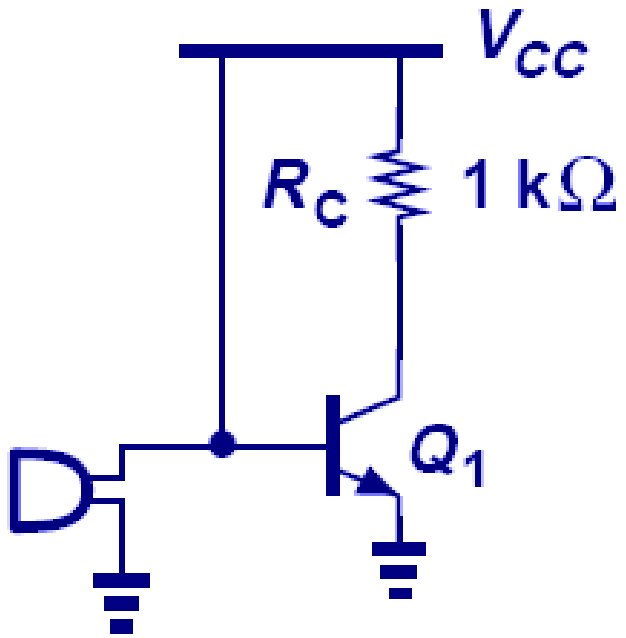


مثالی از یک بایاس بد



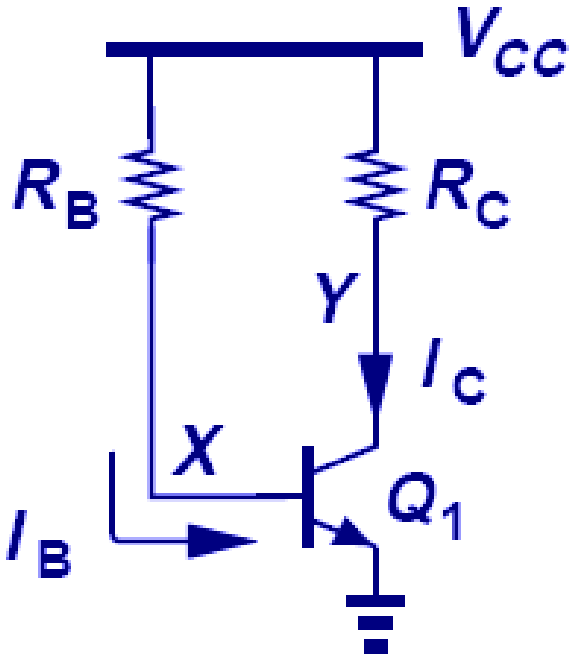
- در مدار فوق ولتاژ میکروفن بسیار کوچک است و این ولتاژ کوچک هرگز نمی تواند ترانزیستور را روشن کند. لذا ترانزیستور همواره خاموش است و تقویت کنندگی از خود نشان نمی دهد.

مثالی از یک بایاس بد



- اگرچه در مدار فوق ترانزیستور روشن شده و مشکل مدار اسلاید قبل برطرف شده است ولیکن این مداردر تحلیل AC با مشکل مواجه می شود.
- در تحیلی AC مشاهده می شود که سیگنال خروجی میکروفن به زمین اتصال کوتاه شده است.

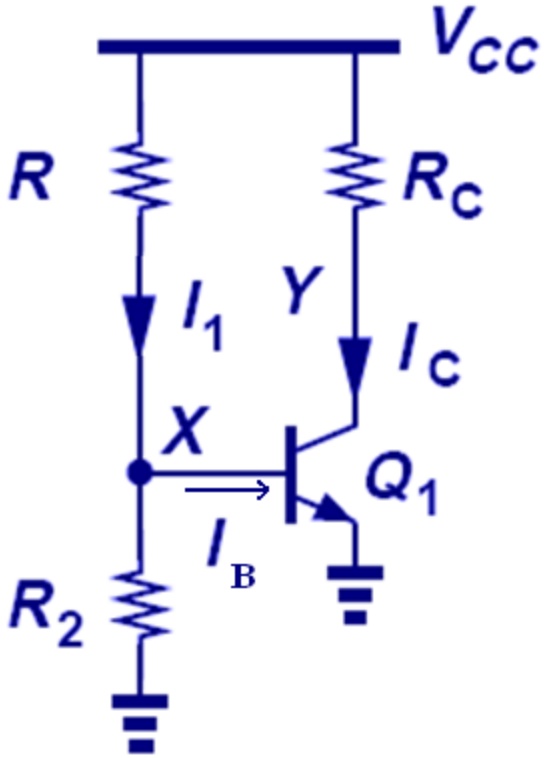
بایاس ترانزیستور با استفاده از مقاومت R_B



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}, I_C = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

- با فرض $V_{BE} \cong 0.7\ V$، جریان های I_B و I_C محاسبه و به تبع آن ولتاژ تمام پایه های ترانزیستور مشخص می شود.
- البته توجه داشته باشید که نقطه کار به β وابستگی زیادی دارد.

بهبود بایاسینگ با استفاده از تقسیم کننده مقاومتی



$$if \;\; I_B << I_1 \Longrightarrow V_X \cong \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

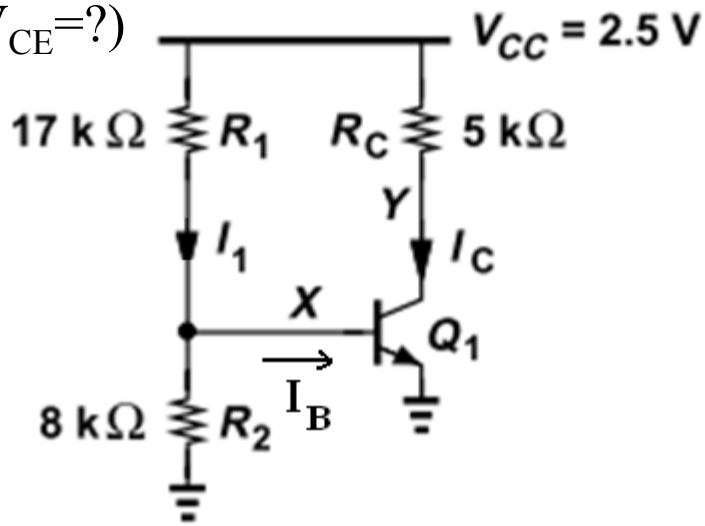
$$I_C = I_S \exp\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{V_{CC}}{V_T} \right)$$

- اگر با استفاده از یک تقسیم کننده مقاومتی ولتاژ بیس را تعیین کنیم و شرط $I_B << I_1$ را نیز برآورده کنیم در آن صورت جریان کلکتور مستقل از β می شود.
- ایراد مدار فوق این است که جریان I_C به مقدار I_S وابستگی دارد.

مثال 1

Determine the operating point of Q1. (I_C=?, I_B=?,V_{CE}=?)

$$I_S = 10^{-17} A, \quad \beta = 100$$



Assume Q1 is biased in the active region.
Moreover, Assume $I_B << I_1$.

$$V_X \cong \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$
$$= 800\ \text{mV}.$$

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$
$$= 231\ \mu\text{A}$$

$$I_B = 2.31\ \mu\text{A}.$$

$V_{CE} = 1.345$ V >V_{BE}=0.8 V

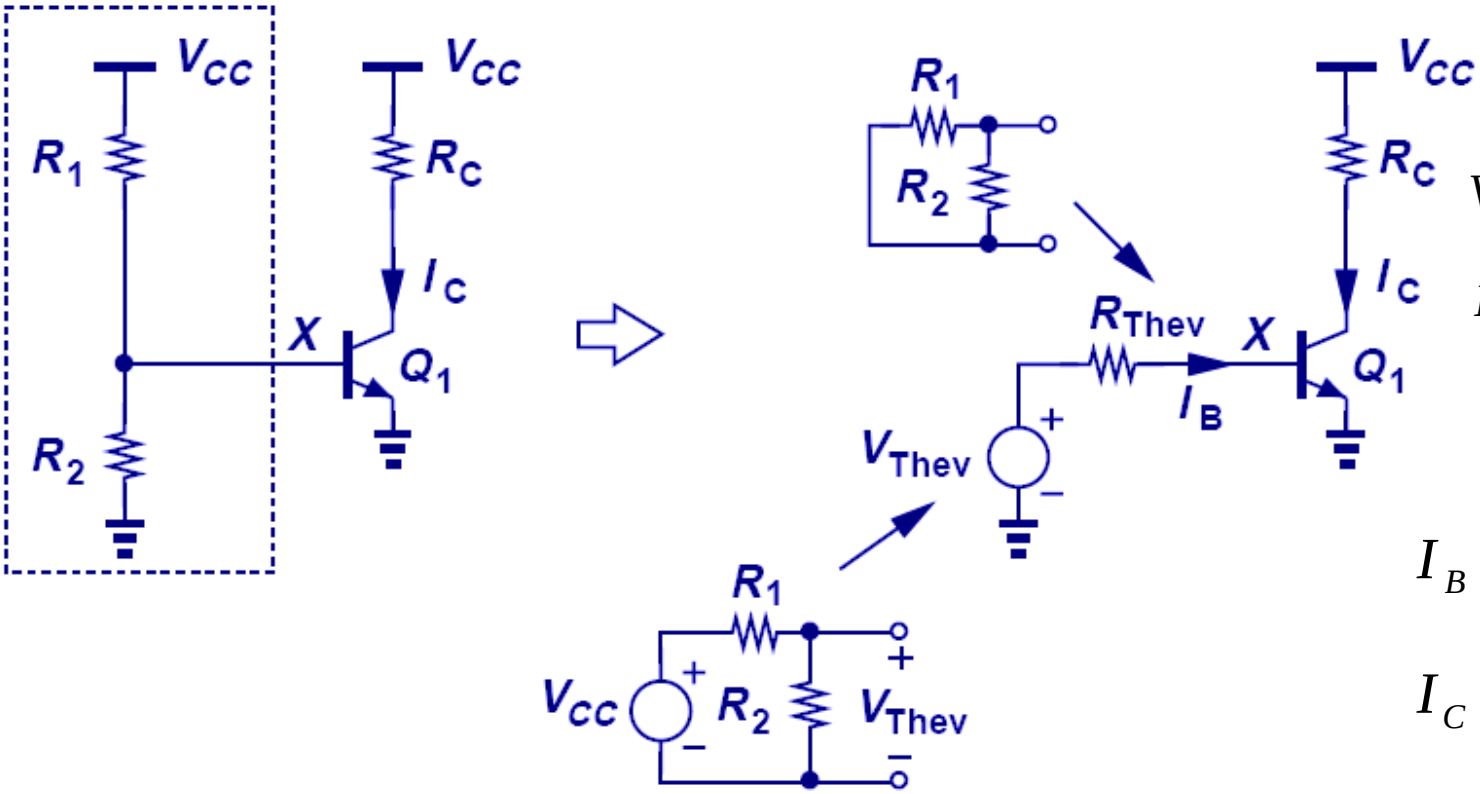
$$I_B \overset{?}{\ll} \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}.$$

$$2.31\mu \overset{?}{<<} 100\mu$$

The operating point is dependent to I_S, independent of β.

تحلیل دقیق مدار اسلاید قبل

اگر نتوانیم از I_B در مقایسه با I_1 اغماض کنیم در آن صورت تحلیل مدار به صورت زیر می شود:



$$V_{Thev} = \frac{R_2}{R1 + R_2} \times V_{CC}$$

$$R_{Thev} = R1 \| R_2$$

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

$$I_C = \beta I_B$$

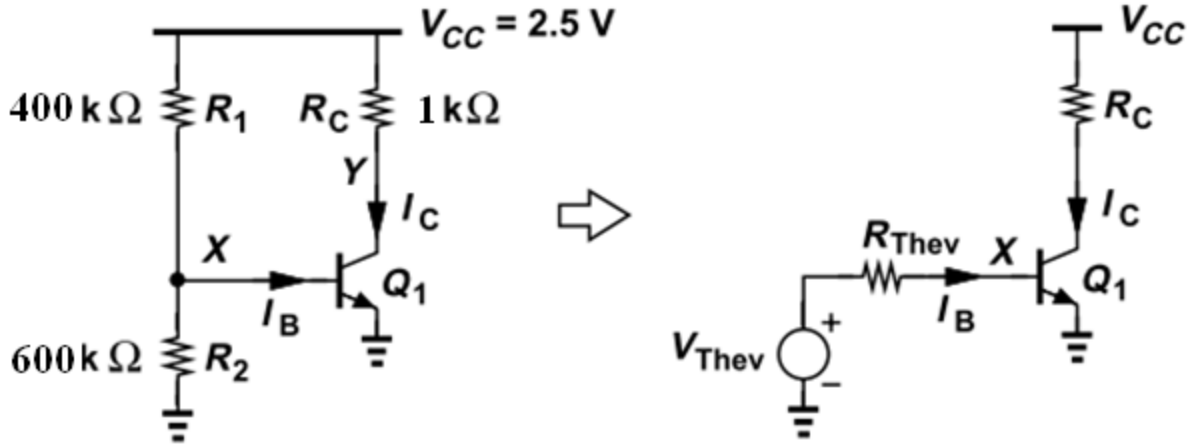
$$V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right)$$

➢ **مشاهده می شود که I_C می تواند هم به β و هم به I_S وابستگی داشته باشد.**

مثال 2

Determine the operating point of Q1. (I_C=?, I_B=?,V_{CE}=?)

$I_S = 10^{-17} A, \quad \beta = 100$



$$V_{Thev} = \frac{R_2}{R1 + R_2} \times V_{CC} = 1.5\ V$$

$$R_{Thev} = R1 \| R_2 = 240\ k$$

$$\begin{cases} I_B = \dfrac{1.5 - V_{BE}}{240k} \\ I_C = 100\, I_B \\ V_{BE} = 0.026 \ln\left(\dfrac{I_C}{10^{-11}\ \mu A}\right) \end{cases}$$

Assume: V_{BE}=0.7 V ➔ I_B=3.3 µA ➔ I_C=330 µA ➔ V_{BE}=0.81 V

V_{BE}=0.81 V ➔ I_B=2.88 µA ➔ I_C=288 µA ➔ V_{BE}=0.81 V

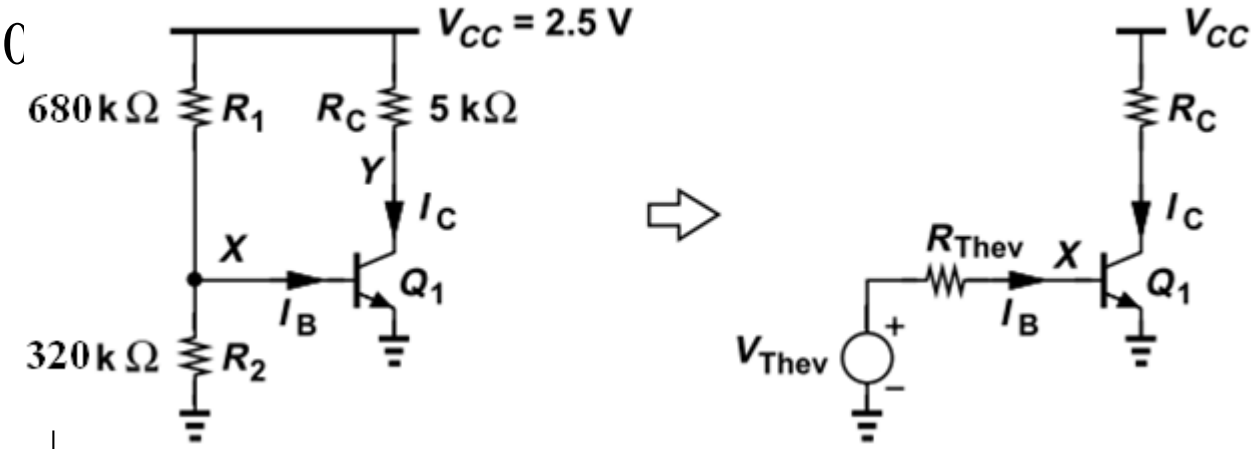
$$V_{CE} = 2.5 - 1k \times 0.33\ mA = 2.17\ V > V_{BE} = 0.7\ V$$

The operating point is dependent to β, independent of I_S.

مثال 3

Determine the operating point of Q1. (I_C=?, I_B=?,V_{CE}=?)

$$I_S = 10^{-17} A, \quad \beta = 100$$



$$V_{Thev} = \frac{R_2}{R1 + R_2} \times V_{CC} = 0.8\ V$$

$$R_{Thev} = R1 \| R_2 = 218\ k$$

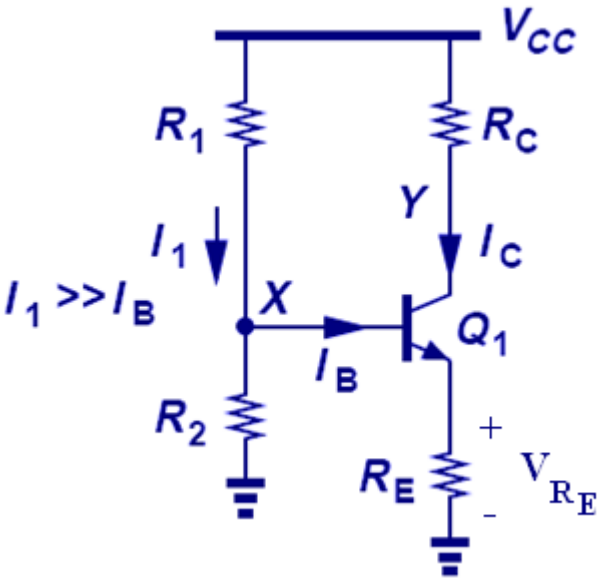
$$\begin{cases} I_B = \dfrac{0.8 - V_{BE}}{218k} \\ I_C = 100\, I_B \\ V_{BE} = 0.026 \ln\left(\dfrac{I_C}{10^{-11}\ \mu A}\right) \end{cases}$$

Assume: V_{BE}=0.7 V ➔ I_B=0.459 µA ➔ I_C=45.9 µA ➔ V_{BE}=0.758 V
V_{BE}=0. 758 V ➔ I_B=0.193 µA ➔ I_C=19.3 µA ➔ V_{BE}=0.735 V
V_{BE}=0. 735 V ➔ I_B=0.298 µA ➔ I_C=29.8 µA ➔ V_{BE}=0.748 V
V_{BE}=0. 748 V ➔ I_B=0.239 µA ➔ I_C=23.9 µA ➔ V_{BE}=0.741 V
V_{BE}=0. 741 V ➔ I_B=0.271 µA ➔ I_C=27.1 µA ➔ V_{BE}=0.744 V
V_{BE}=0. 744 V ➔ **I_B=0.256 µA ➔ I_C=25.6 µA ➔ V_{BE}=0.743 V**

$$V_{CE} = 2.5 - 5k \times 0.0256\ mA = 2.37\ V > V_{BE} = 0.743\ V$$

The operating point is dependent to β, I_S.

استفاده از مقاومت R_E به منظور بهبود بایاسینگ



$$if \quad I_B << I_1 \Rightarrow V_X \cong \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$V_{R_E} = V_X - V_{BE}$$

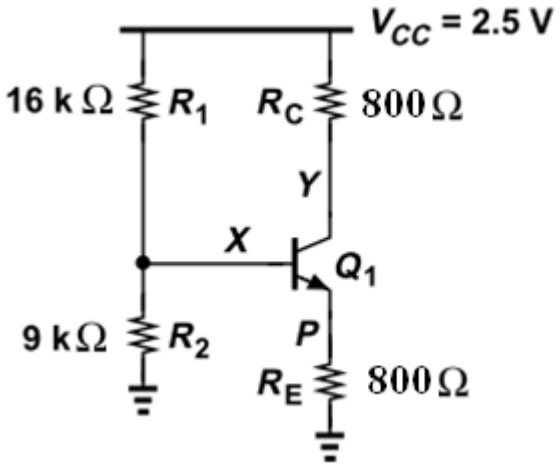
$$if \ \beta >> 1 \Rightarrow I_C \cong I_E = \frac{V_{R_E}}{R_E} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} - V_{BE}}{R_E}$$

- As an advantage, I_C does not depend on β.
- $V_{RE} = V_X - V_{BE}$
- $\Delta V_{RE} = \Delta V_X - \Delta V_{BE}$
- If $V_{RE} >> \Delta V_{RE}$ ➔ I_C does not depend on I_S.

مثال 4

Determine the operating point of Q1. (I_C=?, I_B=?,V_{CE}=?)

$$I_S = 5\times10^{-17} A, \quad \beta = 100$$



$$\left.\begin{aligned} V_X &\cong \frac{R_2}{R1+R_2}\times V_{CC} = 0.9\ V \\ V_P &= V_{R_E} \cong V_X - V_{BE} \\ I_C &\cong I_E = \frac{V_{R_E}}{R_E} \end{aligned}\right\} \Longrightarrow I_C = \frac{0.9 - V_{BE}}{0.8\ k}, V_{BE} = 0.026 \ln\left(\frac{I_C}{5\times10^{-14}\ mA}\right)$$

Assume: V_{BE}=0.7 V ➔ I_C=0.25 mA ➔ V_{BE}=0.760 V

V_{BE}=0.760 V ➔ I_C=0.175 mA ➔ V_{BE}=0.760 V

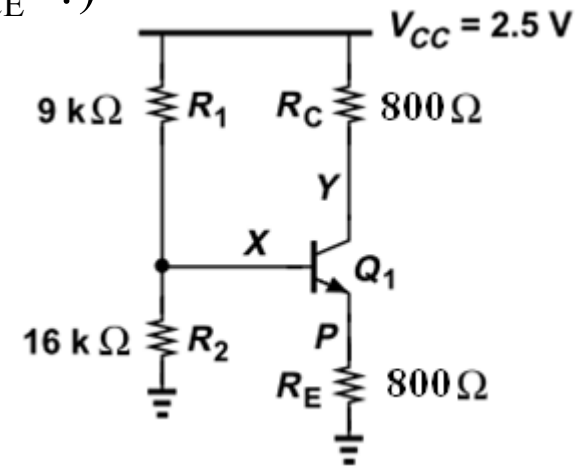
$$V_{CE} = 2.5 - 0.8k\times0.175\ mA - 0.8k\times0.175\ mA = 2.22\ V > V_{BE} = 0.76\ V$$

The operating point is dependent to I_S, independent of β.

مثال 5

Determine the operating point of Q1. (I_C=?, I_B=?,V_{CE}=?)

$$I_S = 5\times10^{-17} A, \quad \beta = 100$$



$$V_X \cong \frac{R_2}{R1+R_2}\times V_{CC} = 1.6\ V$$

$$V_P = V_{R_E} \cong V_X - V_{BE}$$

$$I_C \cong I_E = \frac{V_{R_E}}{R_E}$$

$$\Longrightarrow I_C = \frac{1.6 - V_{BE}}{0.8\ k}, V_{BE} = 0.026 \ln\left(\frac{I_C}{5\times10^{-14}\ mA}\right)$$

Assume: V_{BE}=0.7 V ➔ I_C=1.1 mA ➔ V_{BE}=0.798 V

V_{BE}=0.798 V ➔ I_C=1 mA ➔ V_{BE}=0.796 V

The operating point is independent of β, I_S.

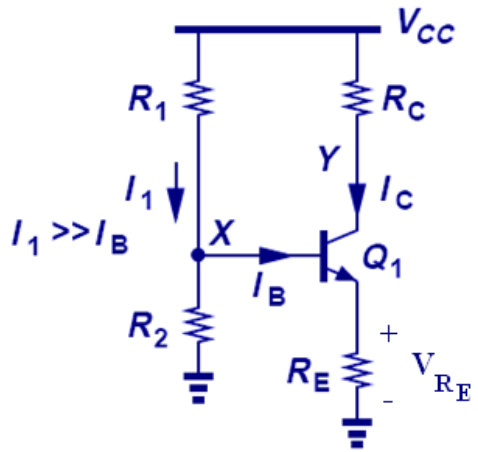
$$V_{CE} = 2.5 - 0.8k\times1.1\ mA - 0.8k\times1.1\ mA = 1.76\ V > V_{BE} = 0.79\ V$$

روش طراحی

- ابتدا مقدار I_C را به نحوی انتخاب می کنیم که پارامترهای سیگنال کوچک g_m, r_π مقدار مورد نظر ما را داشته باشند.
- با در نظر گرفتن میزان تغییرات ناخواسته در R_1, R_2, V_{BE} مقدار V_{RE} را انتخاب می کنیم.
- پس از انتخاب مقدار V_{RE} با توجه به این که مقدار V_{BE} را می دانیم، ولتاژ V_x محاسبه می شود.
- مقادیر R_1, R_2 را طوری می یابیم که ولتاژ V_x تامین شود.

مثال

Design the following circuit so as to provide g_m=20 mA/V for Q1. V_{CC}=2.5 V, β=100, I_S=5×10^{-17}A.



$$g_m = 20\frac{mA}{V} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{0.026} \Longrightarrow I_C = 0.52\ mA \Longrightarrow I_E = 0.53\ mA,\ I_B = 0.005\,mA$$

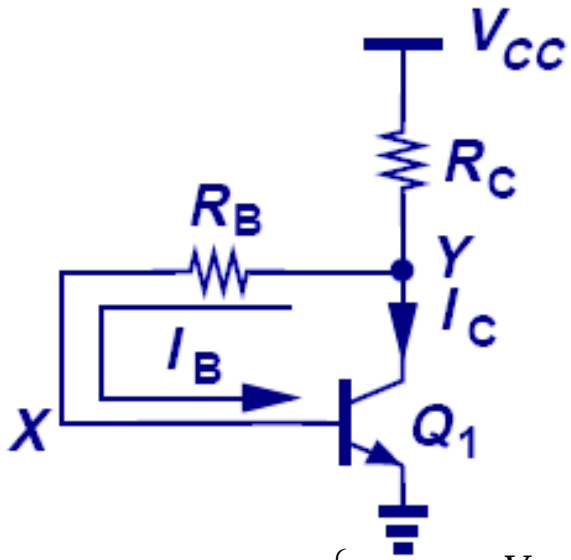
$$V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) = 0.82\ V$$

$$Assume:\quad V_{RE} = 0.4\,V \Longrightarrow R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = 750\ \Omega$$

$$\left.\begin{aligned} &\frac{V_{CC}}{R_1+R_2} >> I_B \Longrightarrow \frac{V_{CC}}{R_1+R_2} = 10 I_B \Longrightarrow R_1+R_2 = \frac{2.5}{0.05mA} = 50k \\ &V_X = V_{BE} + V_{RE} = 0.82 + 0.4 = 1.22 = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{CC} \Longrightarrow \frac{R_2}{R_1+R_2} = 0.488 \end{aligned}\right\} \Longrightarrow R_2 = 24.4k, R_1 = 25.6k$$

$$V_{BC} = V_X - V_C < 0 \Longrightarrow V_C > 1.22V \Longrightarrow 2.5 - R_C \times 0.52 > 1.22 \Longrightarrow R_C < 2.46k$$

مدار بایاس سرخود (خود به خودی)



$$V_{CC} = R_C\left(I_C + \frac{I_C}{\beta}\right) + R_B\frac{I_C}{\beta} + V_{BE} \Longrightarrow \begin{cases} I_C = \dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{\left(1+\dfrac{1}{\beta}\right)R_C + \dfrac{R_B}{\beta}} \cong \dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \dfrac{R_B}{\beta}} \\ V_{BE} = V_T \ln\left(\dfrac{I_C}{I_S}\right) \end{cases}$$

- یکی از ویژگی های مهم مدار بالا این است که همواره پتانسیل کلکتور از بیس بیش تر است. بنابراین ترانزیستور همواره در ناحیه فعال قرار خواهد گرفت.

روش طراحی مدار بایاس سرخود

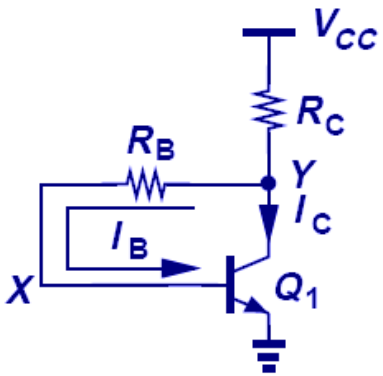
$$(1) \quad R_C >> \frac{R_B}{\beta}$$

$$(2) \quad \Delta V_{BE} << V_{CC} - V_{BE}$$

- نامعادله (1) عدم حساسیت جریان کلکتور به β را تضمین می کند.
- نامعادله (2) عدم حساسیت جریان کلکتور به تغییرات V_{BE} را تضمین می کند.

مثال

Design the following circuit so as to provide g_m=20 mA/V for Q1
V_{CC}=2.5 V, β=100, I_S=5×10^{-17}A.



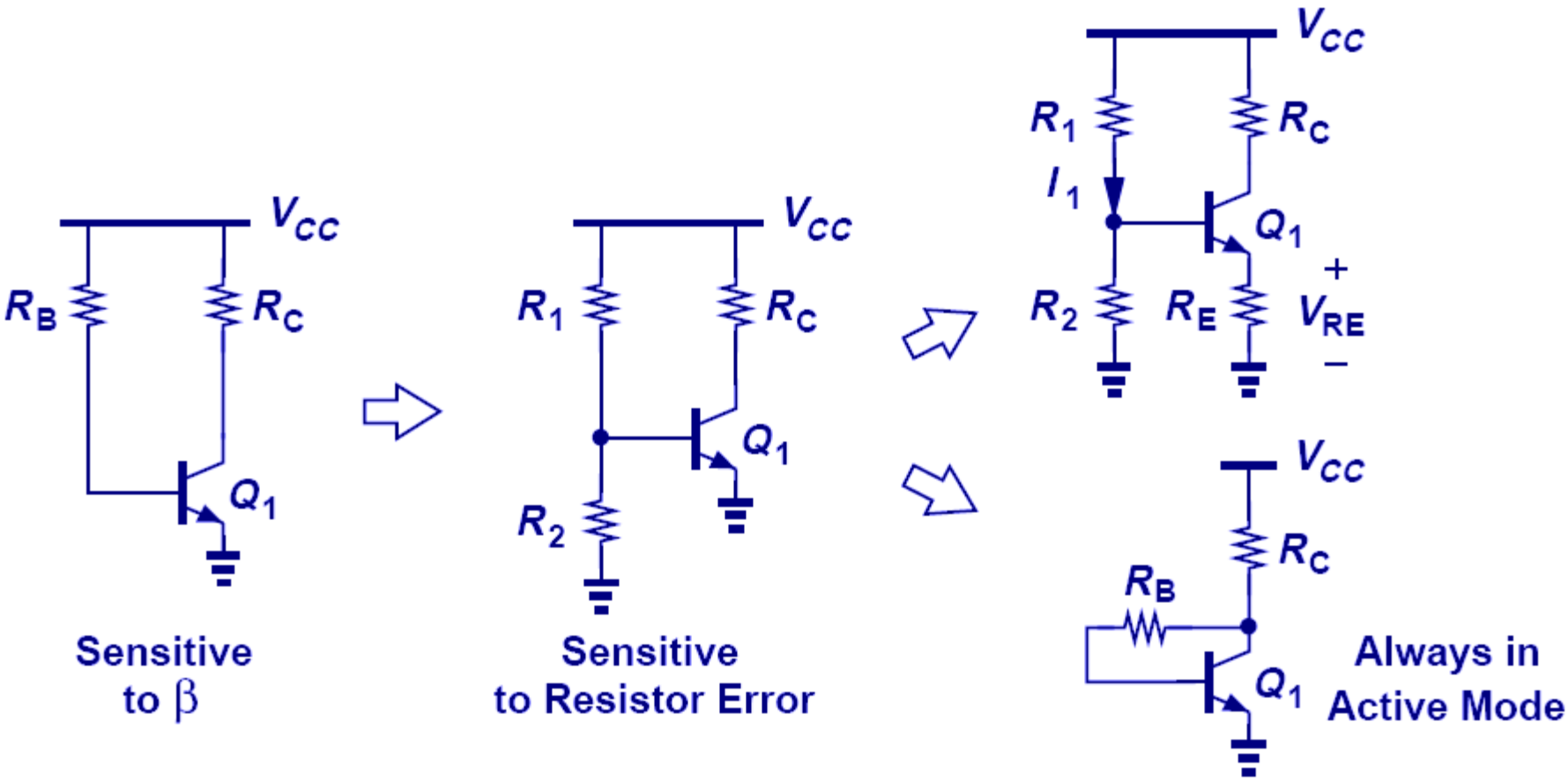
$$g_m = 20\frac{mA}{V} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{I_C}{0.026} \Longrightarrow I_C = 0.52\ mA \Longrightarrow I_E = 0.53\ mA,\ I_B = 0.005 mA$$

$$V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) = 0.82\ V$$

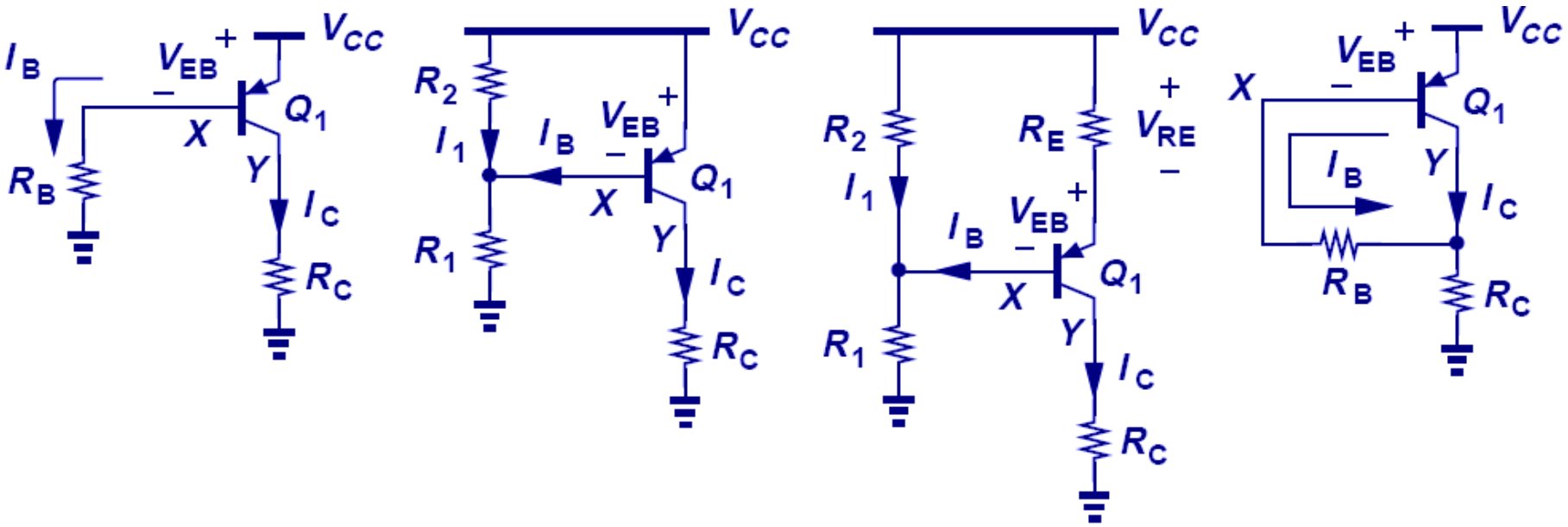
$$Assume: \quad R_C >> \frac{R_B}{\beta} \equiv 0.1R_C = \frac{R_B}{\beta} \Longrightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta}} \cong \frac{2.5 - 0.82}{1.1R_C} = 0.52 mA$$

$$\Longrightarrow R_C = 2.94k, R_B = 29.4k$$

جمع بندی روش های مختلف بایاس ترانزیستور



روش های مختلف بایاس ترانزیستور PNP

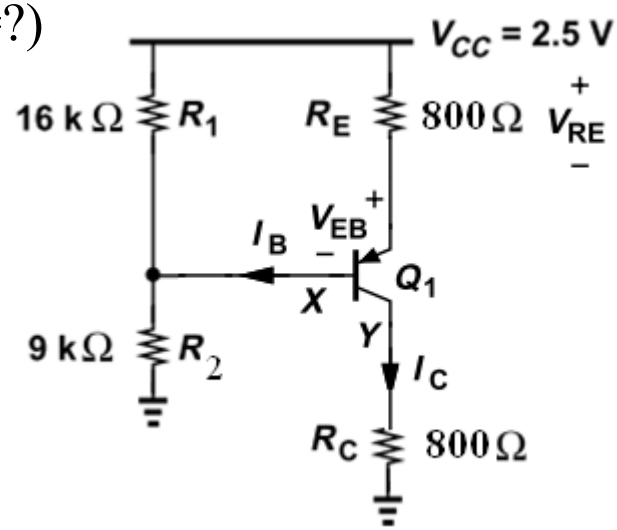


- همان مفاهیمی که در مورد بایاس ترانزیستور NPN بیان شد به سادگی قابل تعمیم به ترانزیستور PNP است.

مثال

Determine the operating point of Q1. (I_C=?, I_B=?,V_{EC}=?)

$$I_S = 5\times10^{-17} A, \quad \beta = 100$$



$$V_X \cong \frac{R_2}{R1+R_2}\times V_{CC} = 0.9\,V$$

$$V_{R_E} = V_{CC} - (V_X + V_{EB}) =$$

$$I_C \cong I_E = \frac{V_{R_E}}{R_E}$$

$$\Longrightarrow I_C = \frac{1.6 - V_{EB}}{0.8\,k}, V_{EB} = 0.026 \ln\left(\frac{I_C}{5\times10^{-14}\,mA}\right)$$

Assume: V_{EB}=0.7 V ➔ I_C=1.1 mA ➔ V_{EB}=0.798 V

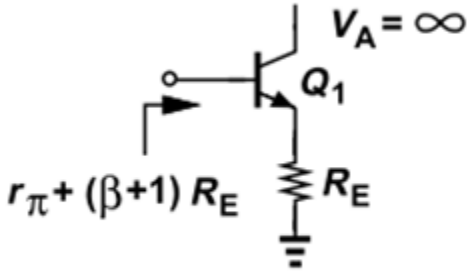
V_{EB}=0.798 V ➔ I_C=1 mA ➔ V_{EB}=0.796 V

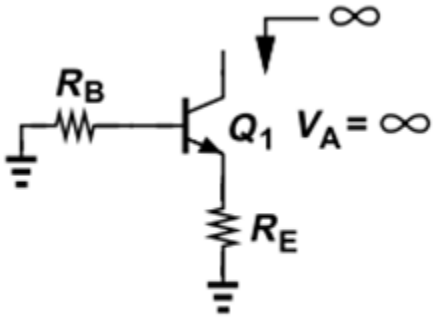
The operating point is independent of β, I_S.

$$V_{EC} = 2.5 - 0.8k\times1.1\,mA - 0.8k\times1.1\,mA = 1.76\,V > V_{EB} = 0.79\,V$$

سه نکته مهم در مورد امپدانس دیده شده از پایه های ترانزیستور

$$\frac{r_\pi + R_B}{\beta+1} \approx \frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta+1}$$

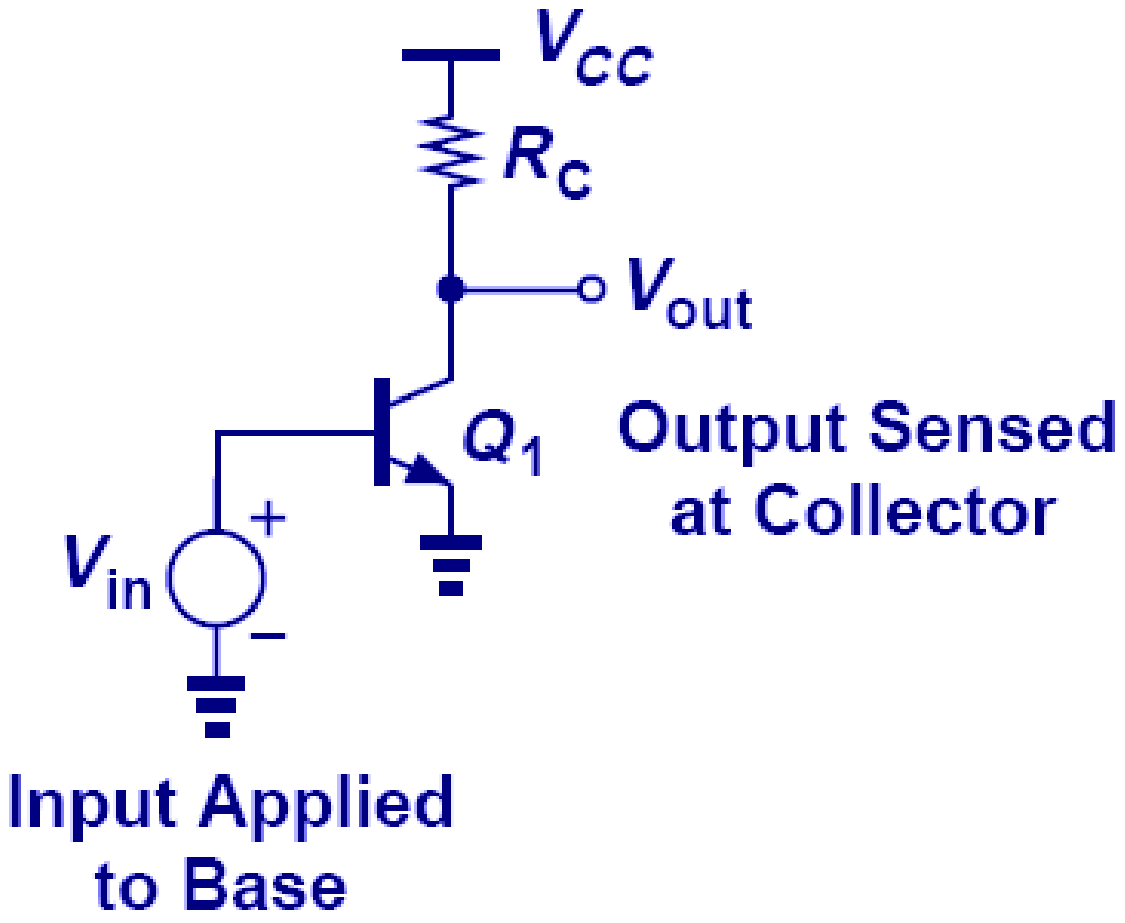




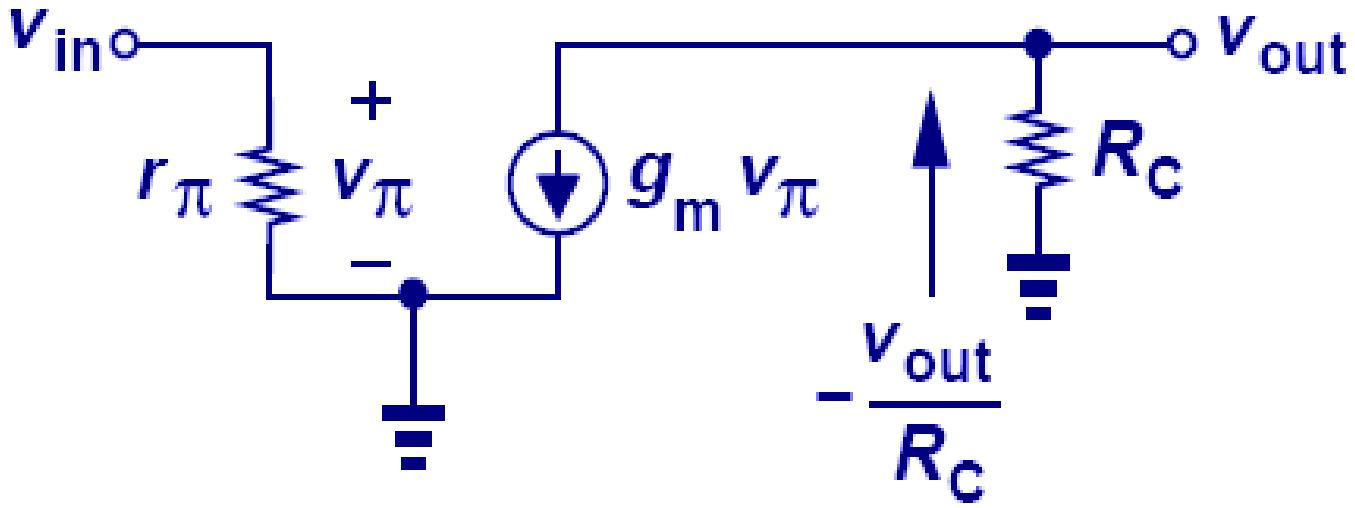
مطالعه ساختار تقویت کننده امیتر مشترک

- تحلیل تقویت کننده CE
  - در نظر گرفتن اثر ارلی
- تحلیل تقویت کننده CE با مقاومت موجود در امیتر
- تقویت کننده CE به همراه مدار بایاس

ساختار تقویت کننده امیتر مشترک



تحلیل سیگنال کوچک تقویت کننده CE

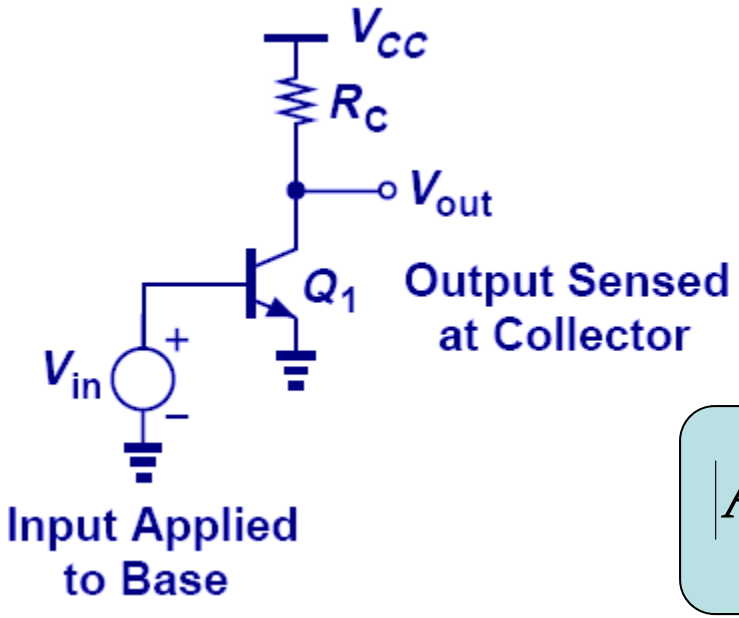


$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

$$-\frac{v_{out}}{R_C} = g_m v_\pi = g_m v_{in}$$

$$A_v = -g_m R_C$$

محدودیت در مقدار بهره ولتاژ



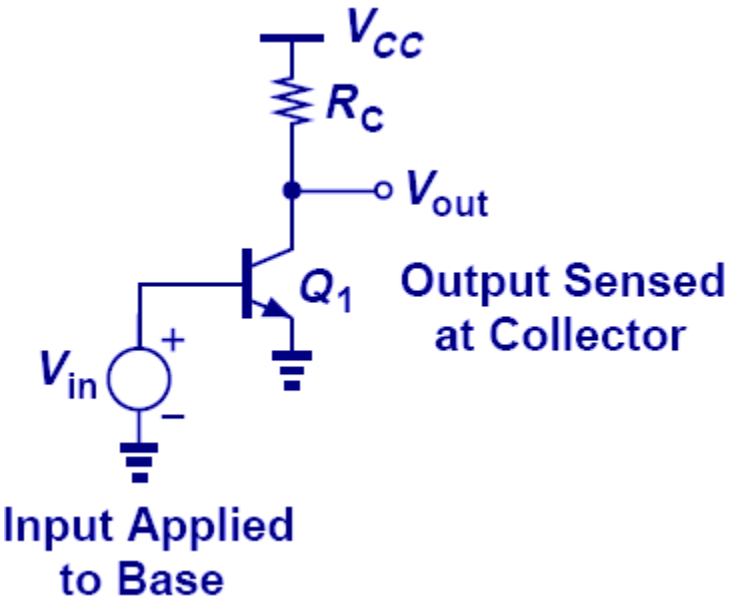
$$|A_v| = \frac{I_C R_C}{V_T} \qquad |A_v| = \frac{V_{RC}}{V_T} \qquad |A_v| < \frac{V_{CC} - V_{BE}}{V_T}$$

مثال

Determine the maximum achievable voltage-gain of the following C.E amplifier.

a) Assume V_{CC}=2.5 V

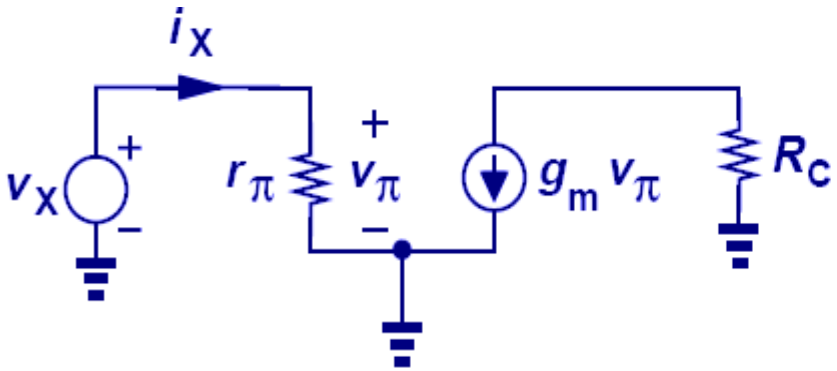
b) Assume V_{CC}=5 V



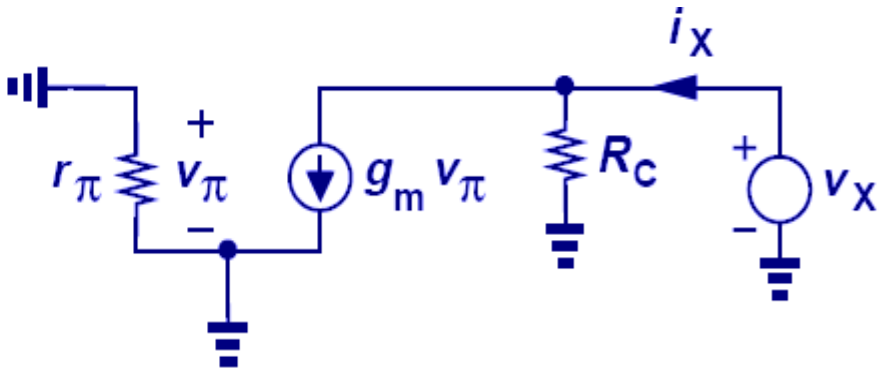
$$a)\quad |A_v| < \frac{V_{CC}-V_{BE}}{V_T} \cong \frac{2.5-0.7}{0.026} = 69$$

$$b)\quad |A_v| < \frac{V_{CC}-V_{BE}}{V_T} \cong \frac{5-0.7}{0.026} = 165$$

امپدانس ورودی و خروجی



(a)

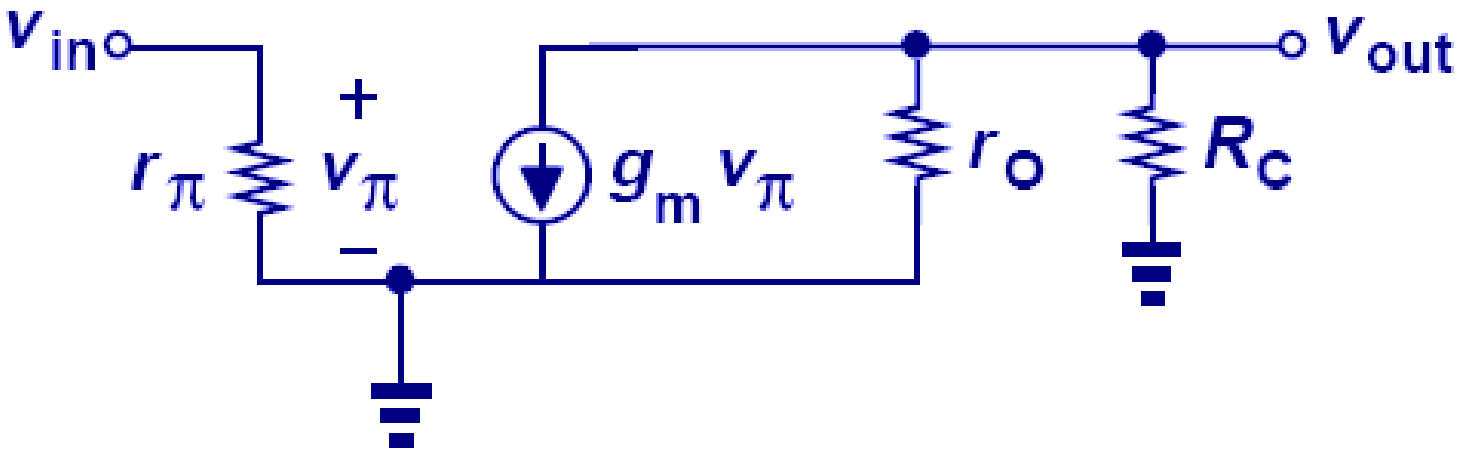


(b)

$$R_{in} = \frac{v_X}{i_X} = r_\pi$$

$$R_{out} = \frac{v_X}{i_X} = R_C$$

در نظر گرفتن اثر ارلی



$$A_v = -g_m(R_C \| r_O)$$

$$R_{out} = R_C \| r_O$$

- به دلیل موازی شدن مقاومت r_o با R_C، پدیده ارلی باعث کاهش بهره ولتاژ تقویت کننده امیتر-مشترک می شود.

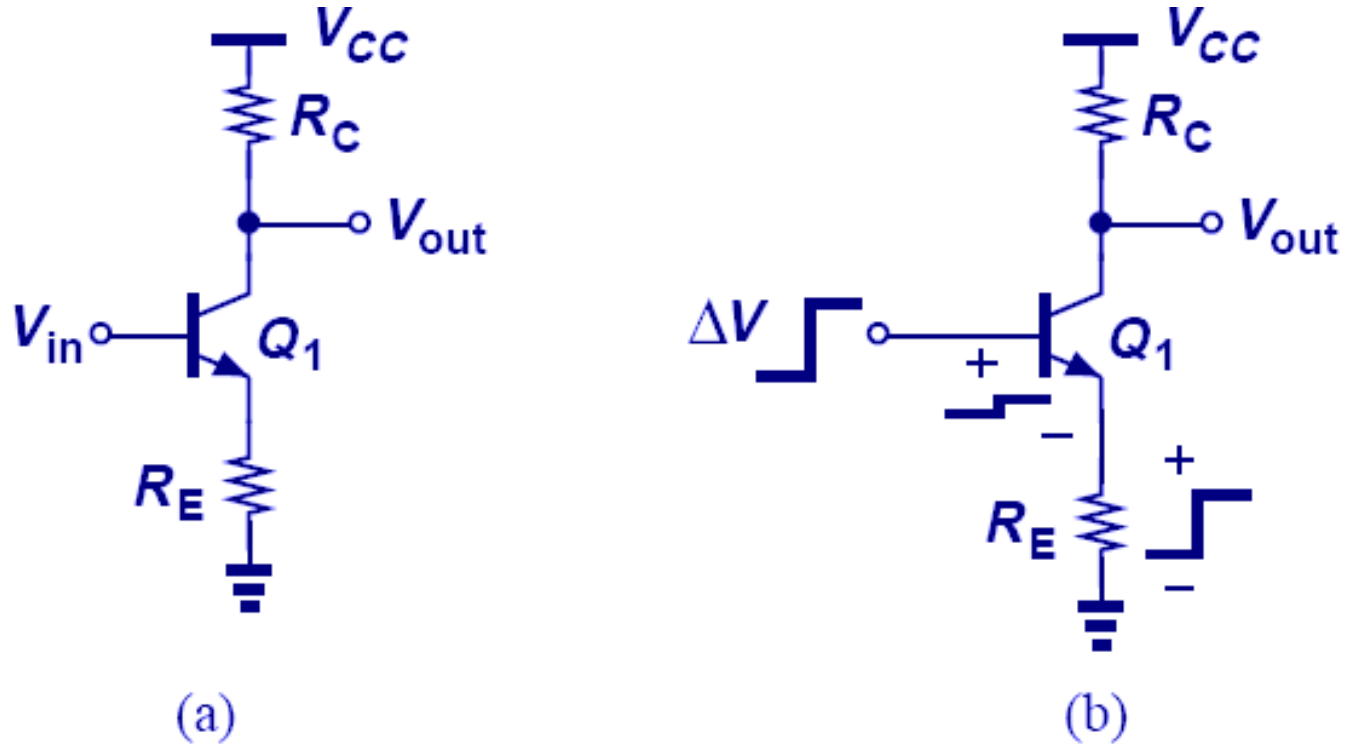
بهره جریان

$$A_I = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

$$A_I\big|_{CE} = \beta$$

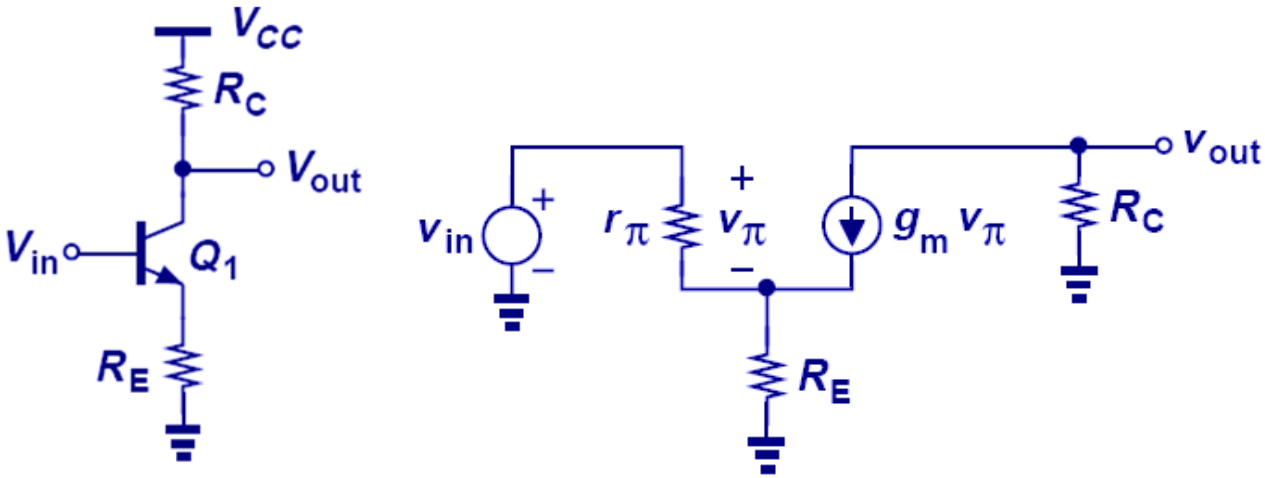
- نسبت جریان تحویل داده شده به بار به جریان وارد شونده به ورودی تقویت کننده را بهره جریان تقویت کننده می گوییم.
- بهره جریان تقویت کننده امیتر مشترک برابر β با است.

Emitter Degeneration



- اگر یک مقاومت در امیتر قرار بدهیم با این کار عملا بهره تقویت کننده را کاهش می دهیم. (در اسلاید های بعدی اثبات خواهیم کرد.)
- اگر چه ساختار فوق بهره تقویت کننده را کاهش می دهد ولی در عمل باعث بهبود رفتار خطسانی تقویت کننده و افزایش امپدانس ورودی می شود.

مدار معادل سیگنال کوچک

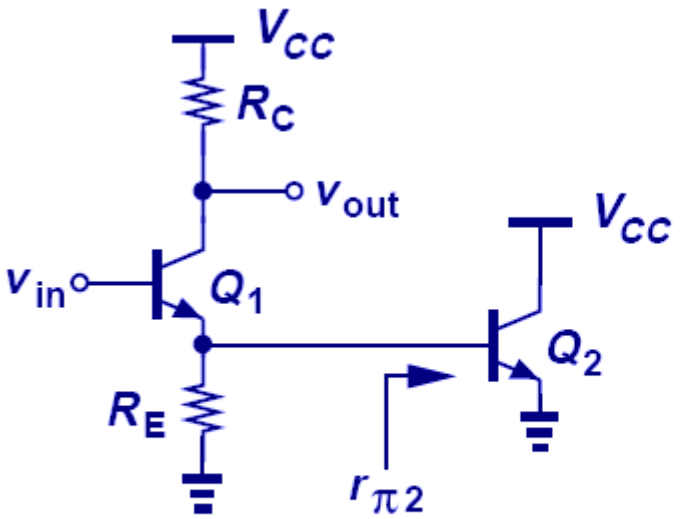


$$A_v \cong -\frac{g_m R_C}{1 + g_m R_E}$$

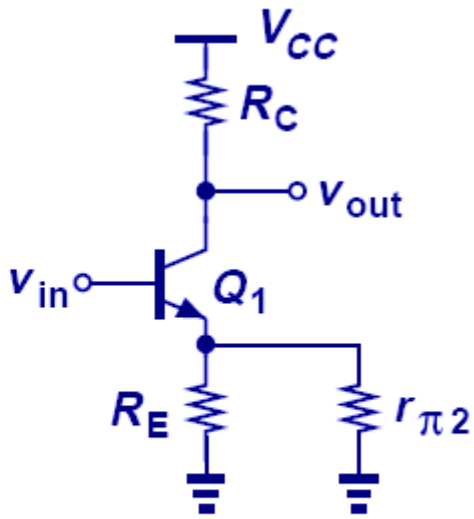
$$A_v \cong -\frac{R_C}{\frac{1}{g_m} + R_E}$$

- **نکته جالب:** بهره ولتاژ از تقسیم امپدانس موجود در کلکتور بر امپدانس موجود در امیتر به علاوه $\frac{1}{g_m}$ به دست می آید.

مثال 1



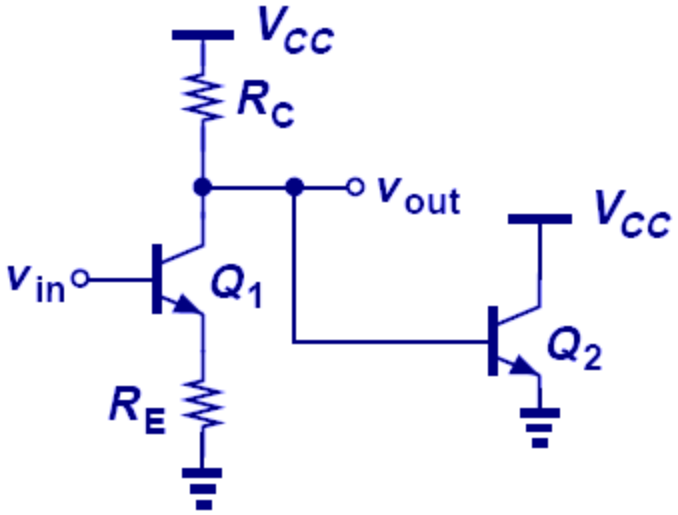
(a)



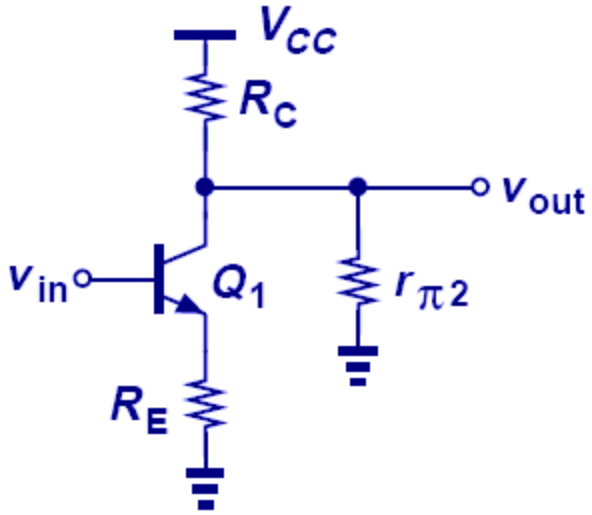
(b)

$$A_v = -\frac{R_C}{\frac{1}{g_{m1}} + R_E \| r_{\pi 2}}$$

مثال 2



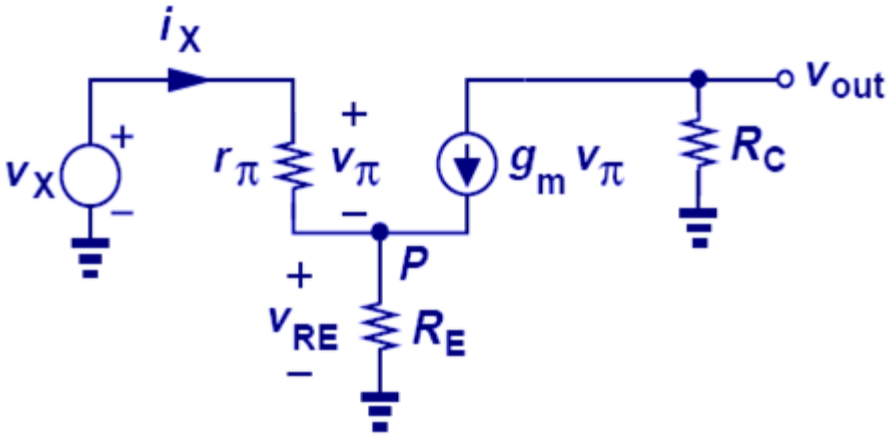
(a)



(b)

$$A_v = -\frac{R_C \parallel r_{\pi 2}}{\frac{1}{g_{m1}} + R_E}$$

امپدانس ورودی



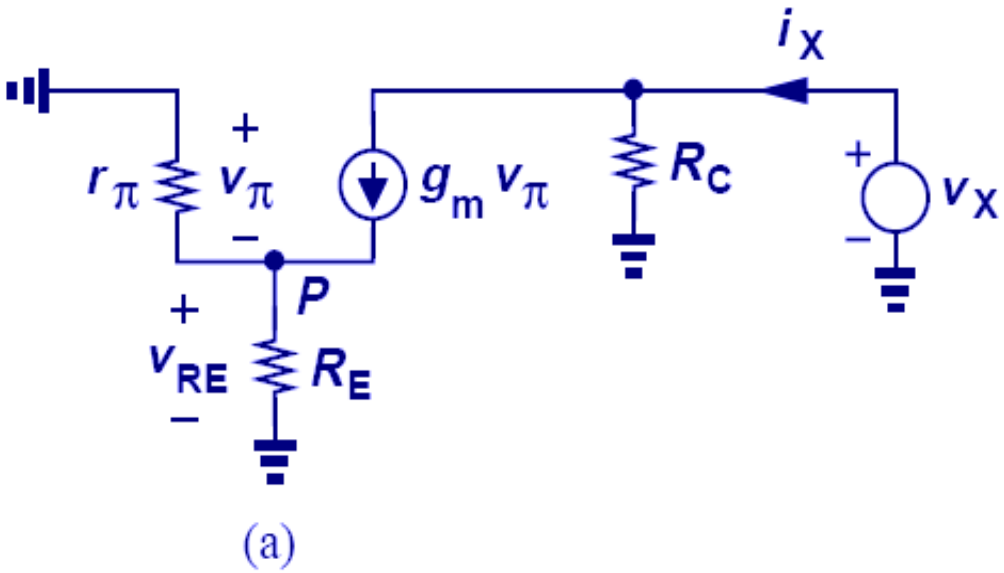
$$V_A = \infty$$

$$v_X = r_\pi i_X + R_E(1+\beta)i_X$$

$$R_{in} = \frac{v_X}{i_X} = r_\pi + (\beta+1)R_E$$

- مشاهده می شود که قرار دادن مقاومت در امیتر باعث افزایش امپدانس ورودی شده است.

امپدانس خروجی



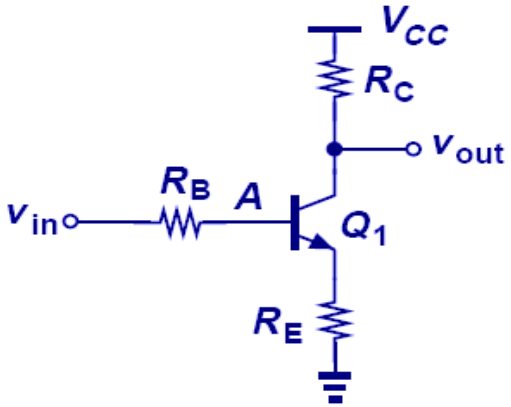
$$V_A = \infty$$

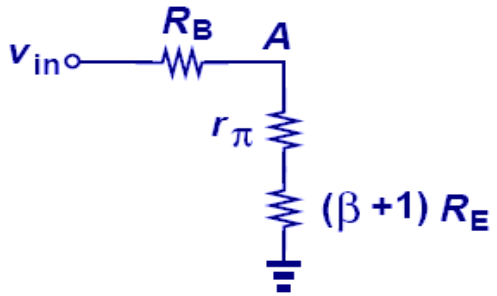
$$v_{in} = 0 = v_\pi + \left(\frac{v_\pi}{r_\pi} + g_m v_\pi \right) R_E \Rightarrow v_\pi = 0$$

$$R_{out} = \frac{v_X}{i_X} = R_C$$

- مشاهده می شود که امپدانس خروجی تغییر نکرده است.

تقویت کننده امیتر-مشترک با مقاومت موجود در امیتر و بیس





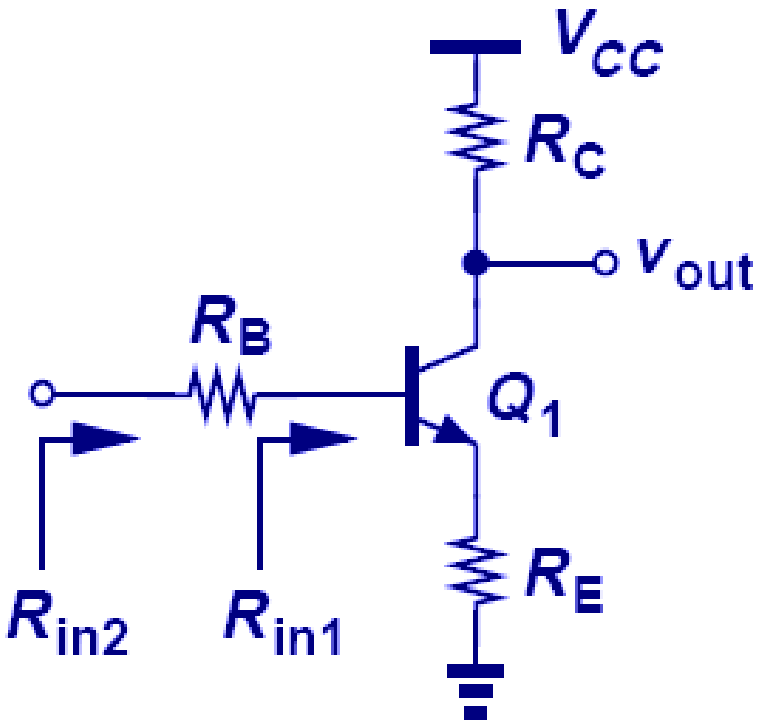
$$V_A = \infty$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v_A}{v_{in}} \cdot \frac{v_{out}}{v_A}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-\beta R_C}{r_\pi + (\beta+1)R_E + R_B}$$

$$A_v \approx \frac{-R_C}{\frac{1}{g_m} + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

امپدانس ورودی/خروجی



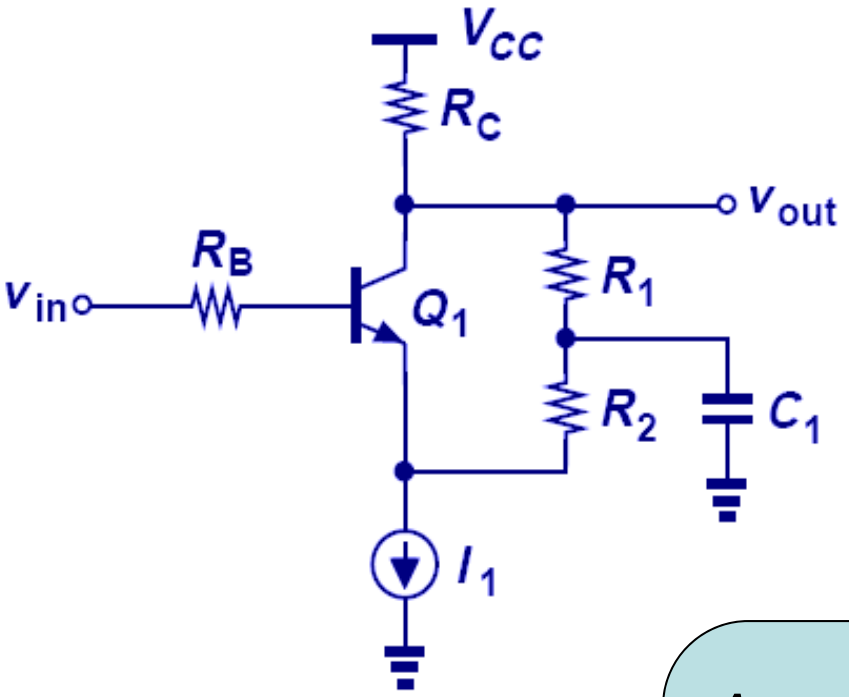
$$V_A = \infty$$

$$R_{in1} = r_\pi + (\beta + 1)R_E$$

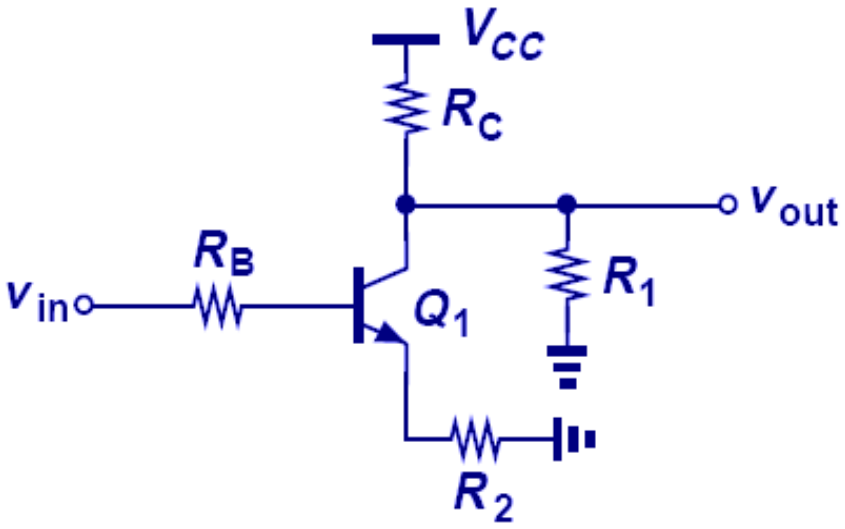
$$R_{in2} = R_B + r_{\pi 2} + (\beta + 1)R_E$$

$$R_{out} = R_C$$

مثال 3



(a)



(b)

$$A_v = \frac{-(R_C \,||\, R_1)}{\frac{1}{g_m} + R_2 + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

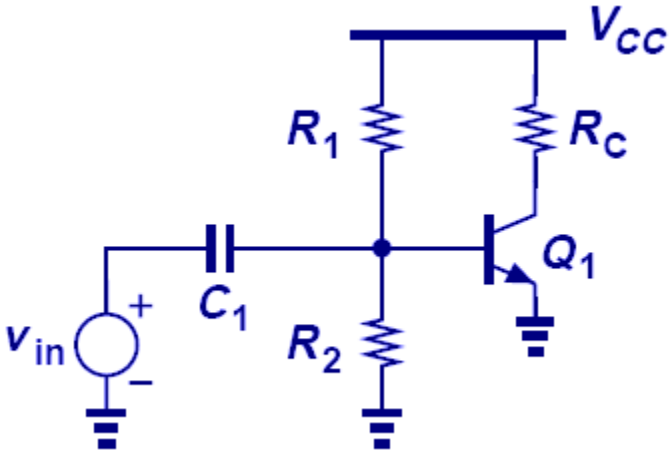
$$R_{in} = r_\pi + (\beta+1)R_2$$

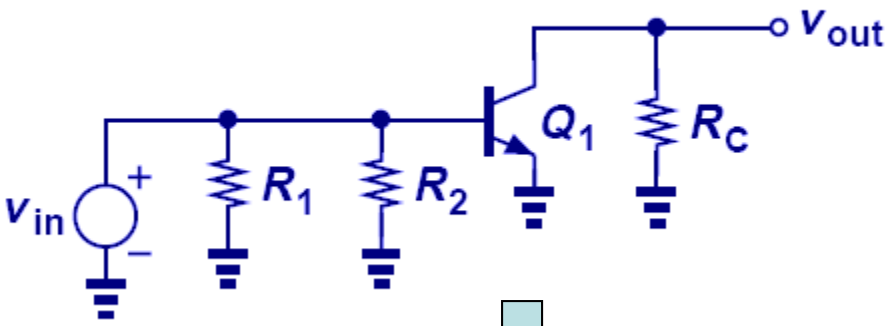
$$R_{out} = R_C \,||\, R_1$$

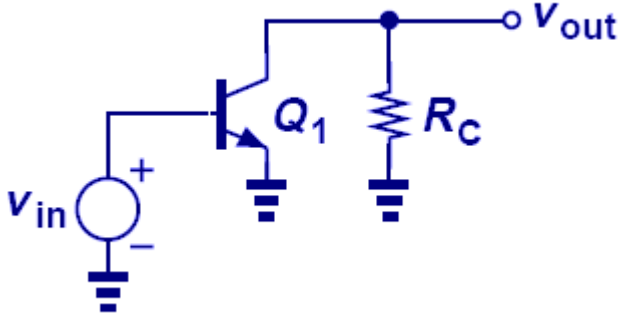
مطالعه تقویت کننده امیتر-مشترک

- Analysis of CE Core
  - Inclusion of Early Effect
- Emitter Degeneration
- *CE Stage with Biasing*

تقویت کننده امیتر مشترک به همراه مدار بایاس





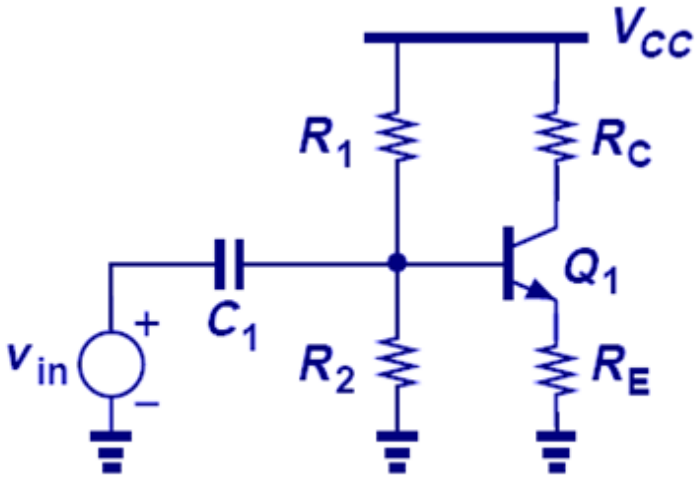


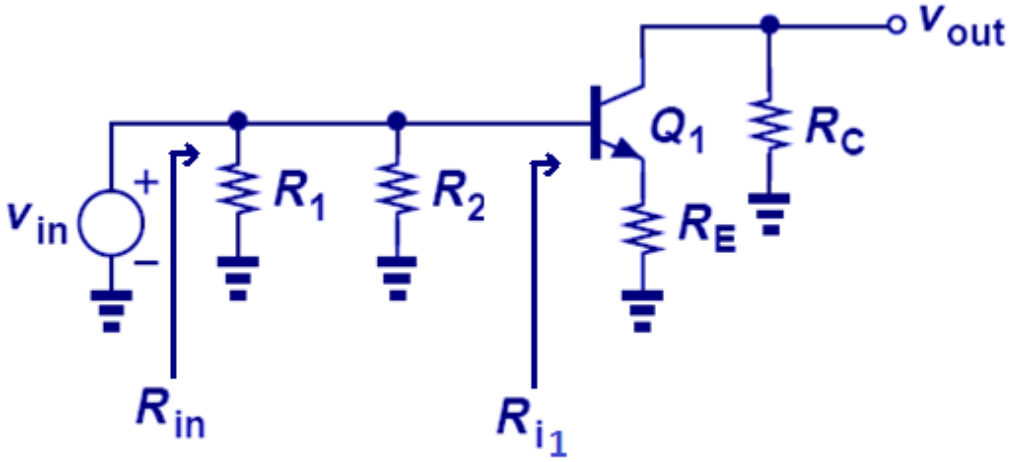
$$A_v = -g_m(R_C \| r_O)$$

$$R_{in} = r_\pi \| R_1 \| R_2$$

$$R_{out} = R_C \| r_O$$

تقویت کننده امیتر مشترک به همراه مدار بایاس مقاوم





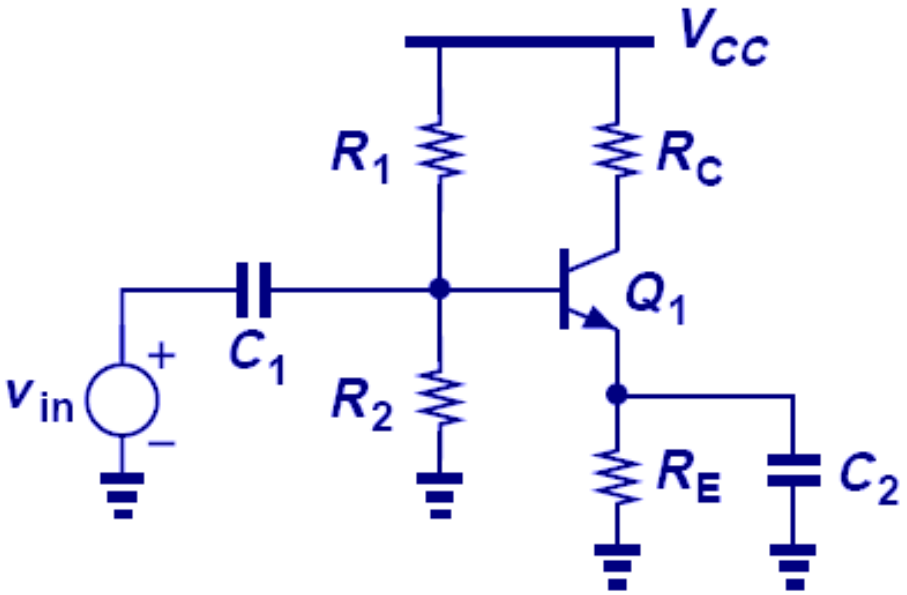
$$V_A = \infty$$

$$A_v = \frac{-R_C}{\frac{1}{g_m} + R_E}$$

$$R_{in} = [r_\pi + (\beta+1)R_E] \| R_1 \| R_2$$

$$R_{out} = R_C$$

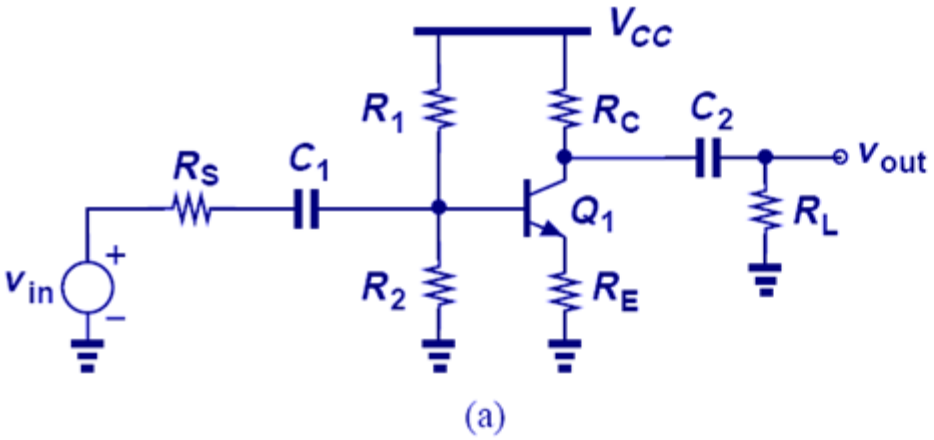
برطرف کردن اثر مقاومت R_E در تحلیل AC



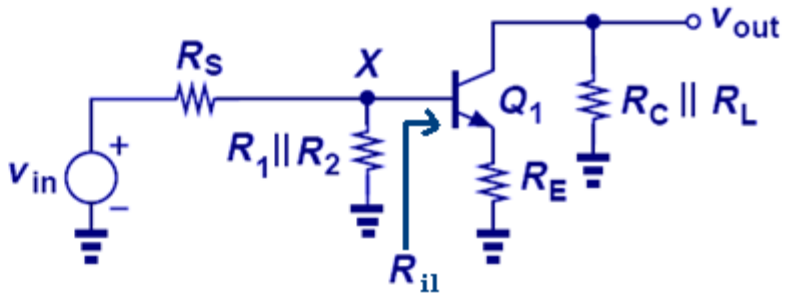
$$A_v = -g_m R_C$$
$$R_{in} = r_\pi \parallel R_1 \parallel R_2$$
$$R_{out} = R_C$$

- در فرکانس های بالا خازن C2 اتصال کوتاه می شود و لذا دیگر کاهش بهره نخواهیم داشت.

تقویت کننده امیتر مشترک با تمام جزئیات
راه حل 1



(a)

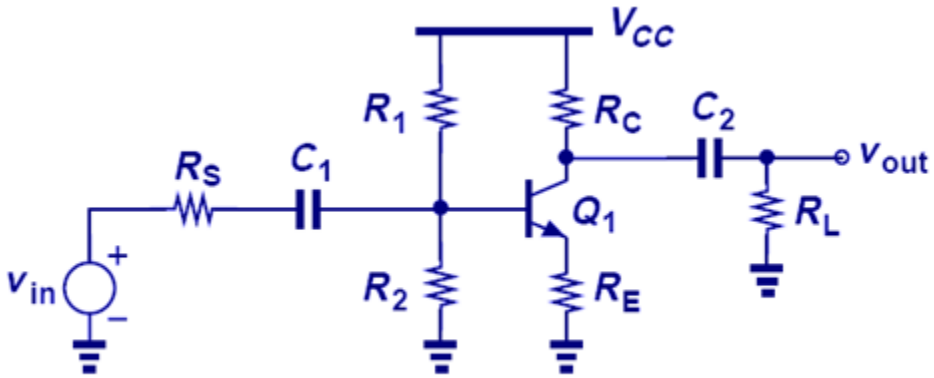


(b)

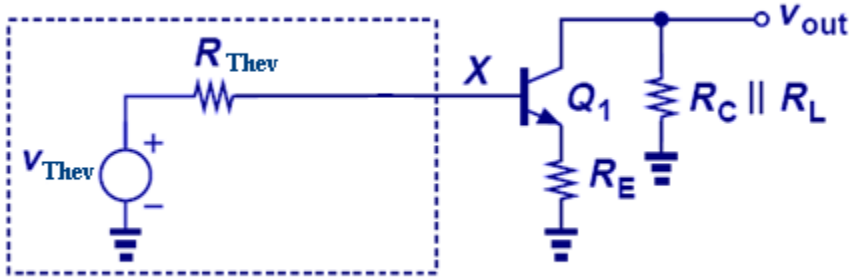
$$R_{i1} = r_\pi + (1+\beta)R_E$$

$$A_v = \frac{v_X}{v_{in}} \times \frac{v_{out}}{v_X} \cong \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{i1}}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{i1} + R_S} \times \frac{-R_C \parallel R_L}{\frac{1}{g_m} + R_E}$$

تقویت کننده امیتر مشترک با تمام جزئیات
راه حل 2



(a)



(b)

$$R_{Thev} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_S$$

$$v_{Thev} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R_S}$$

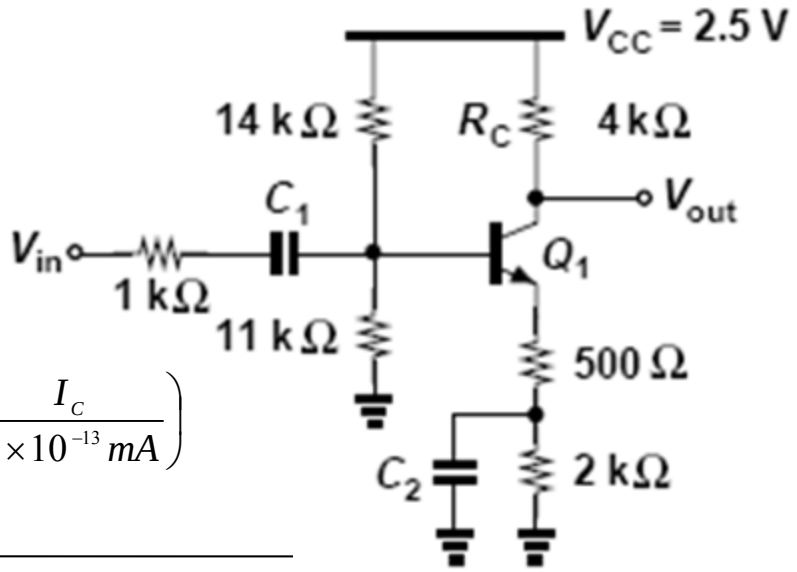
Regarding to slide#47, we have:

$$A_v = \frac{-R_C \parallel R_L}{\frac{1}{g_m} + R_E + \frac{R_s \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta + 1}} \times \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R_S}$$

مثال

Calculate the voltage gain.

$$I_S = 8\times10^{-16} A, \quad \beta = 100, \quad V_A = \infty$$



$$\left.\begin{aligned} V_B &\cong \frac{11k}{11k+14k}\times 2.5 = 1.1\,V \\ V_E &= V_B - V_{BE} \\ I_C &\cong I_E = \frac{V_E}{2.5k} \end{aligned}\right\} \Longrightarrow I_C = \frac{1.1 - V_{BE}}{2.5\ k}, V_{BE} = 0.026 \ln\left(\frac{I_C}{8\times10^{-13}\ mA}\right)$$

Assume: V_{BE}=0.7 V ➔ I_C=0.16 mA ➔ V_{BE}=0.68 V

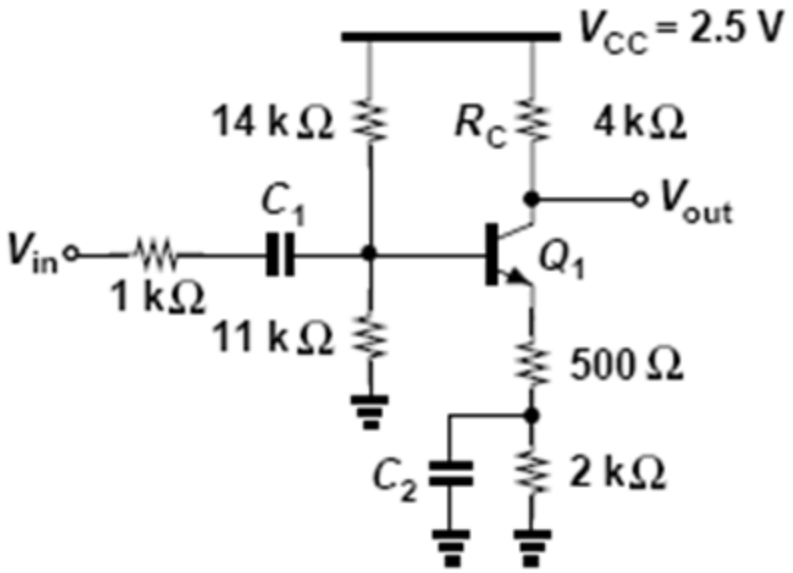
V_{BE}=0.68 V ➔ I_C=0.17 mA ➔ V_{BE}=0.68 V

$$V_{CE} = 2.5 - 4k\times0.17\ mA - 2.5k\times0.17\ mA = 1.4\,V > V_{BE} = 0.68\,V$$

$$I_B = 1.7\ \mu A << \frac{2.5}{25k} = 100\ \mu A$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0.17mA}{0.026} = 6.5\frac{mA}{V} \qquad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{6.5k} = 15.4k$$

ادامه

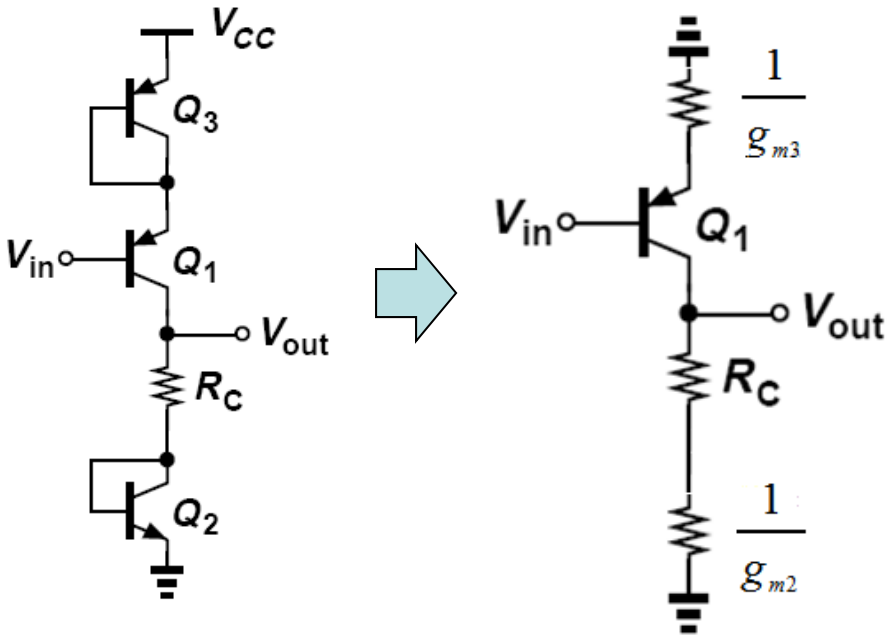


$$A_V = -\frac{4k}{\frac{1}{g_m} + 0.5k + \frac{11k \,||\, 14k \,||\, 1k}{1+\beta}} \times \frac{11k \,||\, 14k}{11k \,||\, 14k + 1k}$$

$$= -\frac{4k}{0.15k + 0.5k + \frac{0.86}{101}} \times \frac{6.16k}{6.16k + 1k} = -6 \times 0.86 = -5.16$$

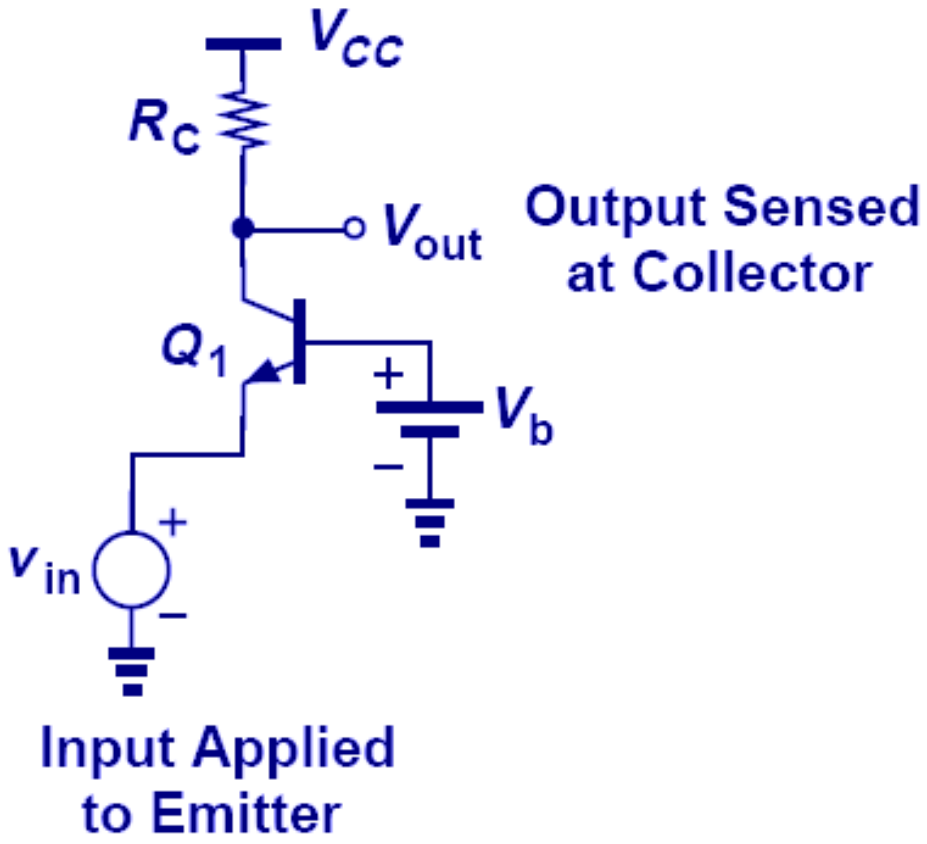
مثال

Calculate the voltage gain. $V_A = \infty$



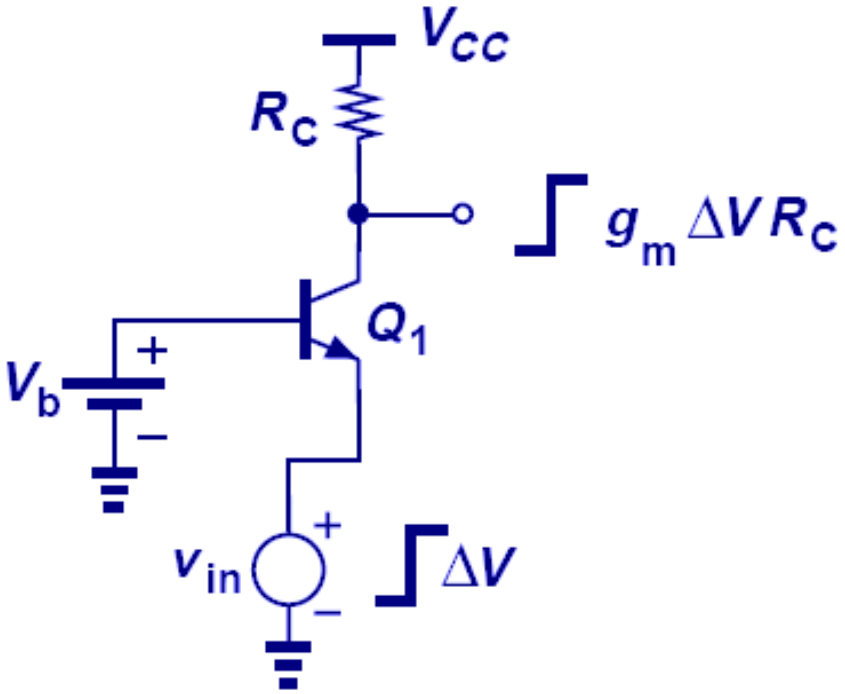
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{g_{m2}} + R_C}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m3}}}$$

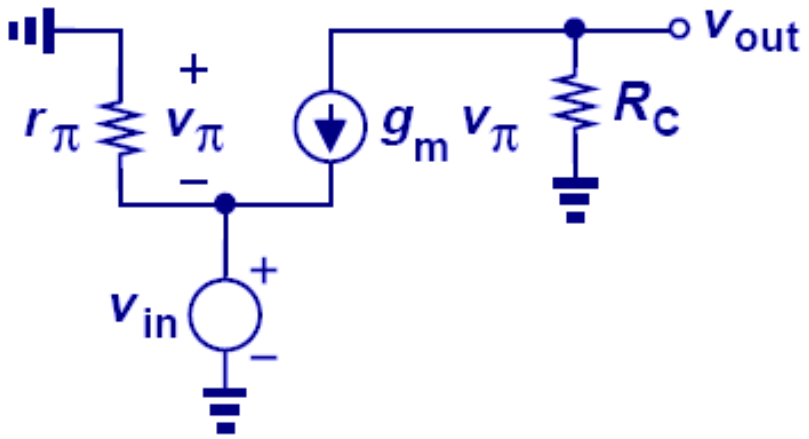
تقویت کننده بیس مشترک



- در این تقویت کننده سیگنال ورودی از پایه امیتر اعمال می شود. سیگنال خروجی از پایه کلکتور گرفته می شود. از طریق پایه بیس نیز ولتاژ بایاس اعمال می شود.

تقویت کننده بیس مشترک

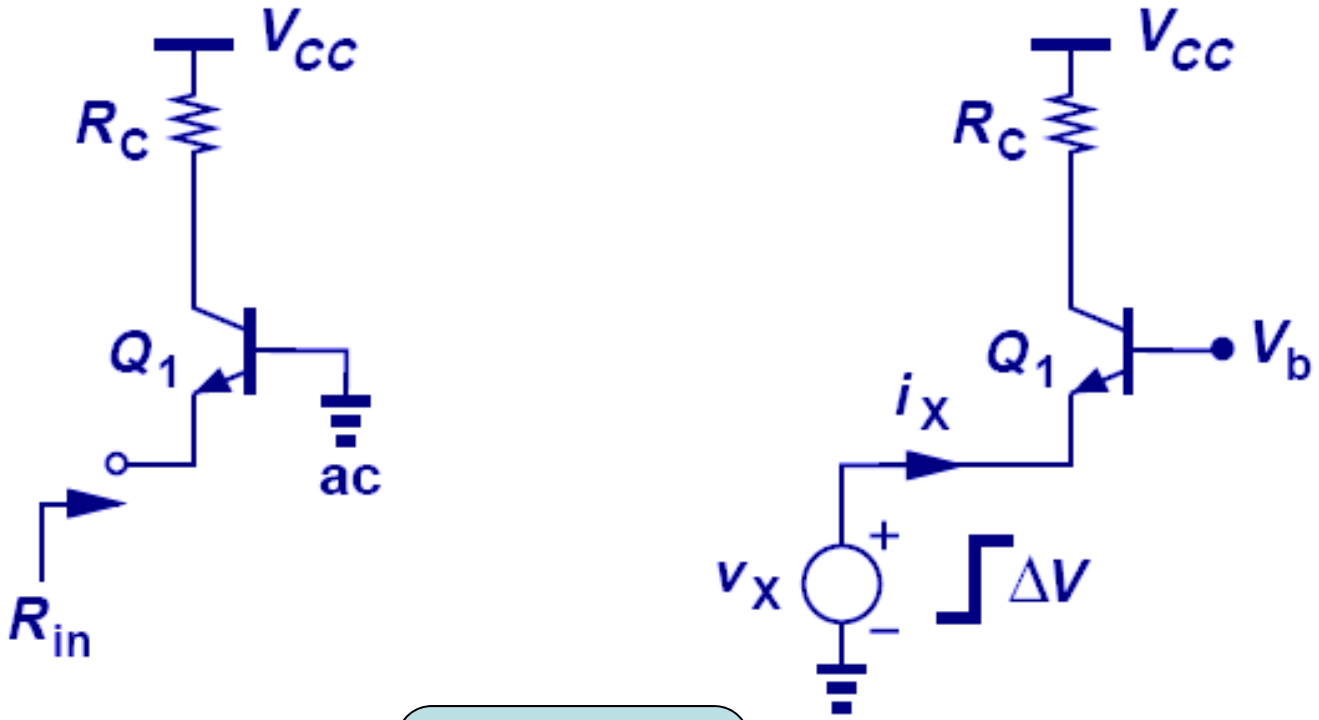




$$A_v = g_m R_C$$

- بهره تقویت کننده بیس مشترک همانند بهره تقویت کننده امیتر مشترک است با این تفاوت که بهره تقویت کننده **CB** مثبت است.

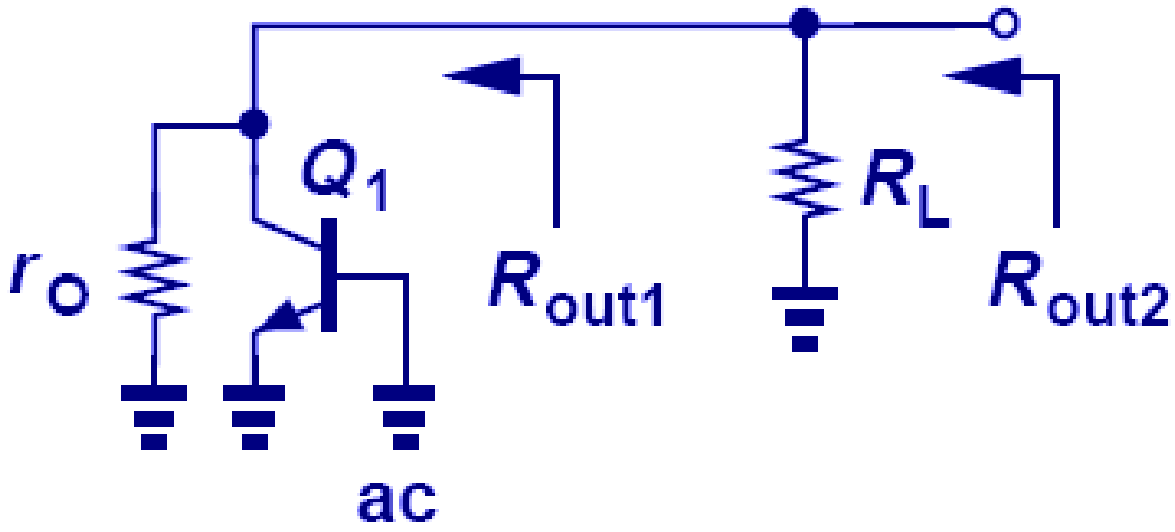
Input Impedance of CB



$$R_{in} = \frac{1}{g_m}$$

- امپدانس ورودی تقویت کننده CB بسیار کمتر از امپدانس ورودی تقویت کننده CE است.

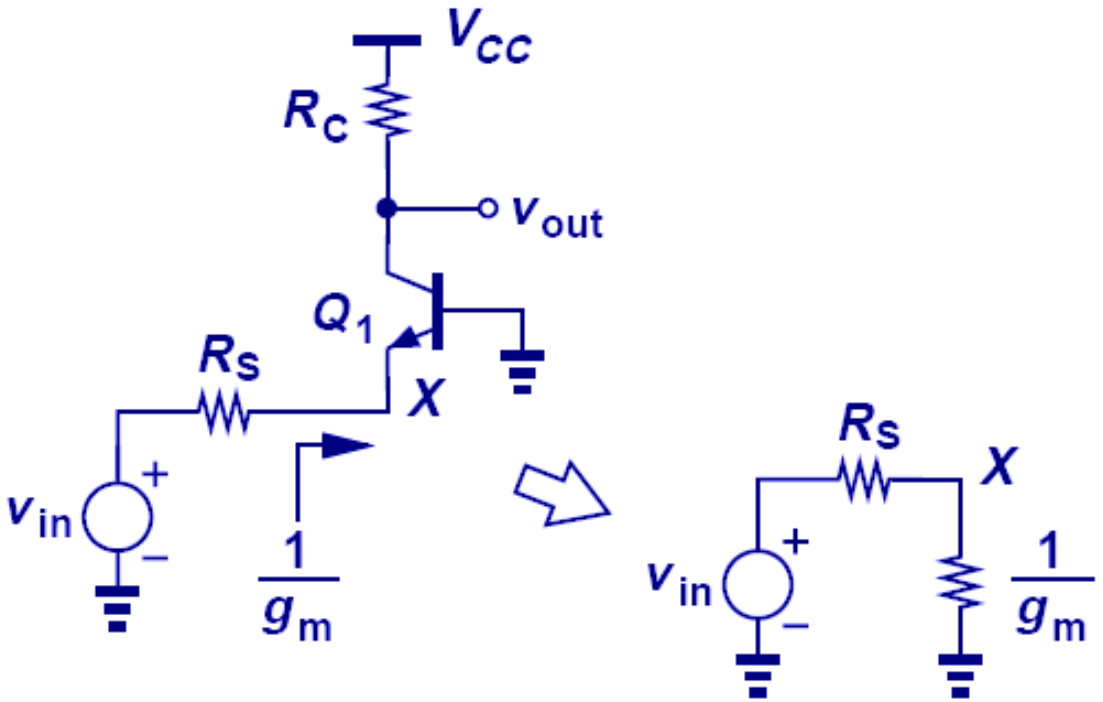
امپدانس خروجی طبقه بیس مشترک



$$R_{out} = r_O \,||\, R_C$$

- امپدانس خروجی تقویت کننده **CB** همانند امپدانس خروجی تقویت کننده **CE** است.

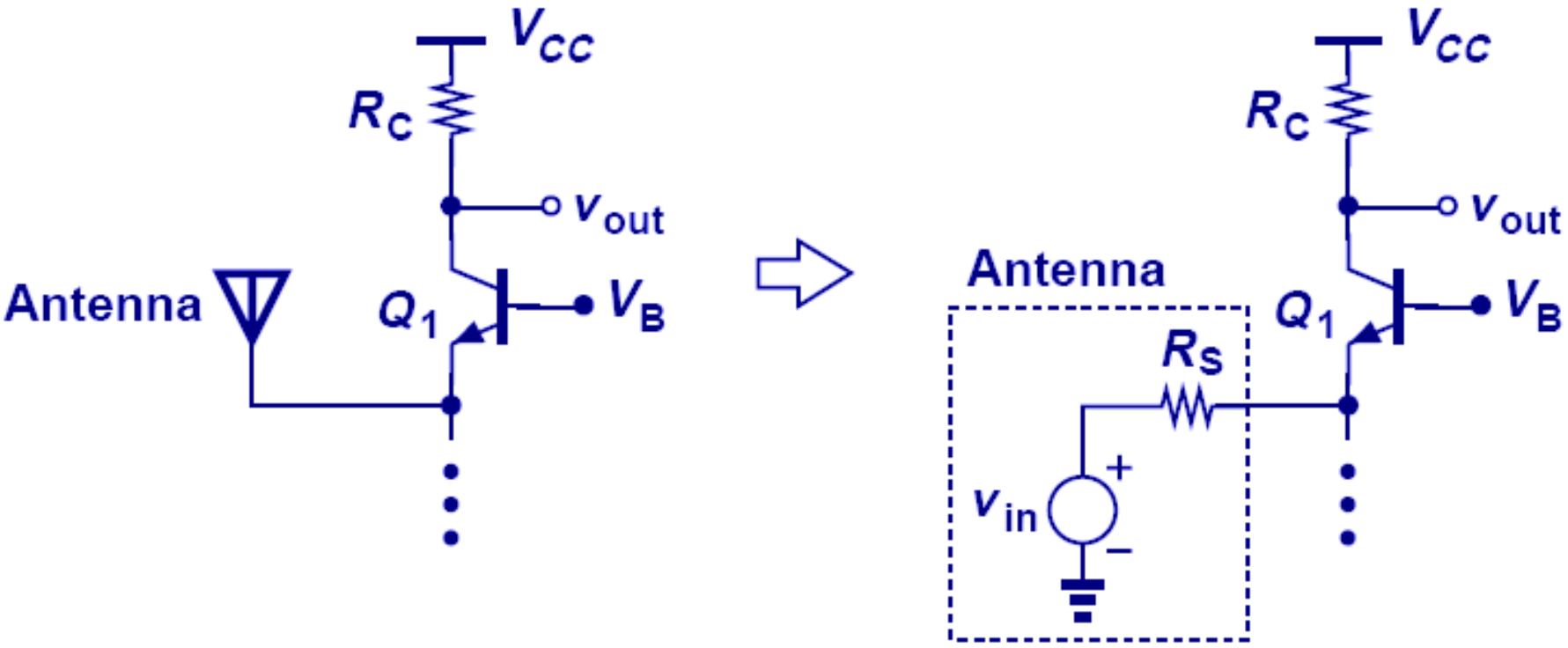
تقویت کننده CB با در نظر گرفتن امپدانس منبع سیگنال



$$A_v \cong \frac{R_C}{\frac{1}{g_m} + R_S}$$

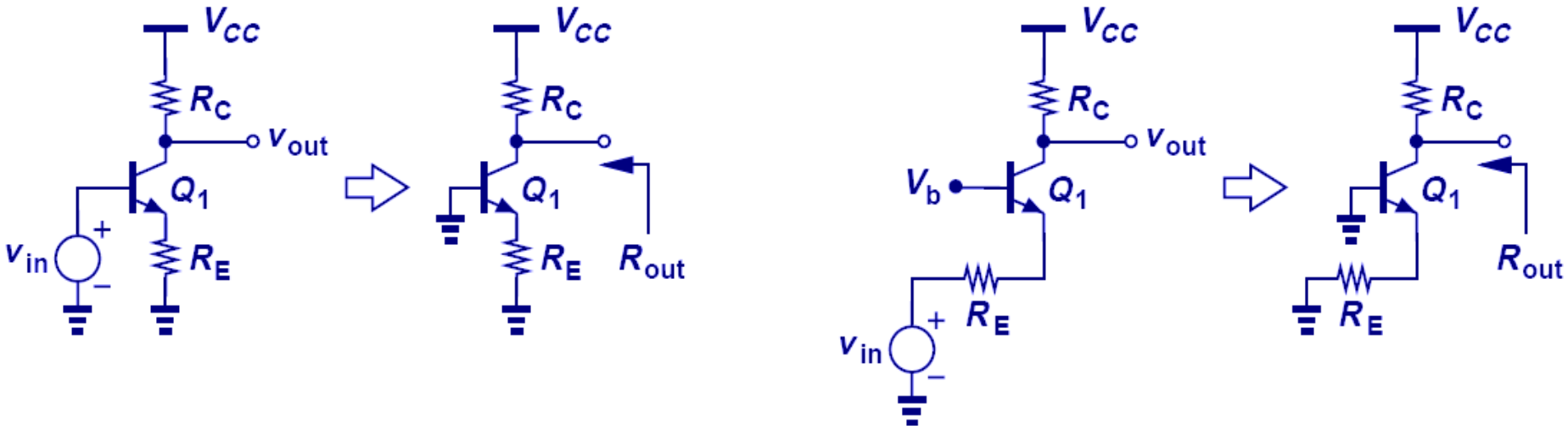
- وجود مقاومت در منبع سیگنال سبب می شود که ابتدا سیگنال تضعیف شود و سپس سیگنال تضعیف شده به تقویت کننده اعمال شود.
- در تقویت کننده فوق بهره ولتاژ همانند بهره ولتاژ تقویت کننده CE با مقاومت موجود در امیتراست. البته علامت بهره در تقویت کننده فوق مثبت است.

یک مثال عملی از تقویت کننده CB



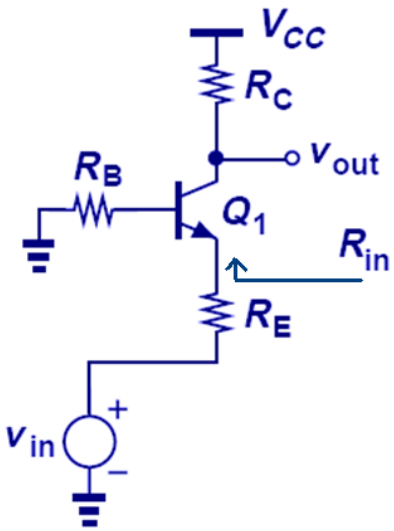
- آنتن ها معمولا امپدانس کم و در حد 50 اهم دارند. لذا سیگنال دریافتی از آنتن را بایستی به یک تقویت کننده با امپدانس ورودی کم اعمال کنیم تا شرط تطبیق امپدانس برقرار باشد. در این شرایط تقویت کننده CB گزینه مناسبی است.

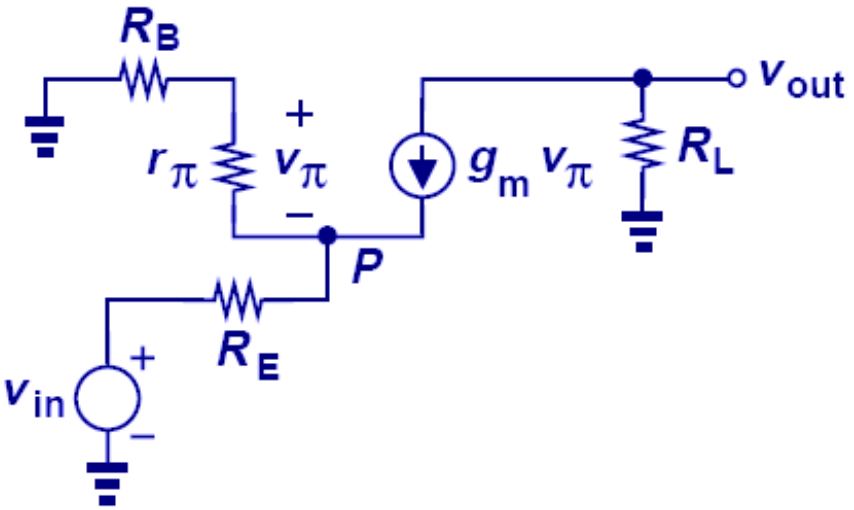
امپدانس خروجی طبقات CB و CE



- امپدانس خروجی تقویت کننده های CB و CE یکسان است چراکه برای محاسبه امپدانس خروجی بایستی منبع سیگنال را صفر کنیم. تحت این شرایط ملاحظه می شود که با مدارهای یکسانی مواجه خواهیم شد.

تقویت کننده بیس مشترک با مقاومت موجود در بیس
(محاسبه بهره ولتاژ)



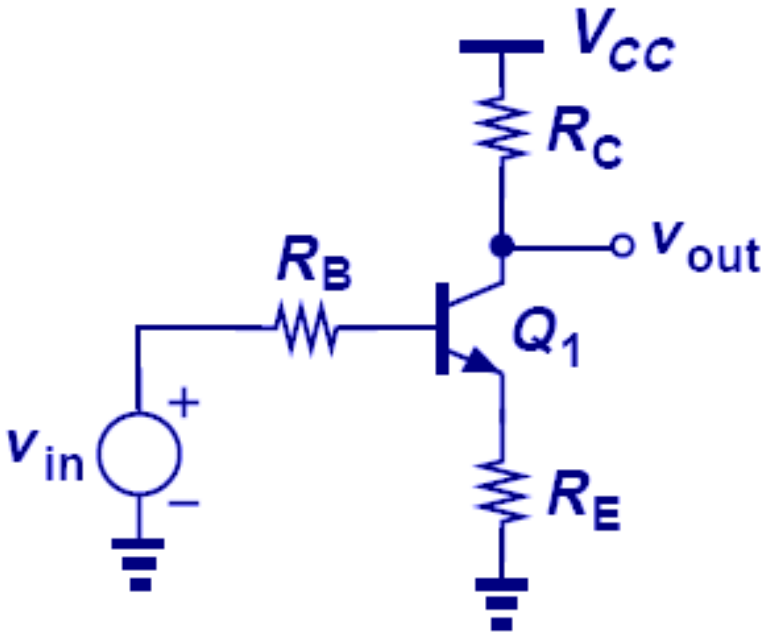


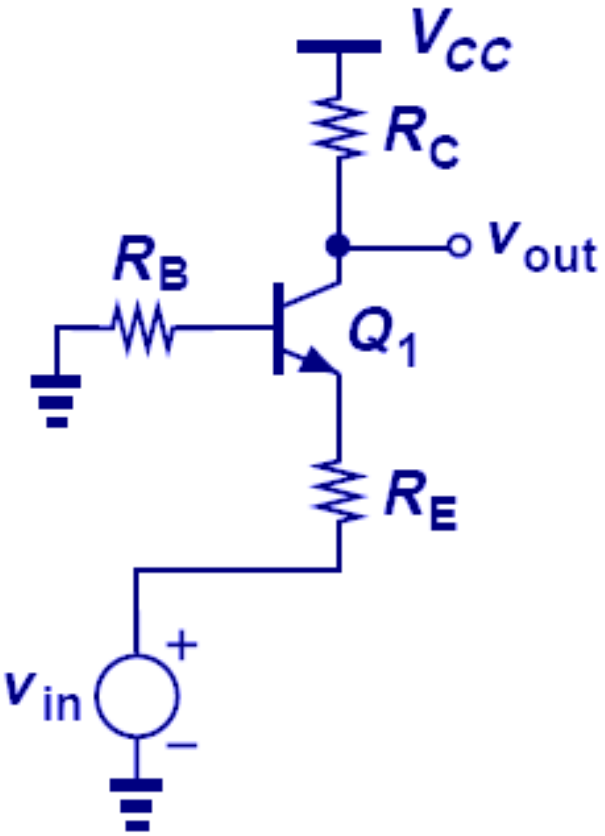
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\beta R_C}{(1+\beta)R_E + R_B + r_\pi}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} \approx \frac{R_C}{R_E + \frac{R_B}{\beta+1} + \frac{1}{g_m}}$$

- وجود مقاومت در بیس باعث کاهش بهره ولتاژ می شود.

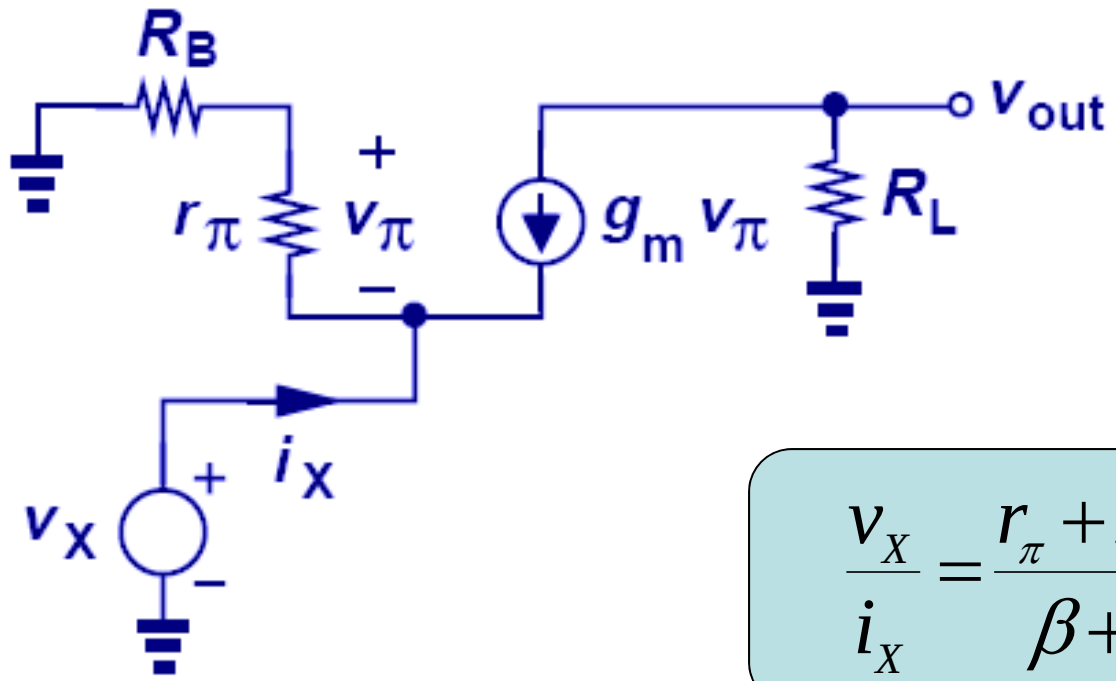
مقایسه تقویت کننده های CB و CE با مقاومت موجود در بیس و امیتر





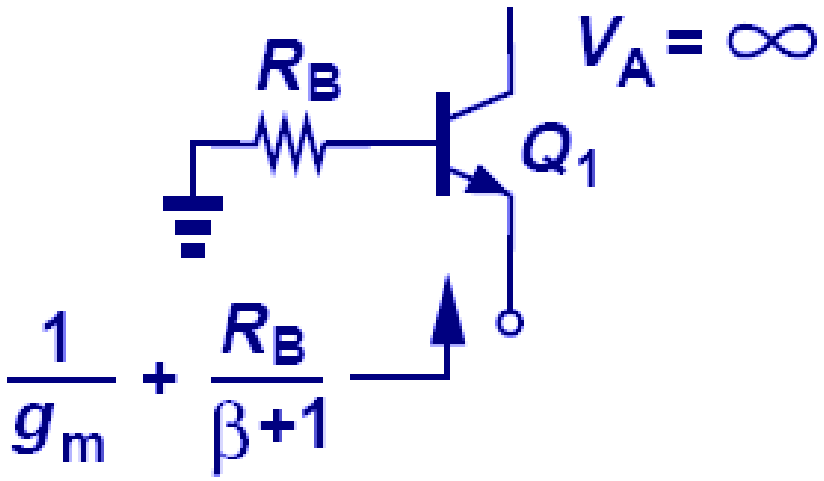
- صرف نظر از علامت بهره ولتاژ، بهره هر دو تقویت کننده یکسان است.

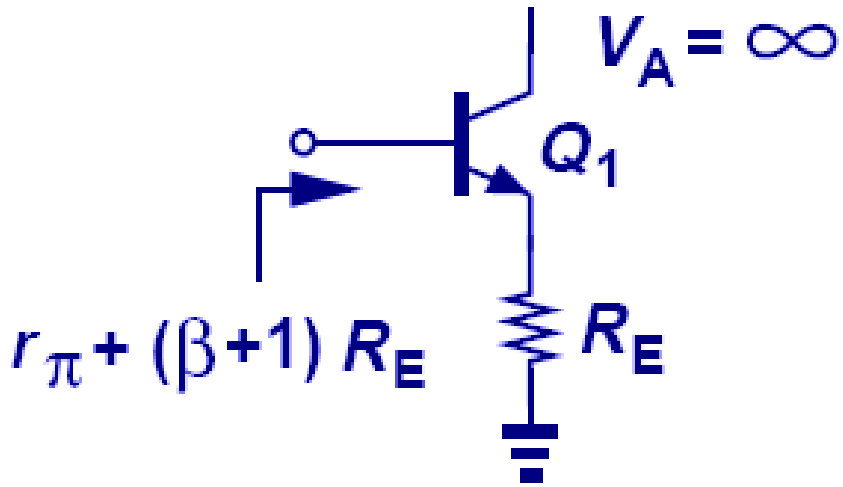
محاسبه امپدانس ورودی تقویت کننده CB با مقاومت موجود در بیس



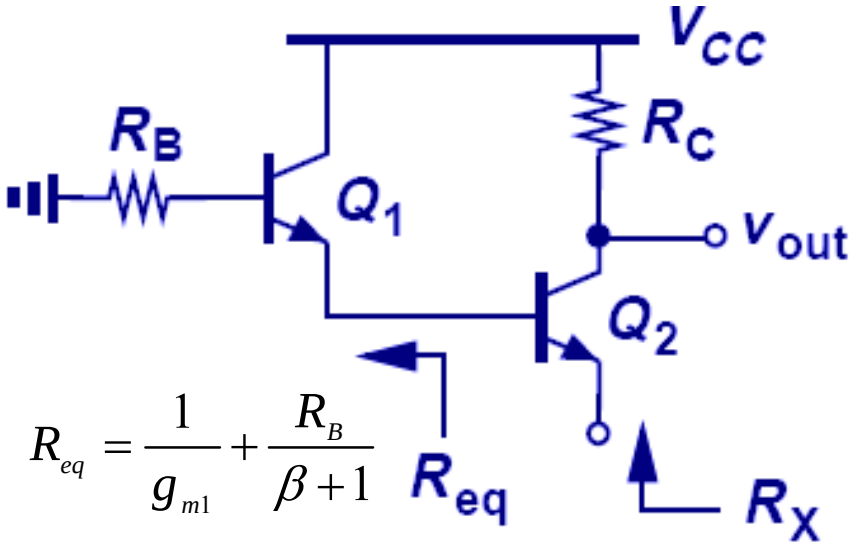
$$\frac{v_X}{i_X} = \frac{r_\pi + R_B}{\beta + 1} \approx \frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta + 1}$$

یادآوری

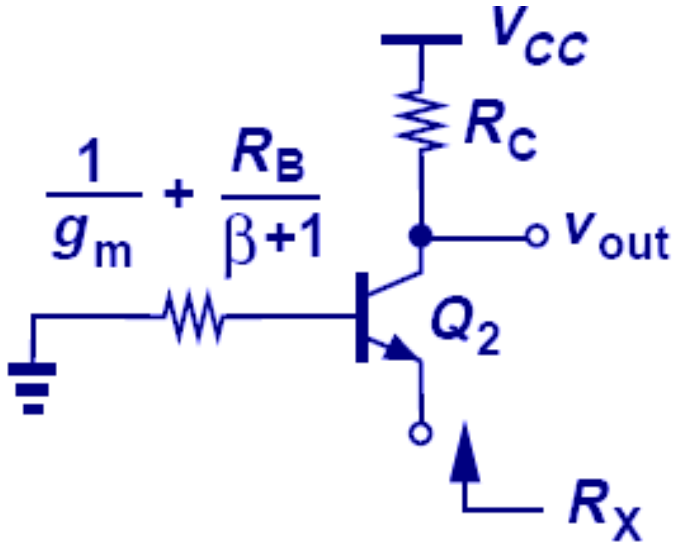

R_B
$V_A = \infty$
Q_1
$\frac{1}{g_m} + \frac{R_B}{\beta+1}$


$V_A = \infty$
Q_1
$r_\pi + (\beta+1) R_E$
R_E

مثال هایی از محاسبه امپدانس ورودی

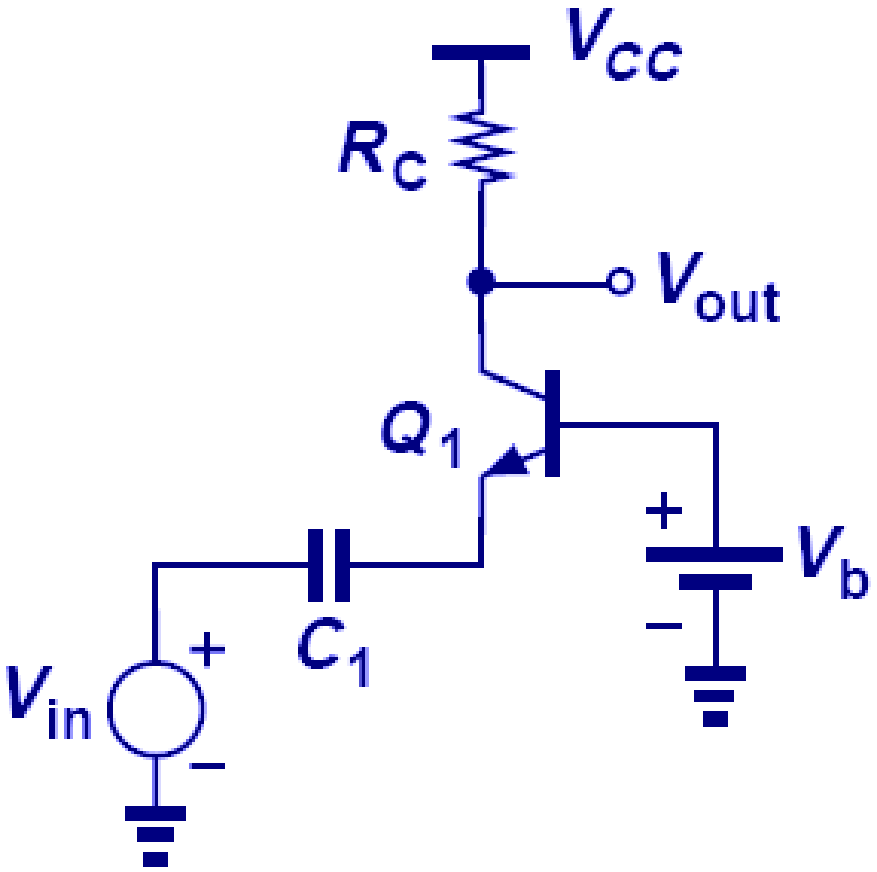


$$R_{eq} = \frac{1}{g_{m1}} + \frac{R_B}{\beta + 1}$$



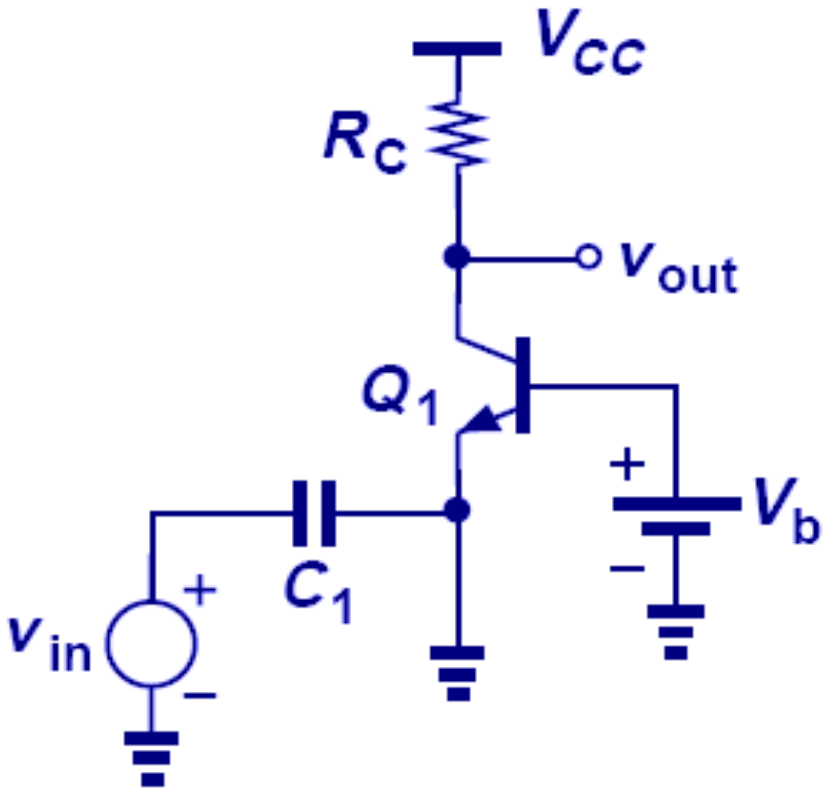
$$R_X = \frac{1}{g_{m2}} + \frac{R_{eq}}{\beta + 1}$$

بایاس بد برای تقویت کننده CB



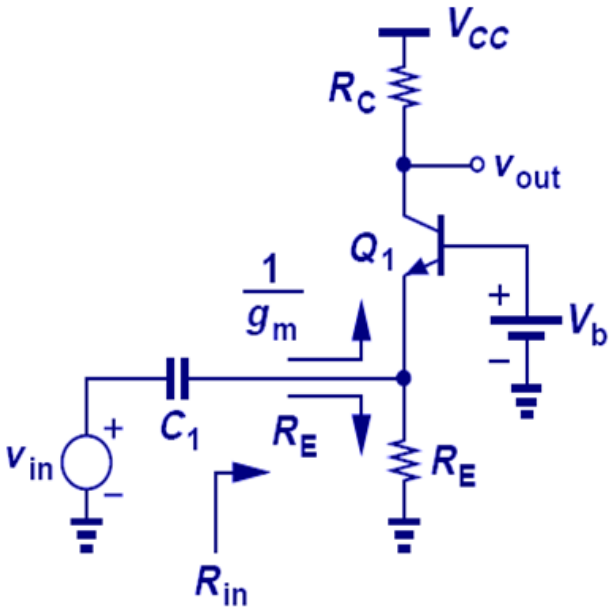
- در مدار فوق جریان dc از تانزیستور عبور نمی کند.

بایاس بد برای تقویت کننده CB



- در مدار فوق اگرچه از ترانزیستور جریان dc عبور می کند ولی با کمی دقت می توان فهمید که تمام سیگنال AC وارد زمین شده و سیگنال AC وارد تقویت کننده نخواهد شد. لذا تقویت ولتاژ نخواهیم داشت.

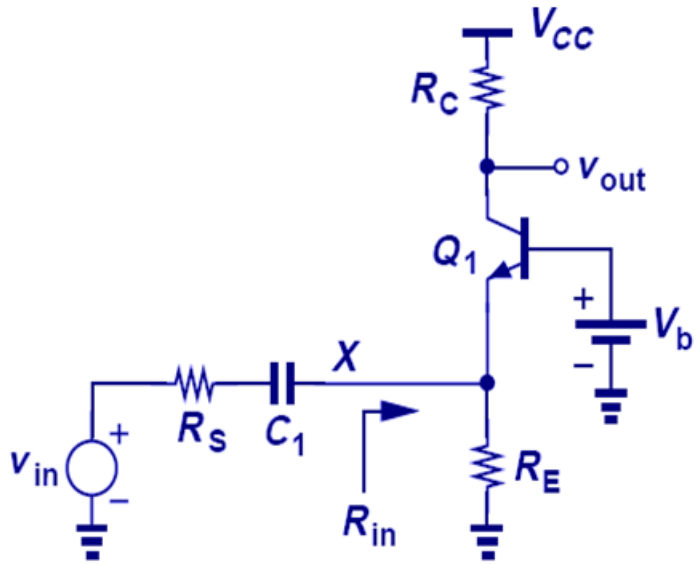
بایاس مناسب برای تقویت کننده CB



$$R_{in} = \frac{1}{g_m} \| R_E$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = g_m R_c$$

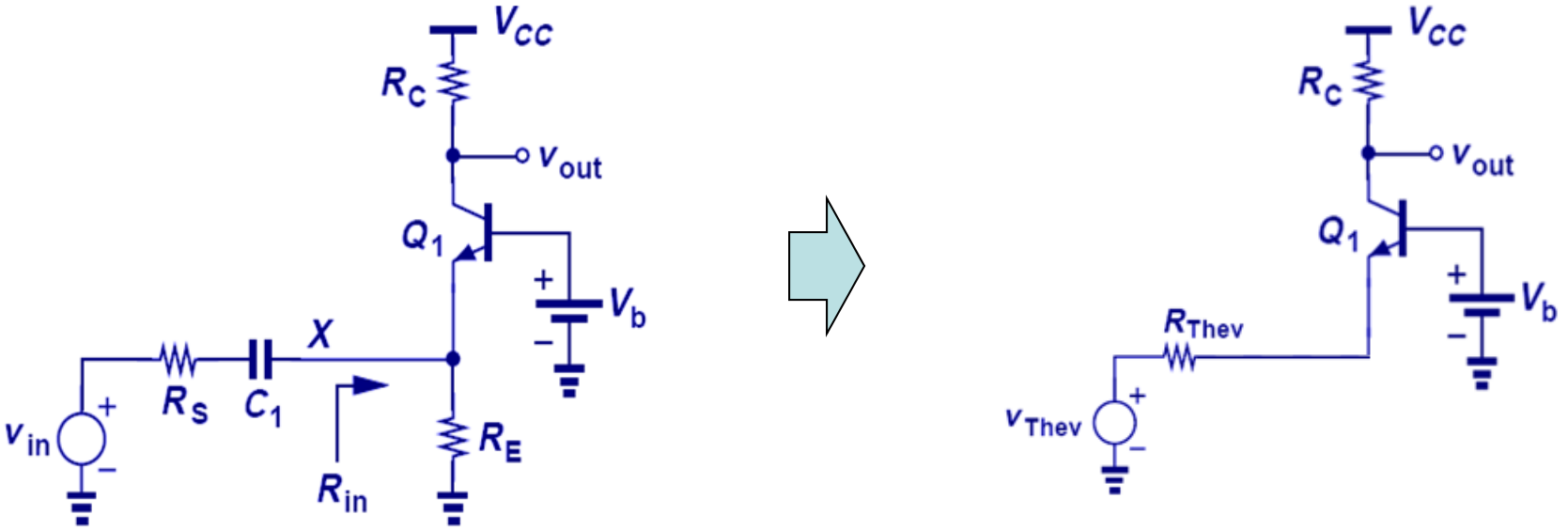
بایاس مناسب برای تقویت کننده CB
(انجام تحلیل AC با استفاده از راه حل 1)



$$R_{in} = \frac{1}{g_m} \| R_E$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v_X}{v_{in}} \times \frac{v_{in}}{v_X} = \frac{\frac{1}{g_m} \| R_E}{\frac{1}{g_m} \| R_E + R_S} \times g_m R_c$$

بایاس مناسب برای تقویت کننده CB
(انجام تحلیل AC با استفاده از راه حل 2)

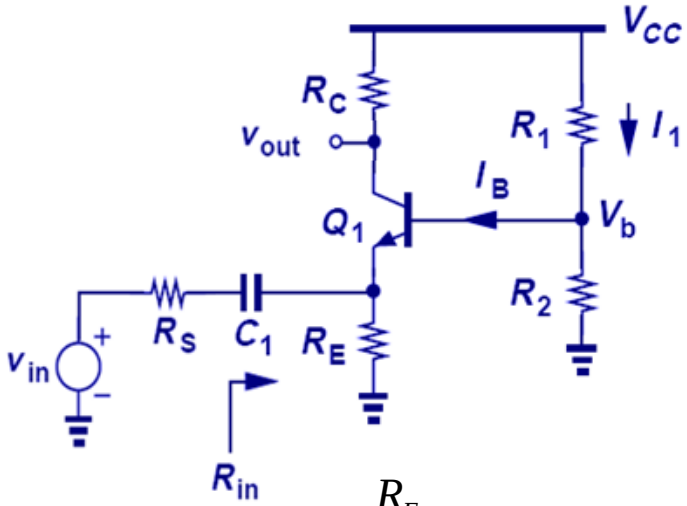


$$R_{in} = \frac{1}{g_m} \| R_E$$

$$R_{Thev} = R_S \| R_E, \quad v_{Thev} = \frac{R_E}{R_S + R_E} v_{in}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_c}{\frac{1}{g_m} + R_S \| R_E} \times \frac{R_E}{R_S + R_E}$$

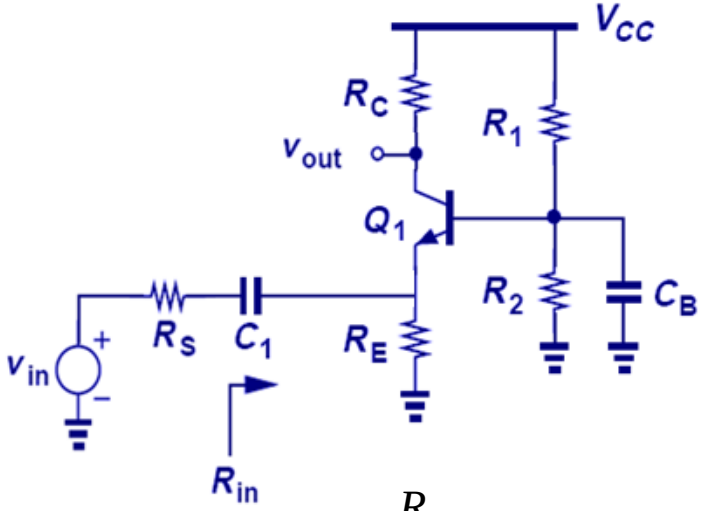
نحوه ایجاد V_b



$$R_{Thev} = R_S \,||\, R_E, \quad v_{Thev} = \frac{R_E}{R_S + R_E} v_{in}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_c}{\frac{R_1 \,||\, R_2}{1+\beta} + \frac{1}{g_m} + R_S \,||\, R_E} \times \frac{R_E}{R_S + R_E}$$

$$R_{in} = \left(\frac{R_1 \,||\, R_2}{1+\beta} + \frac{1}{g_m} \right) || \, R_E$$



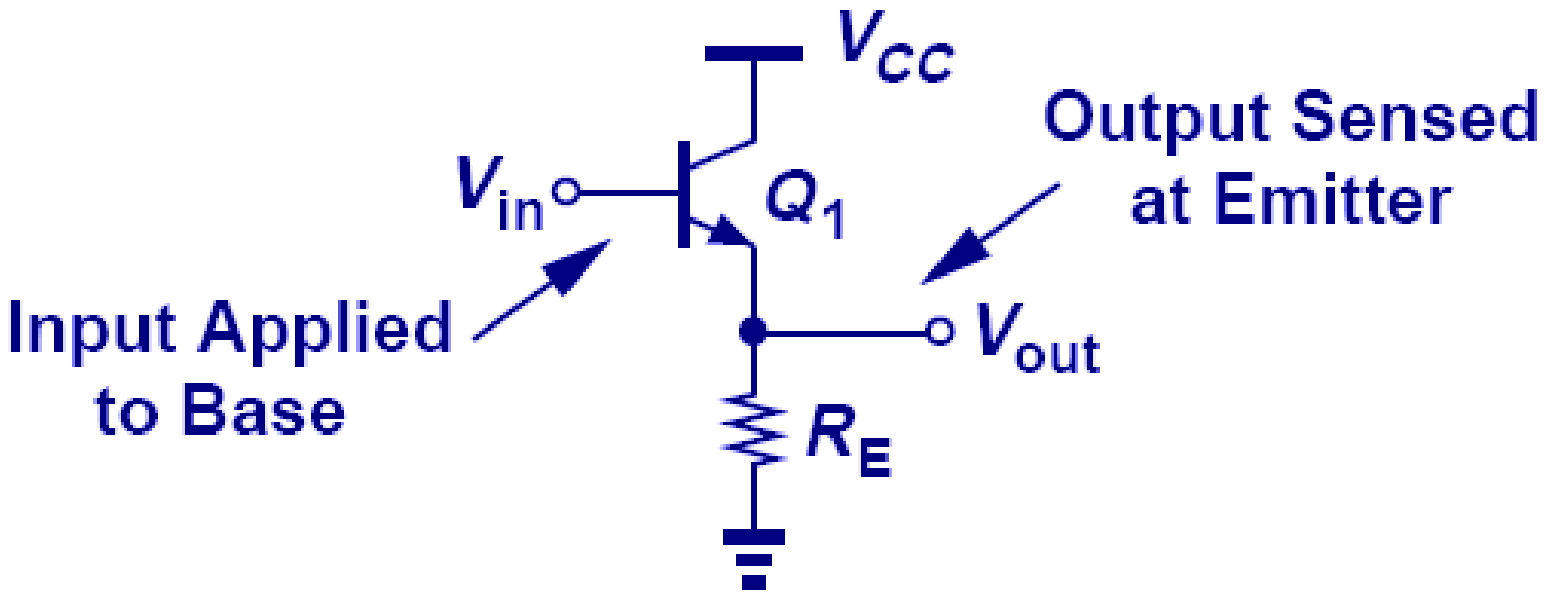
$$R_{Thev} = R_S \,||\, R_E, \quad v_{Thev} = \frac{R_E}{R_S + R_E} v_{in}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_c}{\frac{1}{g_m} + R_S \,||\, R_E} \times \frac{R_E}{R_S + R_E}$$

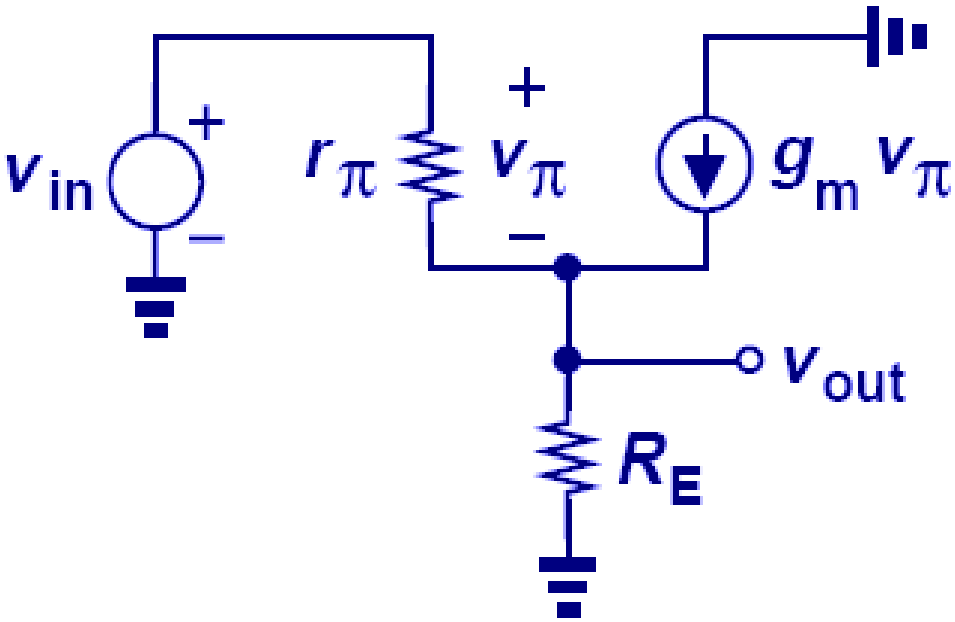
$$R_{in} = \frac{1}{g_m} \,||\, R_E$$

- البته مشاهده می شود که استفاده از تقسیم کننده مقاومتی R1 و R2 باعث کاهش بهره می شود.
- با استفاده از خازن C_B می توان مشکل فوق را برطرف کرد.

Emitter Follower (Common Collector Amplifier)



تحلیل سیگنال کوچک

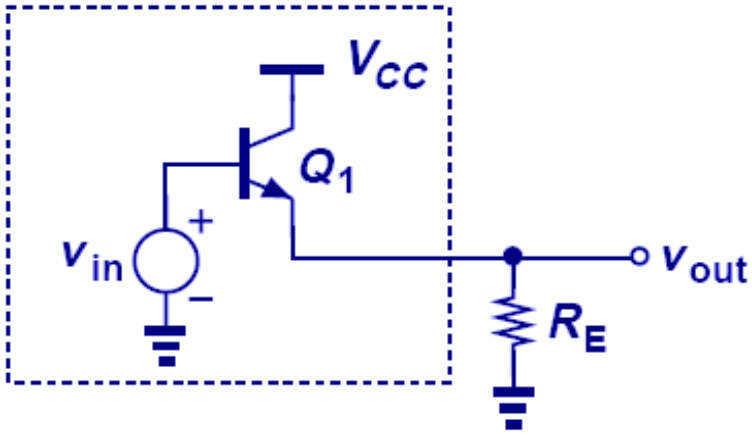


$$V_A = \infty$$

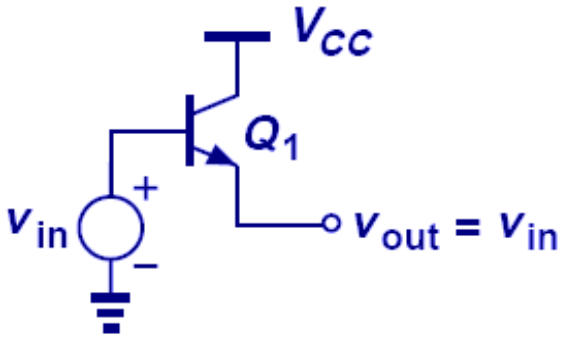
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{1+\frac{r_\pi}{\beta+1}\cdot\frac{1}{R_E}} \approx \frac{R_E}{R_E+\frac{1}{g_m}}$$

- بهره ولتاژ مثبت و کمتر از 1 است.

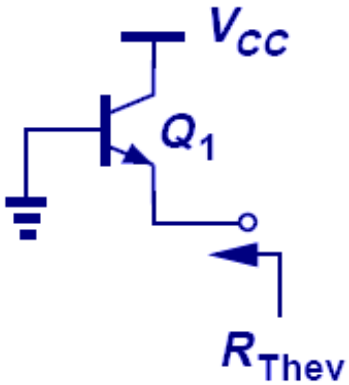
تقویت کننده C.C به عنوان یک تقسیم کننده ولتاژ



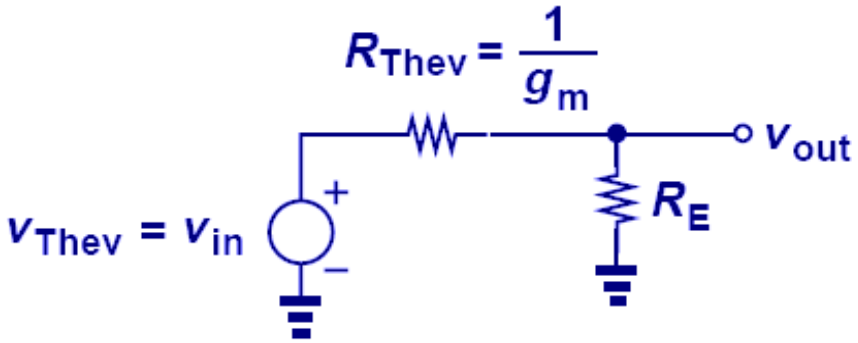
(a)



(b)



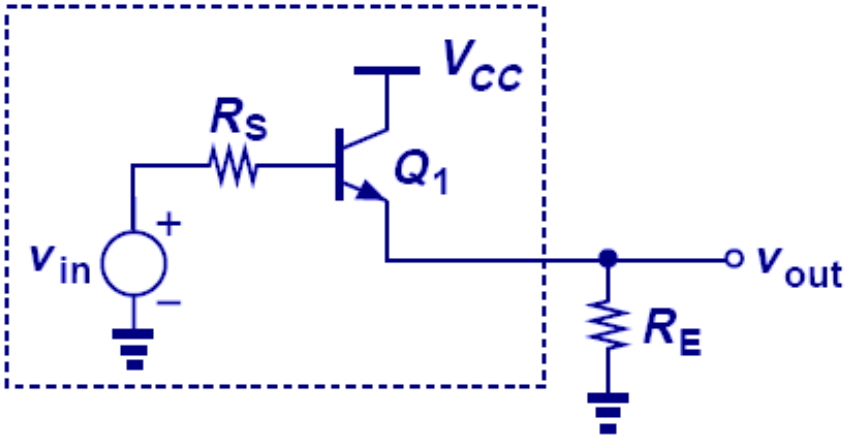
(c)



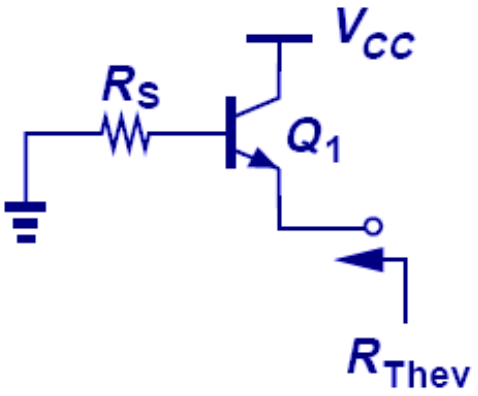
(d)

$$V_A = \infty$$

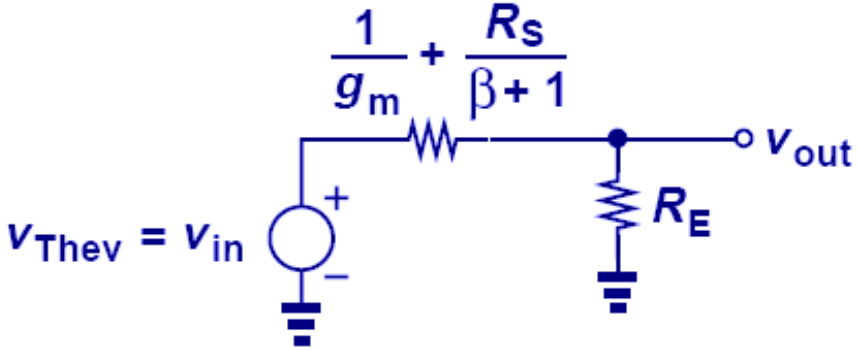
ادامه



(a)



(b)

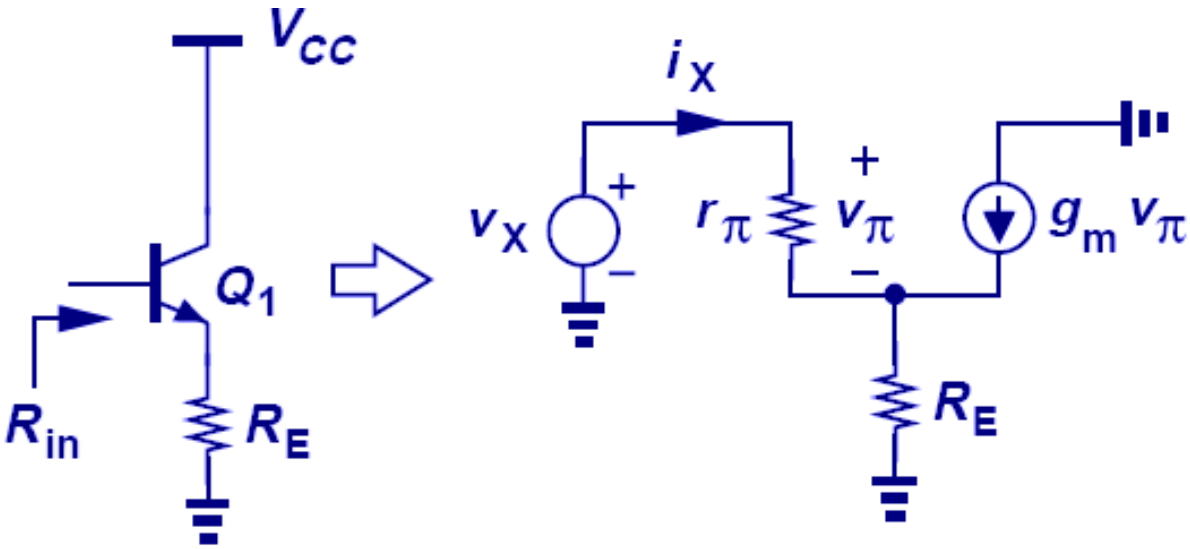


(c)

$$V_A = \infty$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_E}{R_E + \frac{R_S}{\beta+1} + \frac{1}{g_m}}$$

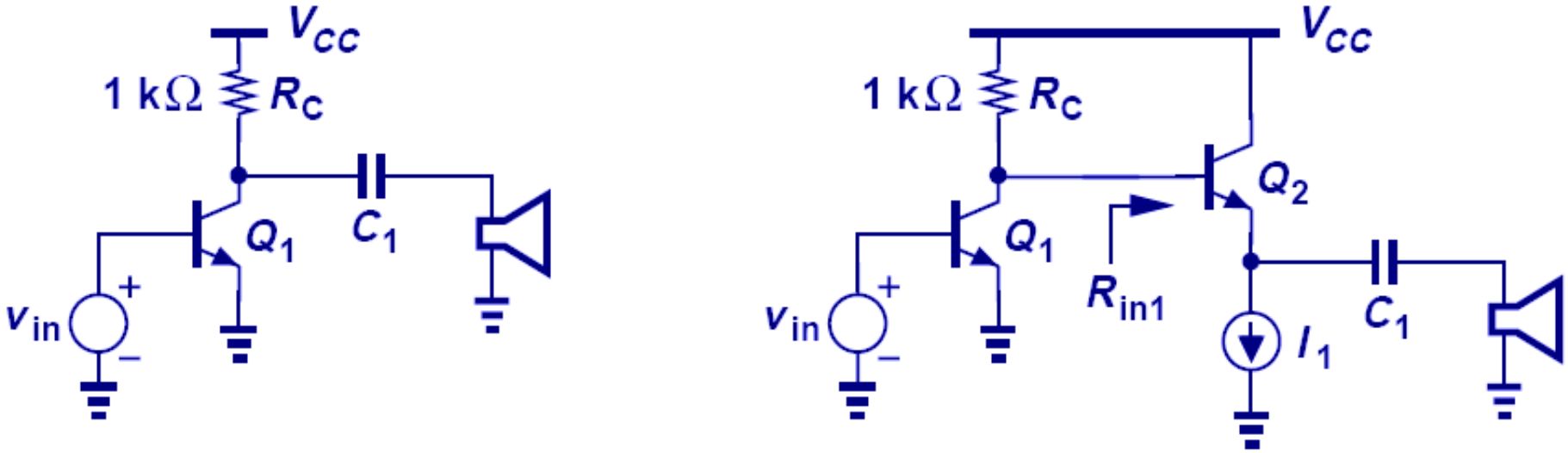
امپدانس ورودی



$$V_A = \infty$$

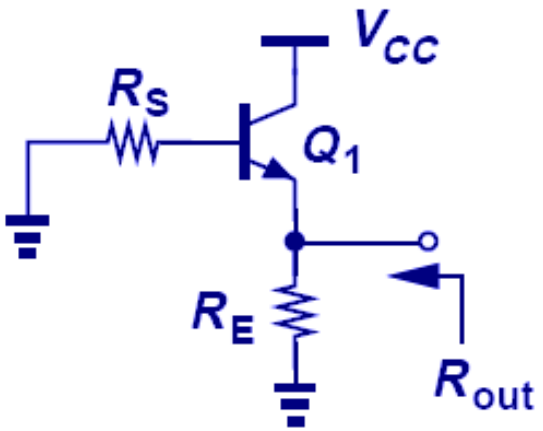
$$\frac{v_X}{i_X} = r_\pi + (1+\beta)R_E$$

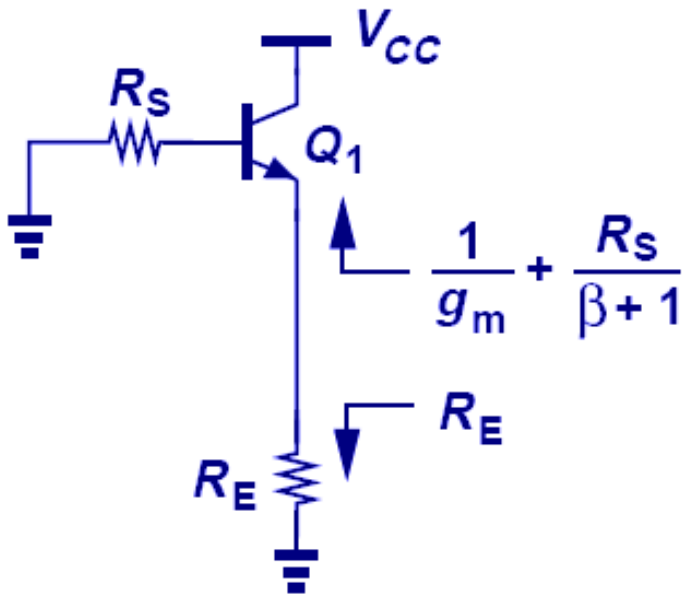
استفاده از تقویت کننده C.C به عنوان بافر



- معمولا بلندگوها دارای امپدانس پایین مثلا 8 اهم هستند و اتصال مستقیم آن ها به یک تقویت کننده C.E باعث کاهش بهره می شود.
- برای حل مشکل معمولا یک تقویت کننده C.C بین آمپلی فایر C.E و بلندگو قرار می دهند. طبقه C.C امپدانس Rin1 را افزایش داده و از کاهش بهره طبقه C.E جلوگیری می کند. ضمنا طبقه C.C سیگنال خروجی طبقه C.E را تقریبا با همان اندازه به بلندگو منتقل می کند.
- به طبقه C.C اصطلاحا بافر ولتاژ نیز می گویند.

امپدانس خروجی

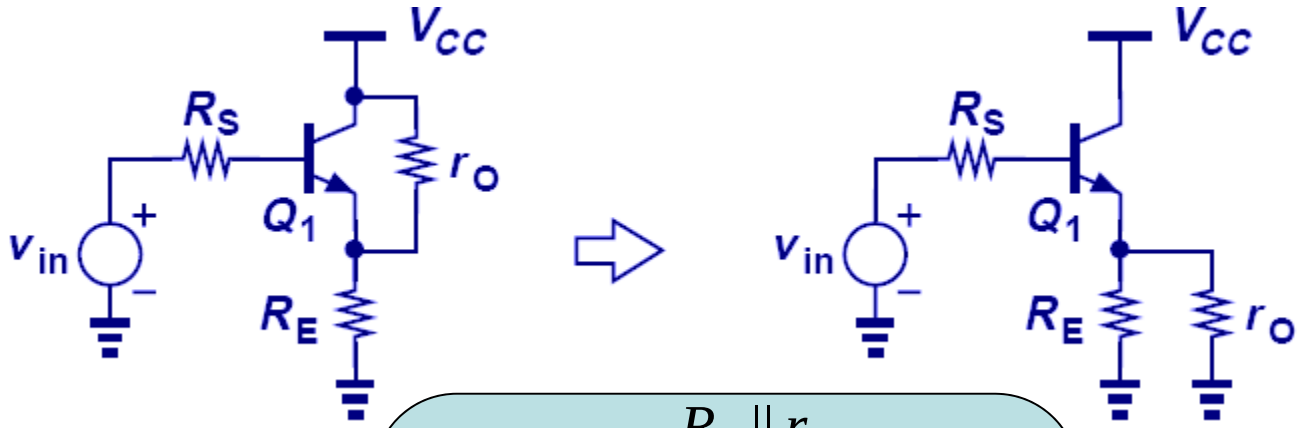




$$R_{out} = \left(\frac{R_s}{\beta+1} + \frac{1}{g_m} \right) \| R_E$$

- امپدانس خروجی این تقویت کننده کم است و هیچ یک از تقویت کننده های **C.E** و **C.B** دارای این ویژگی نیستند.

تقویت کننده امیتر-فالوور با لحاظ اثر ارلی

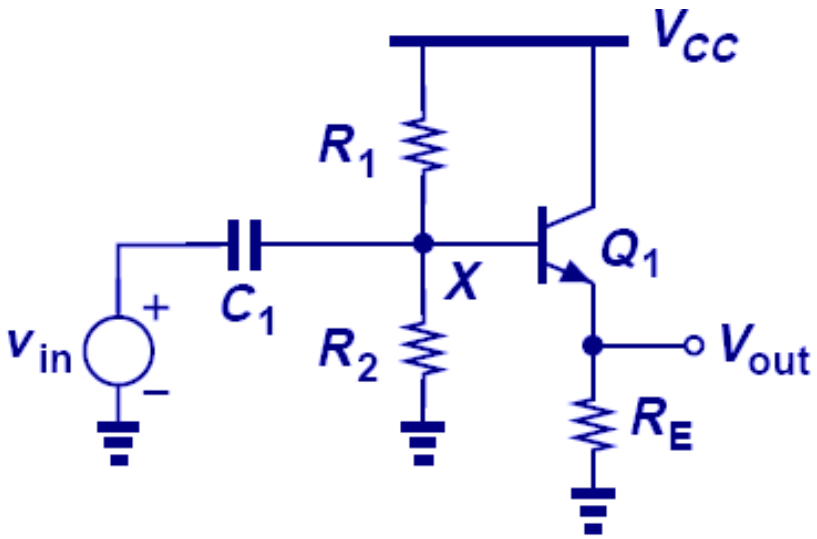


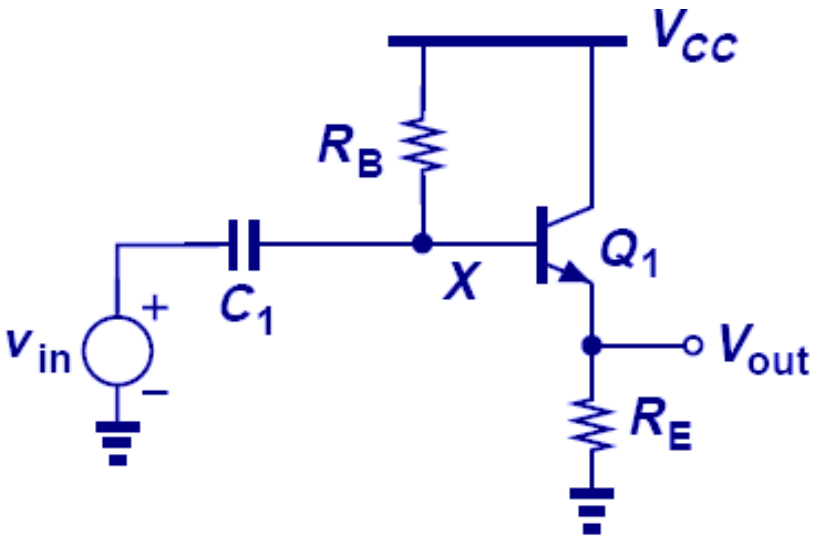
$$A_v = \frac{R_E \,\|\, r_O}{R_E \,\|\, r_O + \dfrac{R_S}{\beta+1} + \dfrac{1}{g_m}}$$

$$R_{in} = r_\pi + (\beta+1)(R_E \,\|\, r_O)$$

$$R_{out} = \left(\frac{R_s}{\beta+1} + \frac{1}{g_m}\right) \| R_E \,\|\, r_O$$

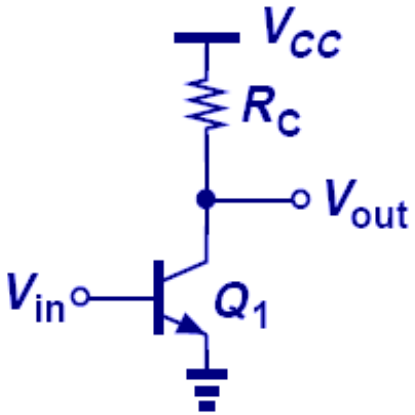
تقویت کننده امیتر فالوور به همراه مدار بایاس



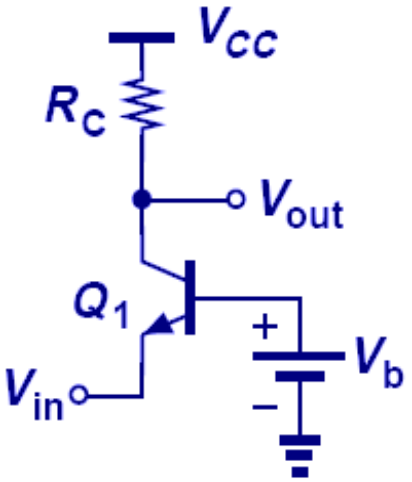


جمع بندی
ساختارهای مختلف تقویت کننده ها

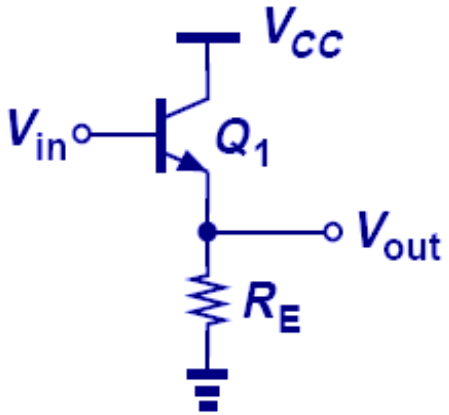
CE Stage



CB Stage

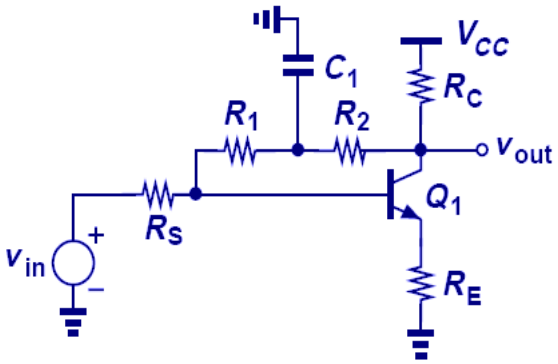


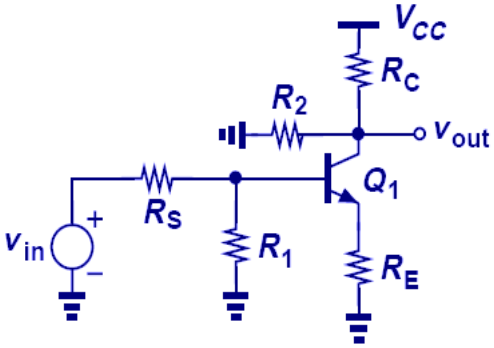
Follower

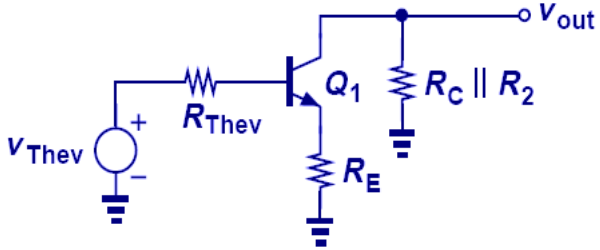


مثال 1

$$V_A = \infty$$

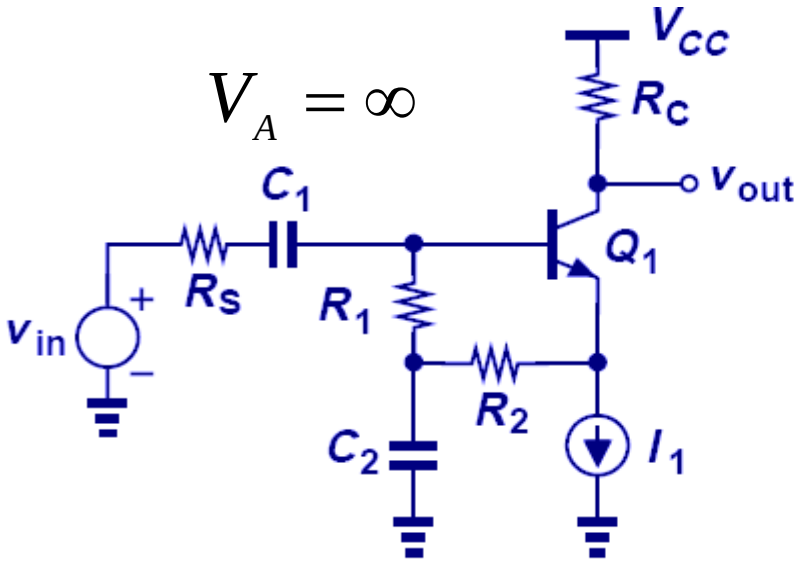


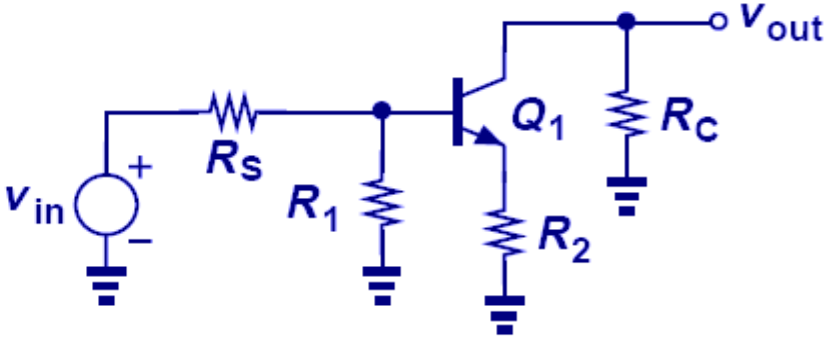




$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_2 \parallel R_C}{\frac{R_1 \parallel R_S}{\beta+1} + \frac{1}{g_m} + R_E} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_S}$$

مثال 2

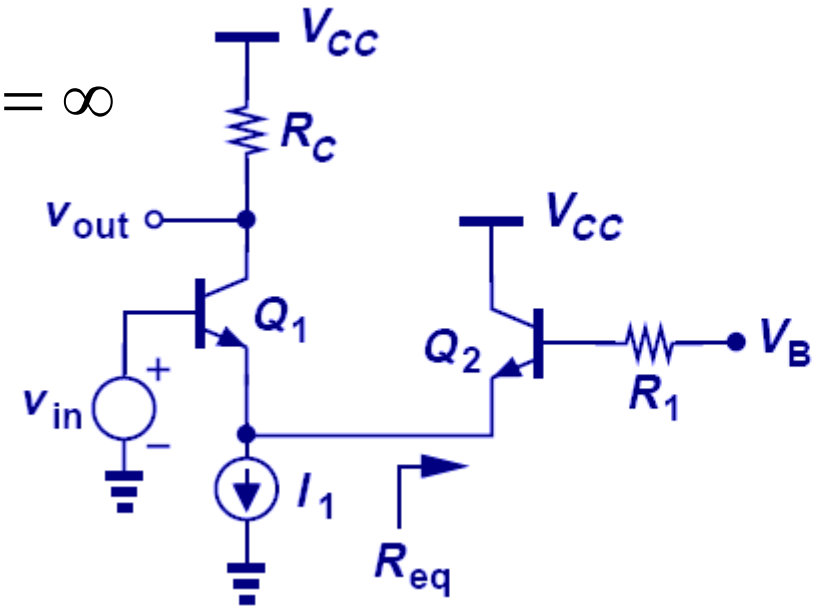


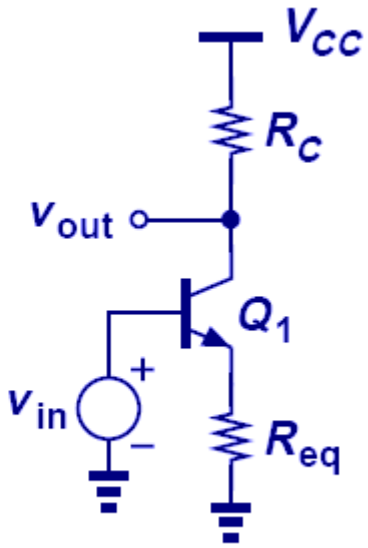


$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_C}{\frac{R_S \parallel R_1}{\beta+1} + \frac{1}{g_m} + R_2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_S}$$

مثال 3

$V_A = \infty$



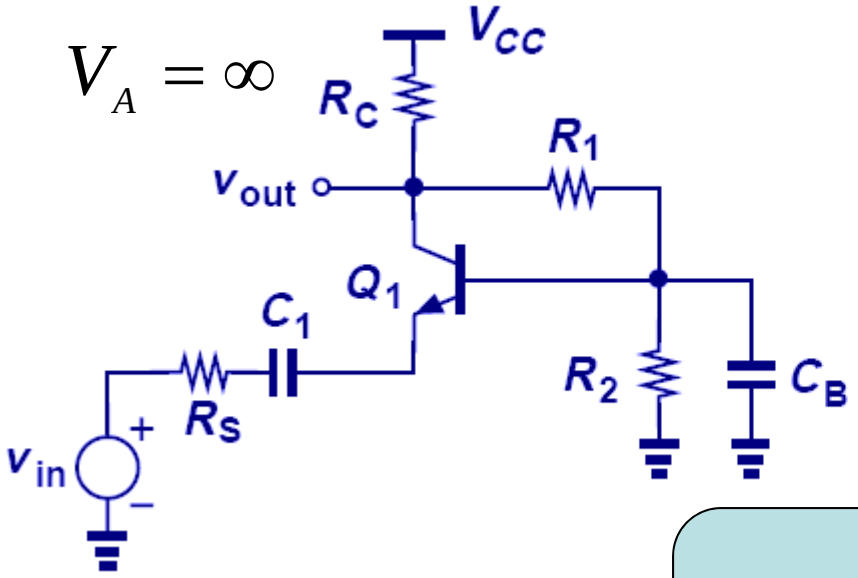


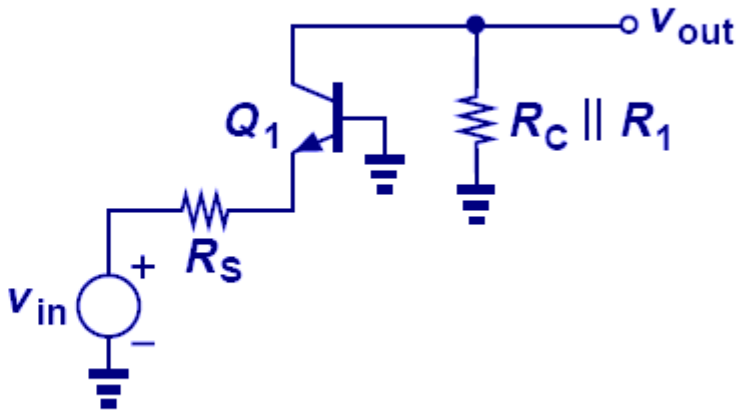
$$R_{eq} \cong \frac{R_1}{\beta+1} + \frac{1}{g_{m2}}$$

$$A_v = \frac{-R_C}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{R_1}{\beta+1} + \frac{1}{g_{m2}}}$$

مثال 4

$V_A = \infty$

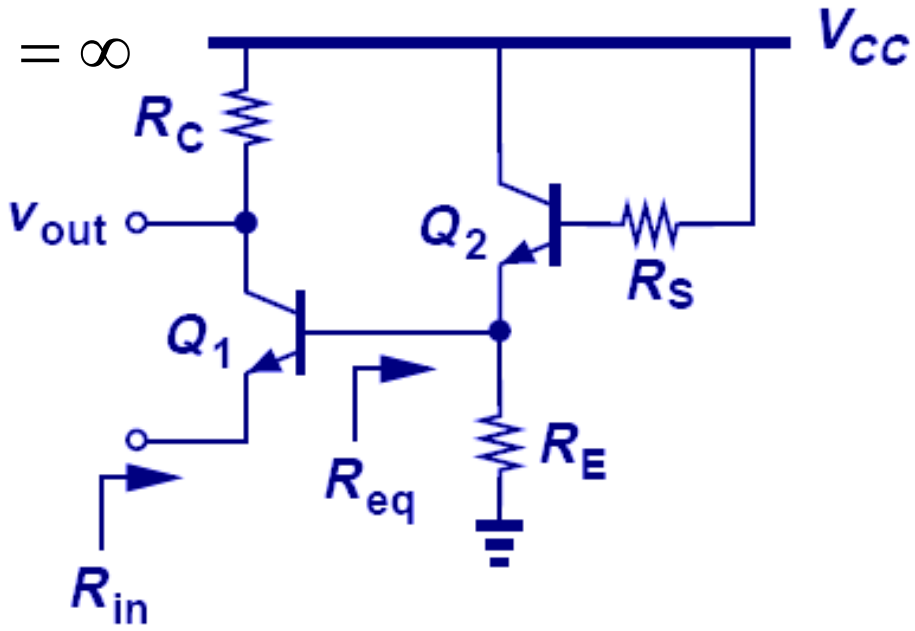


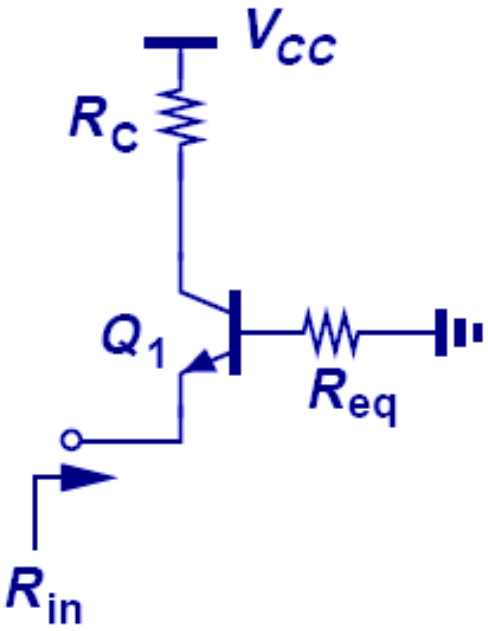


$$A_v = \frac{R_C \parallel R_1}{R_S + \dfrac{1}{g_m}}$$

مثال 5

$V_A = \infty$

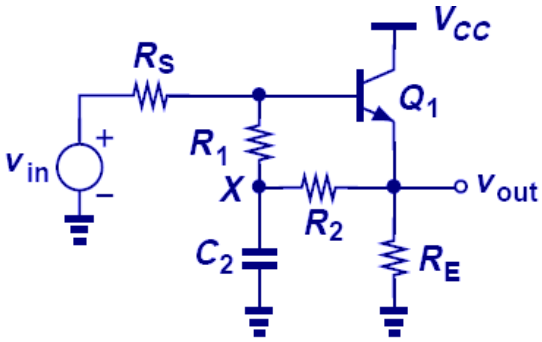




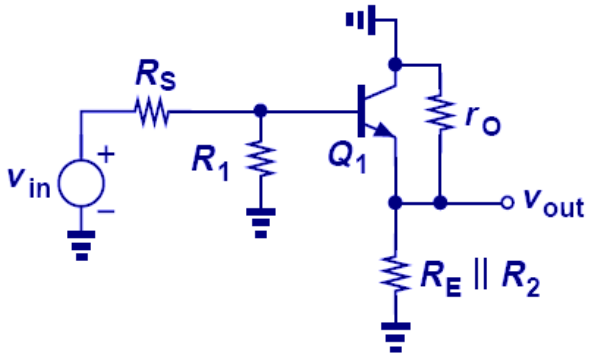
$$R_{eq} = \left(\frac{R_s}{\beta+1} + \frac{1}{g_{m2}} \right) \| R_E$$

$$R_{in} = \frac{R_{eq}}{\beta+1} + \frac{1}{g_{m1}}$$

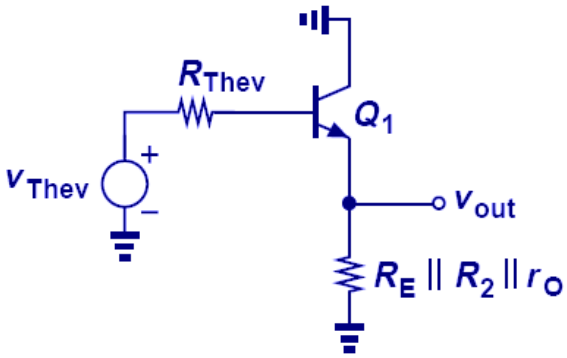
مثال 6



$V_A \# \infty$ (a)



(b)

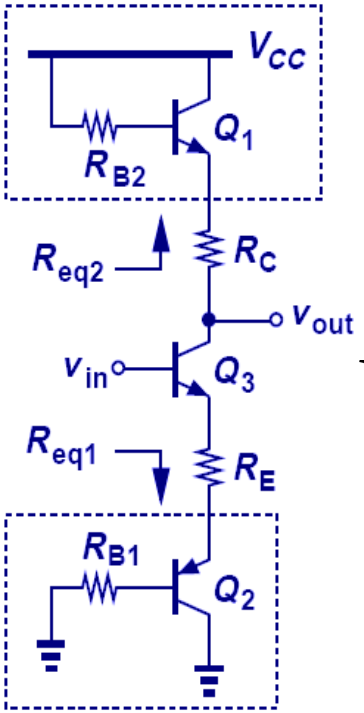


(c)

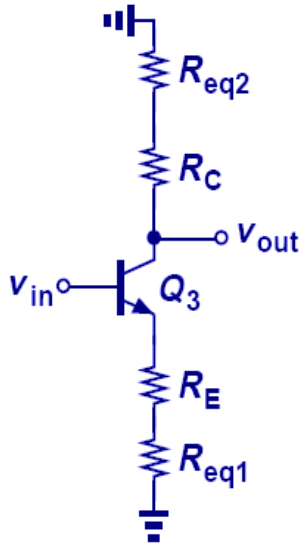
$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_E \| R_2 \| r_O}{R_E \| R_2 \| r_O + \frac{1}{g_m} + \frac{R_S \| R_1}{\beta+1}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_S}$$

$$R_{out} = \left(\frac{R_S \| R_1}{\beta+1} + \frac{1}{g_m} \right) \| R_E \| R_2 \| r_O$$

مثال 7



$V_A = \infty$



$$R_{eq1} = \frac{R_{B1}}{\beta+1} + \frac{1}{g_{m2}}, R_{eq2} = \frac{R_{B2}}{\beta+1} + \frac{1}{g_{m1}}$$

$$R_{in} = r_{\pi 1} + (\beta+1)(R_E + R_{eq1})$$

$$R_{out} = R_C + R_{eq2}$$

$$A_v = -\frac{R_C + R_{eq2}}{R_{eq1} + R_E + \frac{1}{g_{m1}}}$$