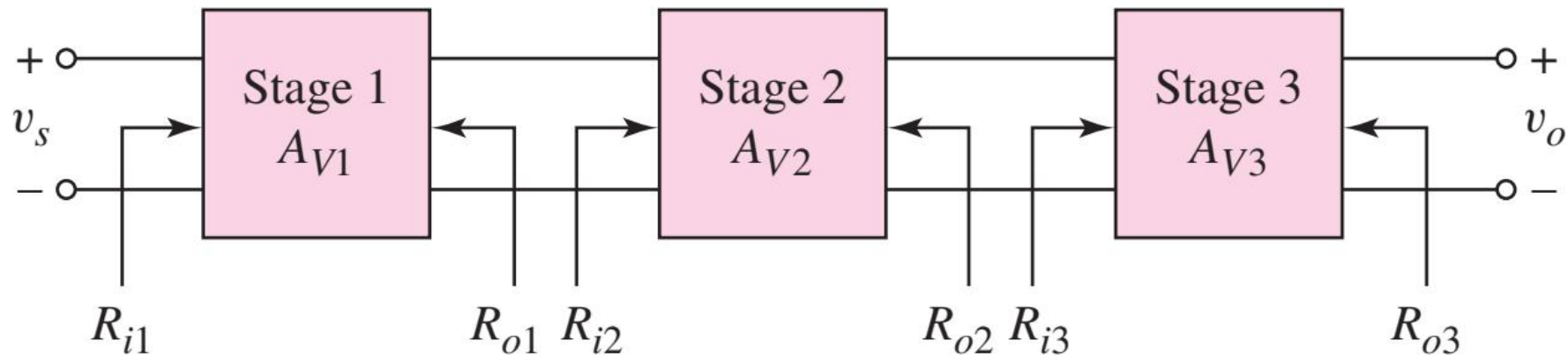


Chương 3 - Mạch khuếch đại liên tầng

- 1. Mạch ghép Cascade
- 2. Mạch ghép Cascode
- 3. Mạch ghép Darlington
- 4. Mạch ghép vi sai

1. Mạch ghép Cascade

- Là mạch gồm nhiều mạch khuếch đại nối tiếp nhau.
- Ngõ ra của mạch khuếch đại này là ngõ vào của mạch khuếch đại tiếp theo.

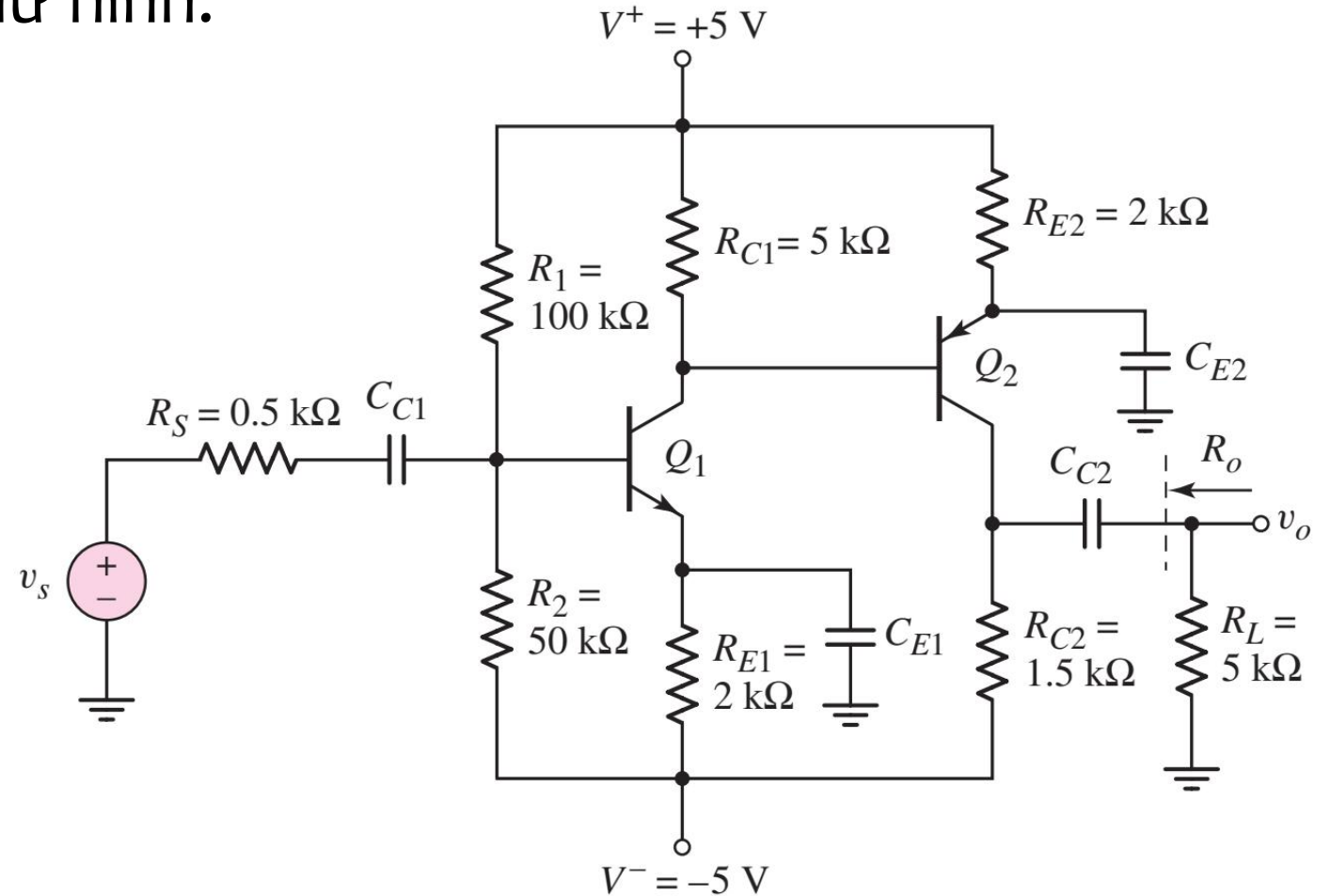


1. Mạch ghép Cascade

Ví dụ: Mạch cascade CE-CE như hình.

Bỏ qua r_o ($r_o = \infty$).

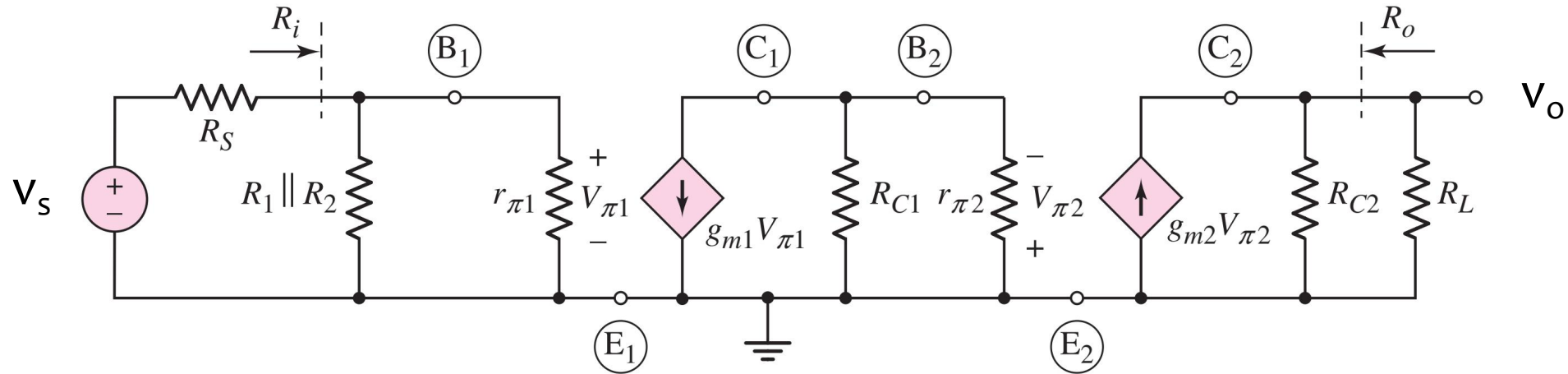
Xác định $A_v = v_o/v_s$, R_i , R_o .



Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT

1. Mạch ghép Cascade

Sơ đồ tương đương tính hiệu nhỏ:



$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = g_{m1} g_{m2} (R_{C1} // r_{\pi 2}) (R_{C2} // R_L) \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$R_i = R_1 // R_2 // r_{\pi 1}; \quad R_o = R_{C2}$$

Lưu ý: Nếu không muốn sử dụng g_m thì có thể sử dụng β .

1. Mạch ghép Cascade

Ví dụ: Mạch cascade CE-CC như hình, $\beta = 125$, $V_{BE} = 0.7V$.

Bỏ qua r_o ($r_o = \infty$).

a. Xác định điểm làm việc tĩnh của Q_1 , Q_2 .

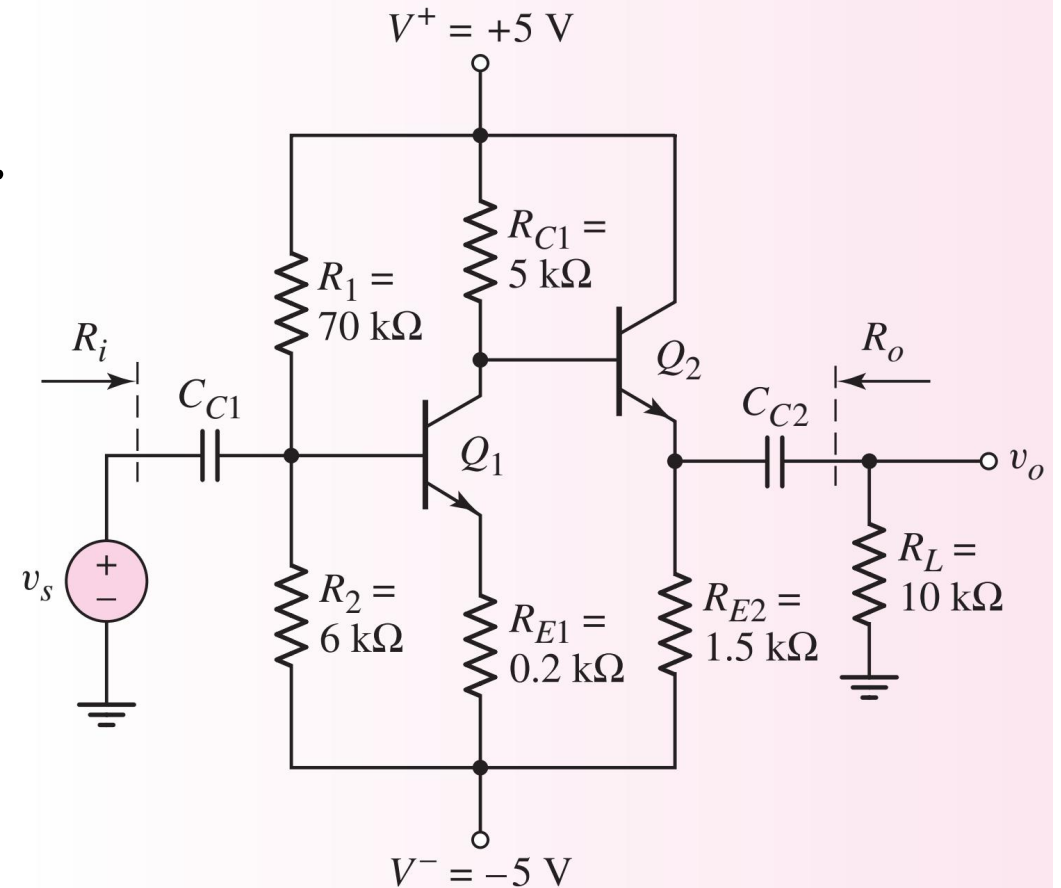
b. Xác định $A_v = v_o/v_s$, R_i , R_o .

Đáp án:

a. $I_{CQ1} = 0.364mA$, $V_{CEQ1} = 7.92V$

$I_{CQ2} = 4.82mA$, $V_{CEQ2} = 2.71V$

b. $A_v = -17.7$; $R_i = 4,76k\Omega$, $R_o = 43.7\Omega$.



1. Mạch ghép Cascade

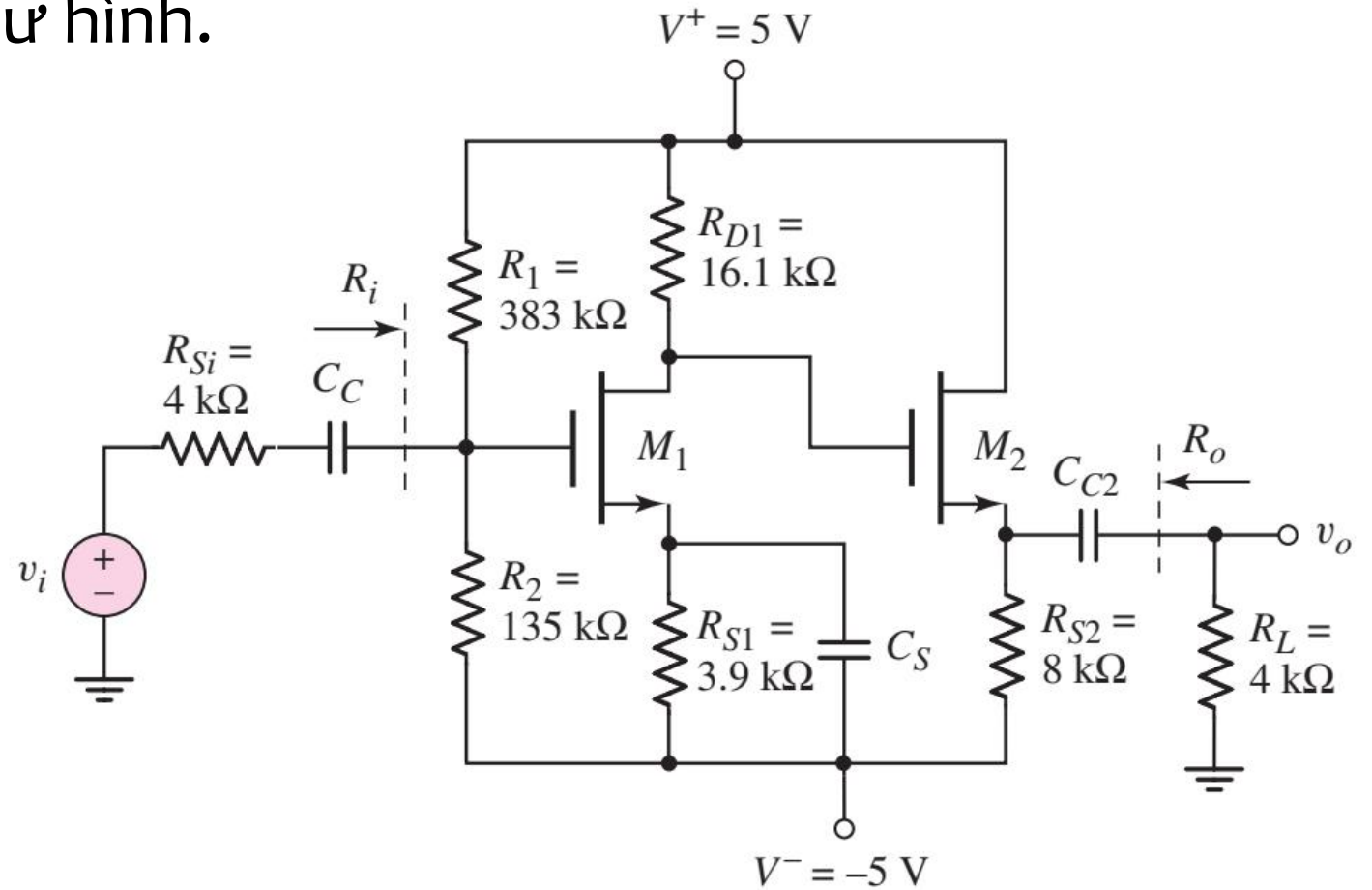
Ví dụ: Mạch cascade CS-CD như hình.

$k_{n1} = 0.5 \text{ mA/V}^2$, $k_{n2} = 0.2 \text{ mA/V}^2$,

$V_{tn1} = V_{tn2} = 1.2 \text{ V}$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ ($r_o = \infty$).

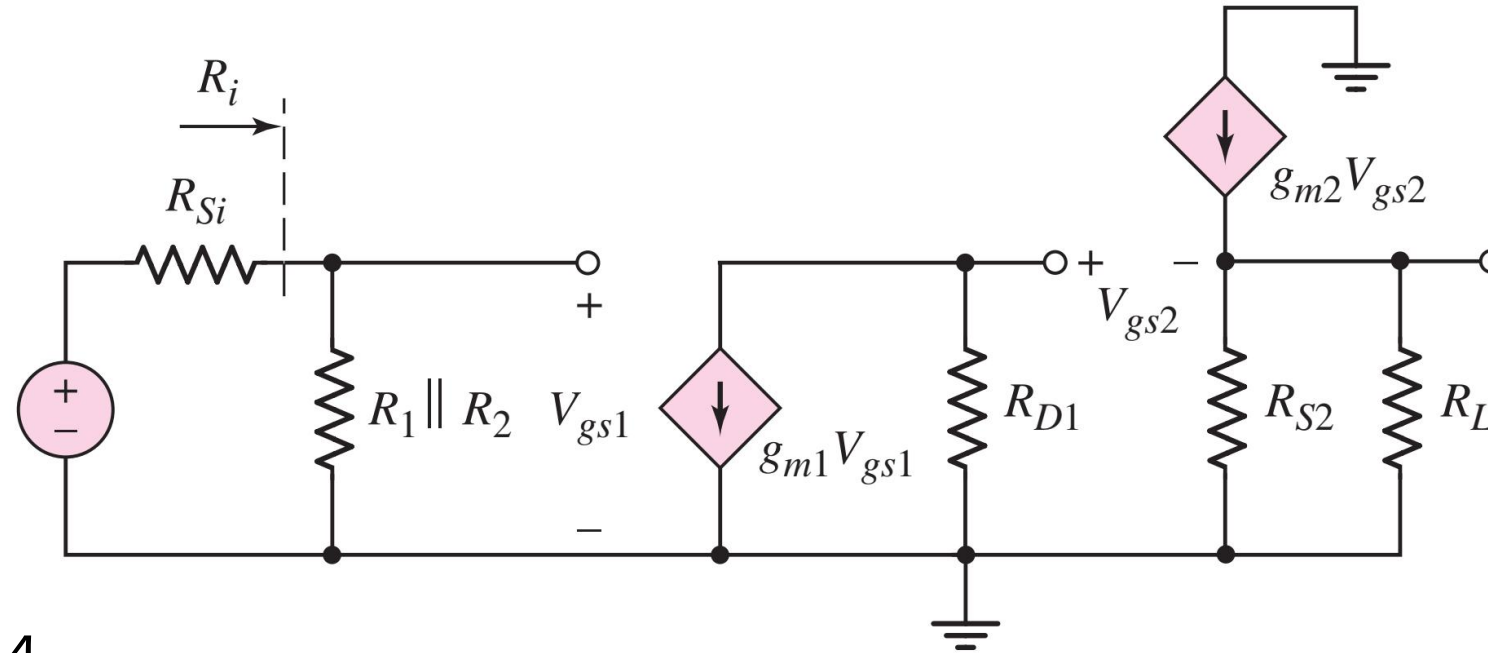
$I_{D1} = 0.2 \text{ mA}$, $I_{D2} = 0.5 \text{ mA}$.

Xác định $A_v = v_o/v_i$, R_i , R_o .



1. Mạch ghép Cascade

Đáp án:



$$A_v = -6.14$$

$$R_i = R_1 // R_2; \quad R_o = \frac{R_{S2}}{1 + R_{S2} g_{m2}} = 1.32 k\Omega$$

Chương 3 - Mạch khuếch đại liên tầng

1. Mạch ghép Cascade

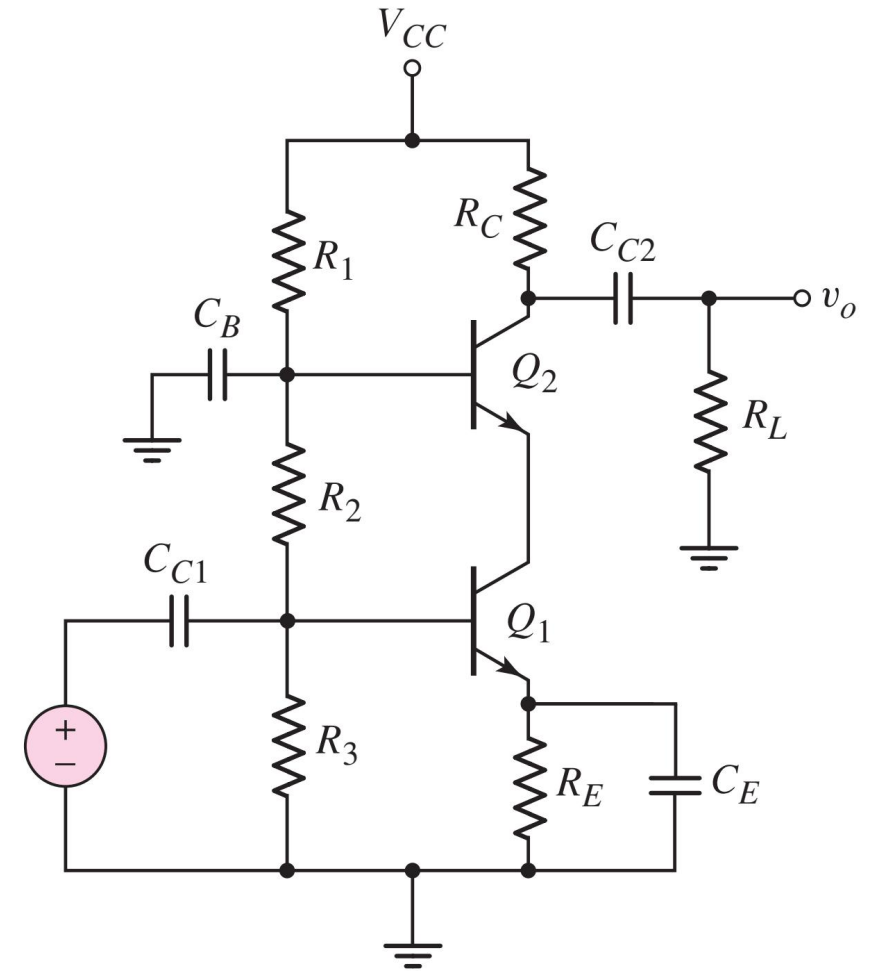
➤ 2. Mạch ghép Cascode

3. Mạch ghép Darlington

4. Mạch ghép vi sai

2. Mạch ghép Cascode

- Là mạch ghép từ 1 mạch khuếch đại CE và một mạch khuếch đại CB (hoặc 1 mạch CS và một mạch CG).
- Tín hiệu vào cấp cho mạch CE, tín hiệu ra lấy từ mạch CB.
- Ưu điểm lớn nhất của mạch là có đáp ứng tần số tốt hơn các kiểu mạch ghép khác, cũng như tốt hơn mạch khuếch đại đơn tầng.



2. Mạch ghép Cascode

Xét chế độ DC:

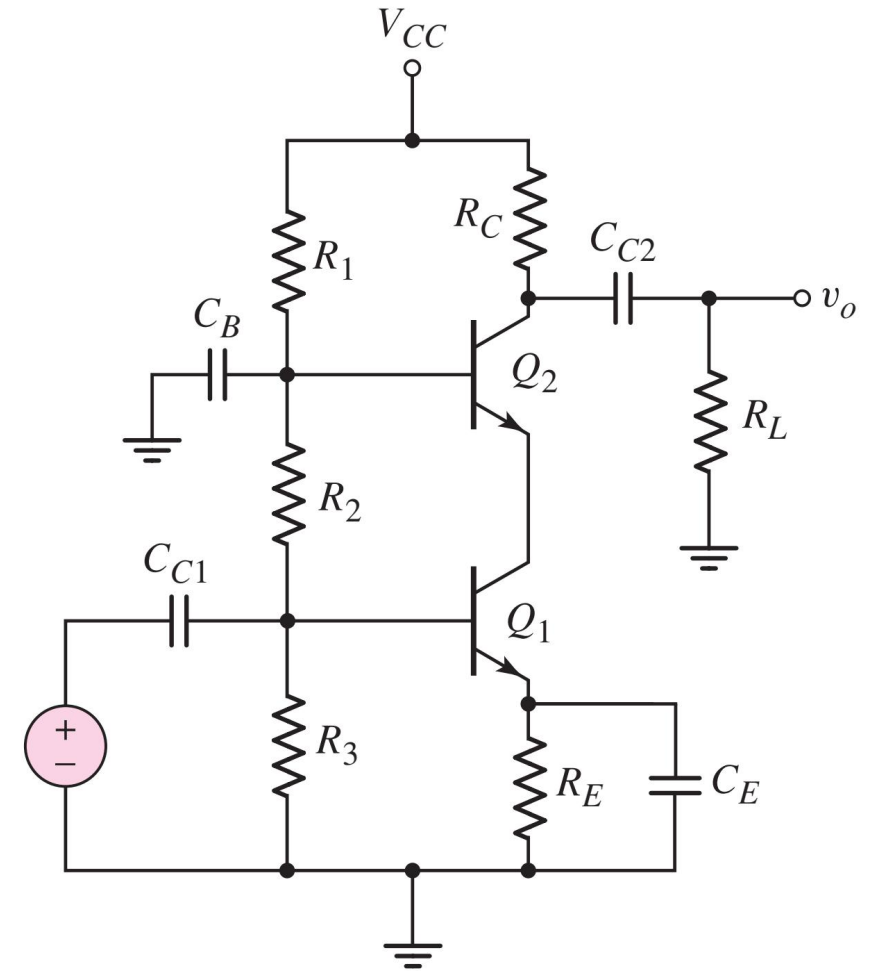
- Có thể giả sử $I_{R_1} \approx I_{R_2} \approx I_{R_3}$, từ đó tính được V_{B1} và V_{B2} .

- Tính được

$$I_{E1} \approx \frac{V_{B1} - V_{BE1}}{R_E}$$

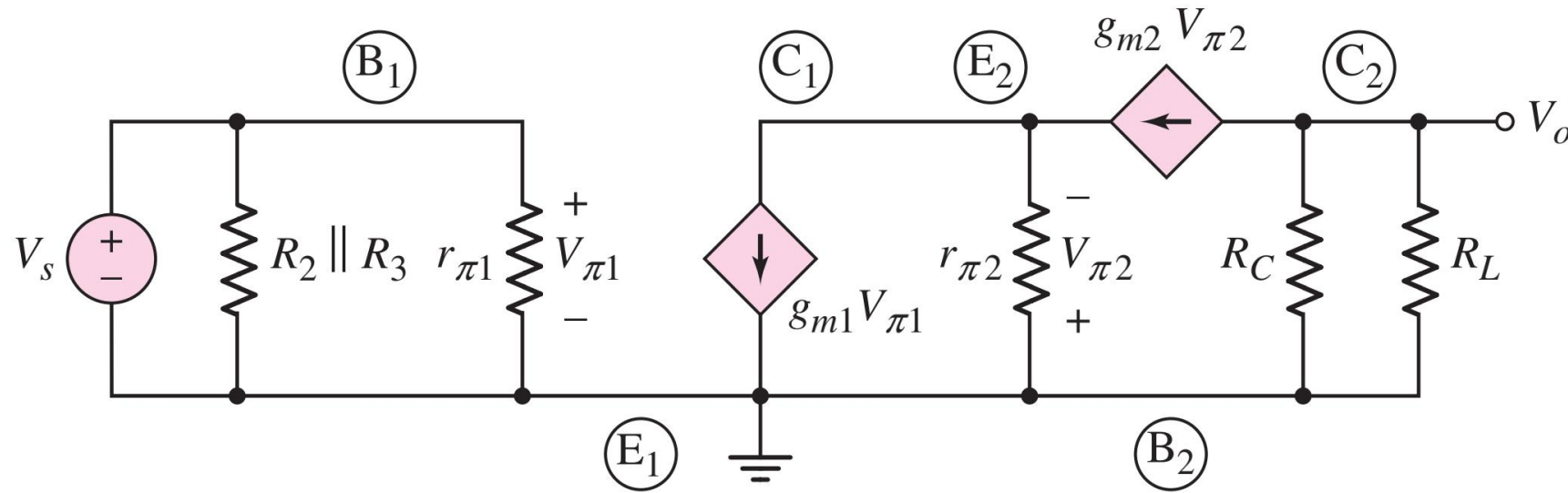
và $I_{E1} \approx I_{C1} = I_{E2} \approx I_{C2}$.

Từ đó tính được tất cả các đại lượng DC khác.



2. Mạch ghép Cascode

Xét chế độ AC: sơ đồ tương đương tín hiệu nhỏ như hình.



2. Mạch ghép Cascode

Ví dụ: Mạch cascode, với hai BJT giống nhau có $\beta = 100$, $V_{CC} = 9V$, $R_L = 10k\Omega$.

a. Tính toán các điện trở còn lại để mạch có:

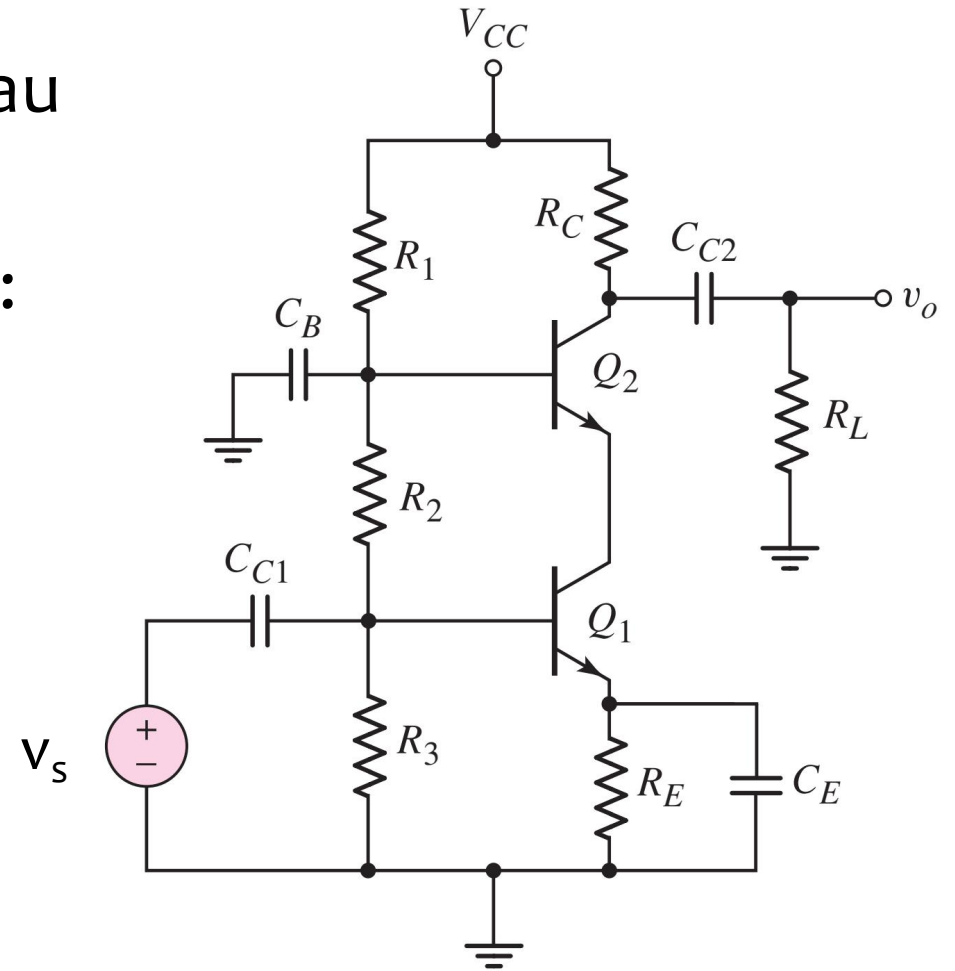
$$V_{CE1} = V_{CE2} = 2.5V$$

$$V_{RE} = 0.7V$$

$$I_{C1} \approx I_{C2} \approx 1mA$$

$$I_{R1} \approx I_{R2} \approx I_{R3} \approx 0.1mA$$

b. Xác định độ lợi áp $A_v = v_o/v_s$.

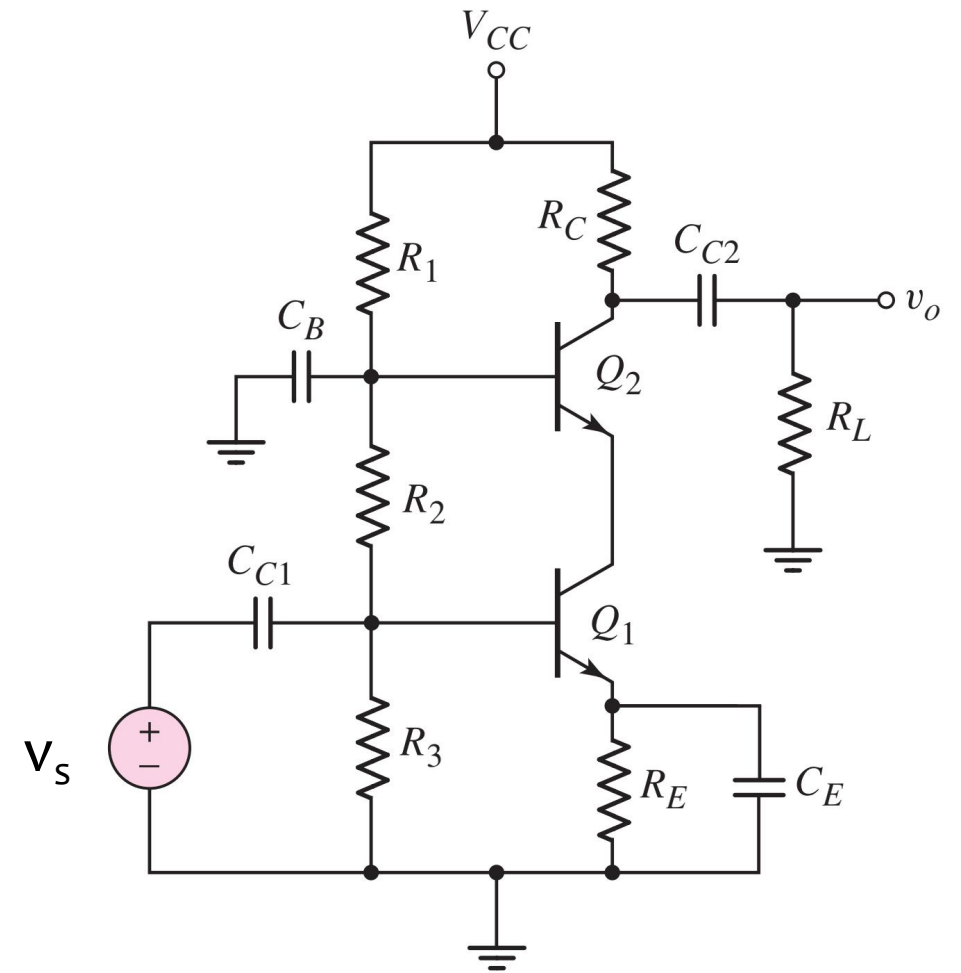


2. Mạch ghép Cascode

Đáp án:

a.

b. $A_v = -94.5$



Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT

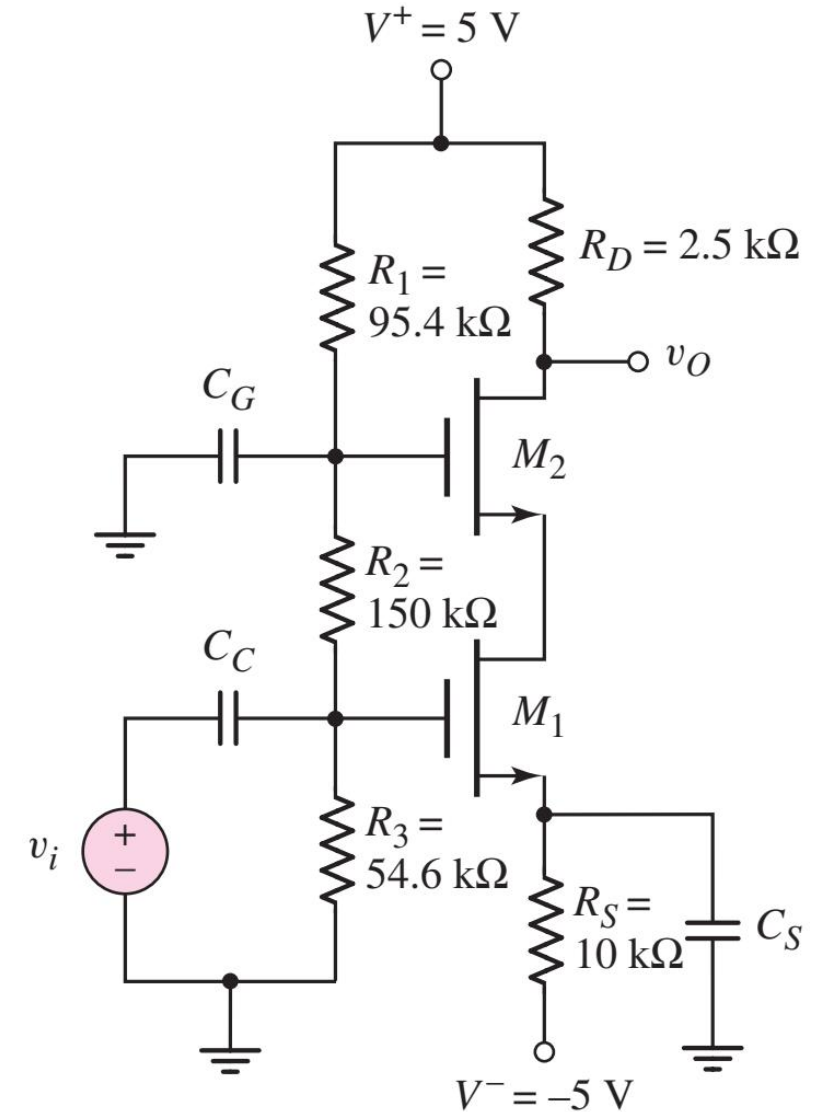
2. Mạch ghép Cascode

Ví dụ: Mạch cascode dùng NMOS:

$$V_{T1} = V_{T2} = 0.8V, k_{n1} = k_{n2} = 6\text{mA/V}^2, \lambda_1 = \lambda_2 = 0.$$

a. Tính I_{DQ} , V_{DSQ1} và V_{DSQ2} .

b. Xác định $A_v = v_o/v_i$.

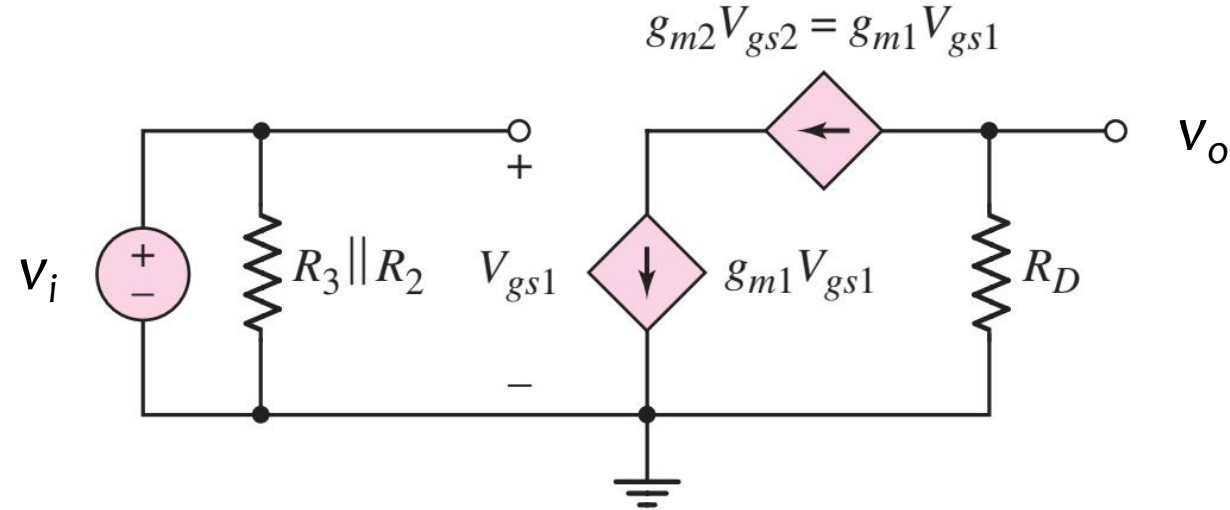


2. Mạch ghép Cascode

Đáp án:

a. Tính $I_{DQ} = 0.471\text{mA}$, $V_{DSQ1} = 2.5\text{V}$ và $V_{DSQ2} = 1.61\text{V}$.

b. $A_v = -5.94$.



Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT

Chương 3 - Mạch khuếch đại liên tầng

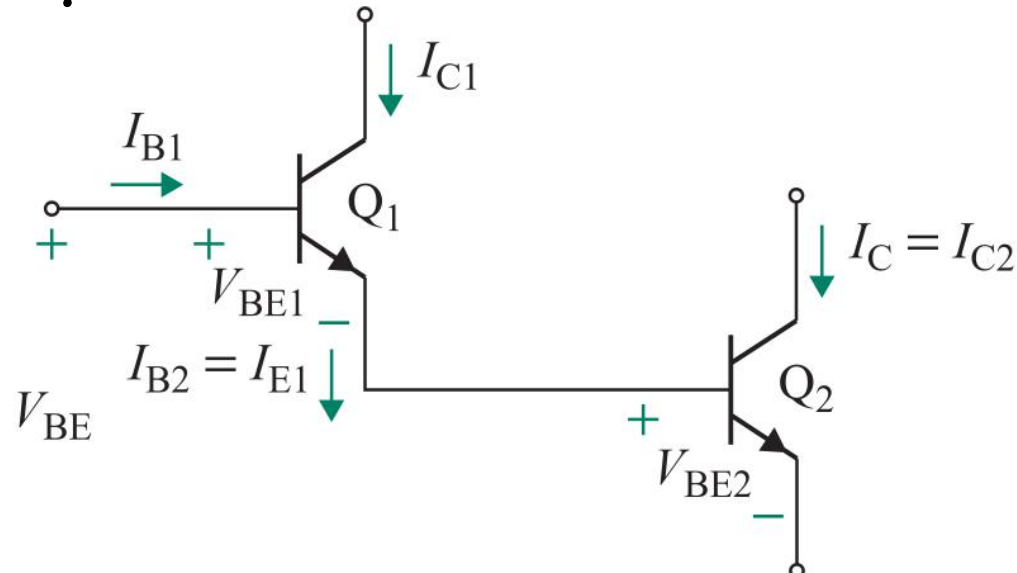
1. Mạch ghép Cascade
2. Mạch ghép Cascode
- **3. Mạch ghép Darlington**
4. Mạch ghép vi sai

3. Mạch ghép Darlington

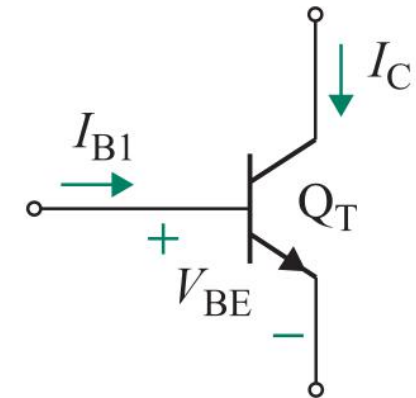
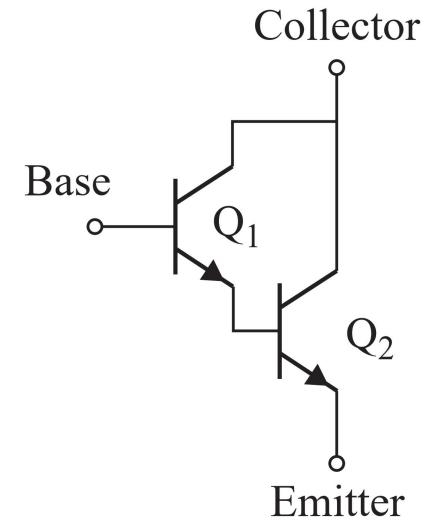
- Là mạch dùng 2 BJT kết nối như hình.
- Có thể xem như tương đương với 1 BJT có

$$\beta = \beta_1\beta_2$$

khi khảo sát chế độ AC.



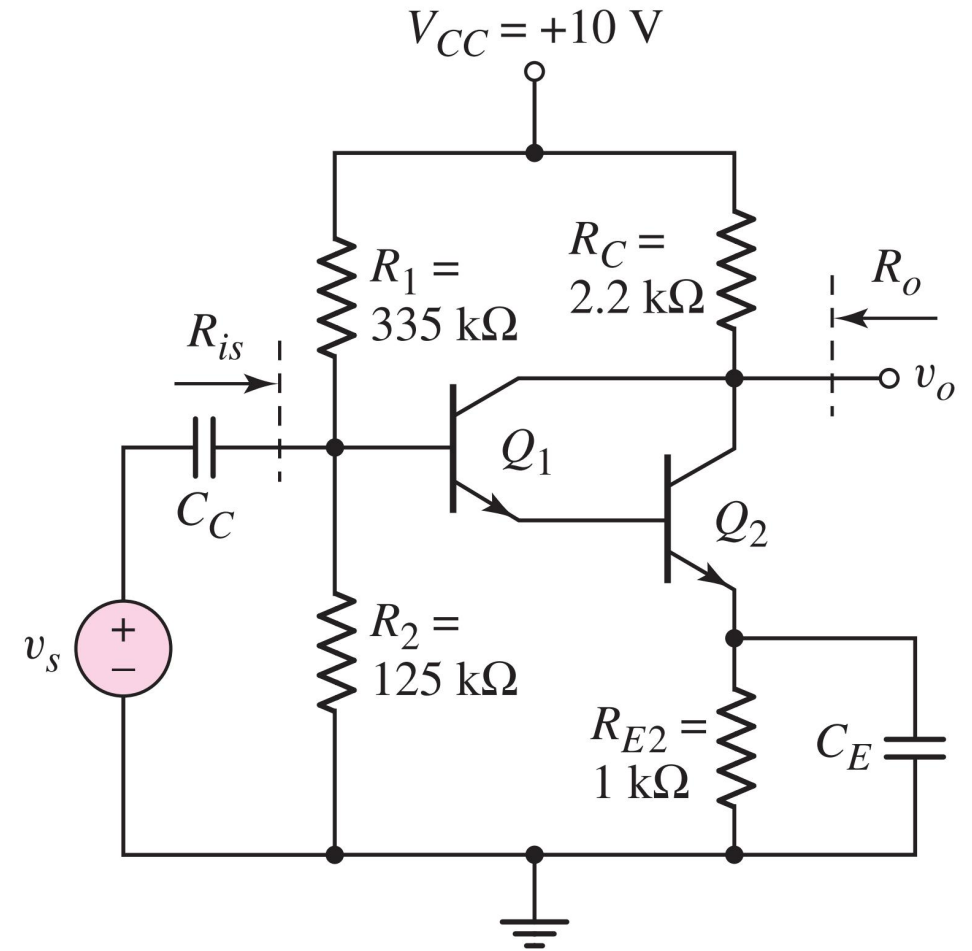
Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT



3. Mạch ghép Darlington

Ví dụ: Mạch khuếch đại Darlington, với 2 BJT giống nhau có $\beta = 100$.

- a. Xác định điểm làm việc tĩnh của 2 BJT.
- b. Xác định độ lợi áp và các trở kháng vào ra.

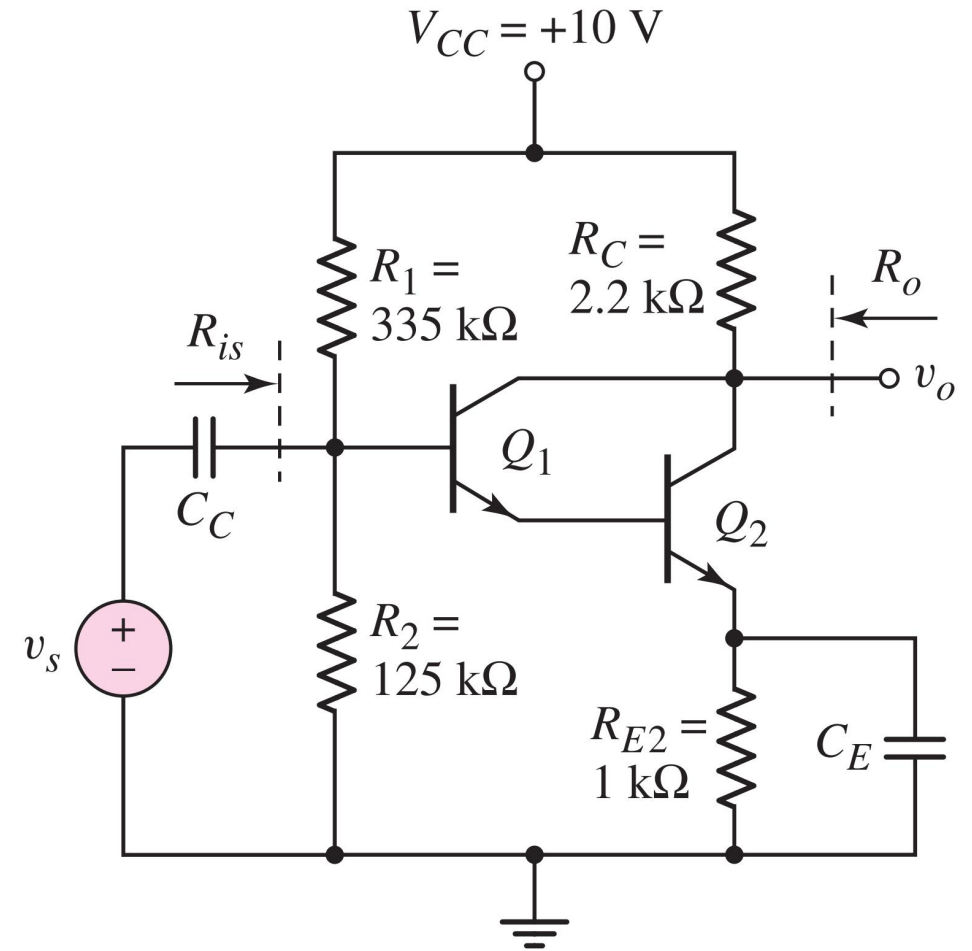


3. Mạch ghép Darlington

Đáp án:

a. $I_{C1} = 12.8\mu\text{A}$, $I_{C2} = 1.29\text{mA}$, $V_{CE1} = 5.14\text{V}$,
 $V_{CE2} = 5.84\text{V}$.

b. $A_v = -55.2$, $R_i = 74.3\text{k}\Omega$, $R_o = 2.2\text{k}\Omega$.



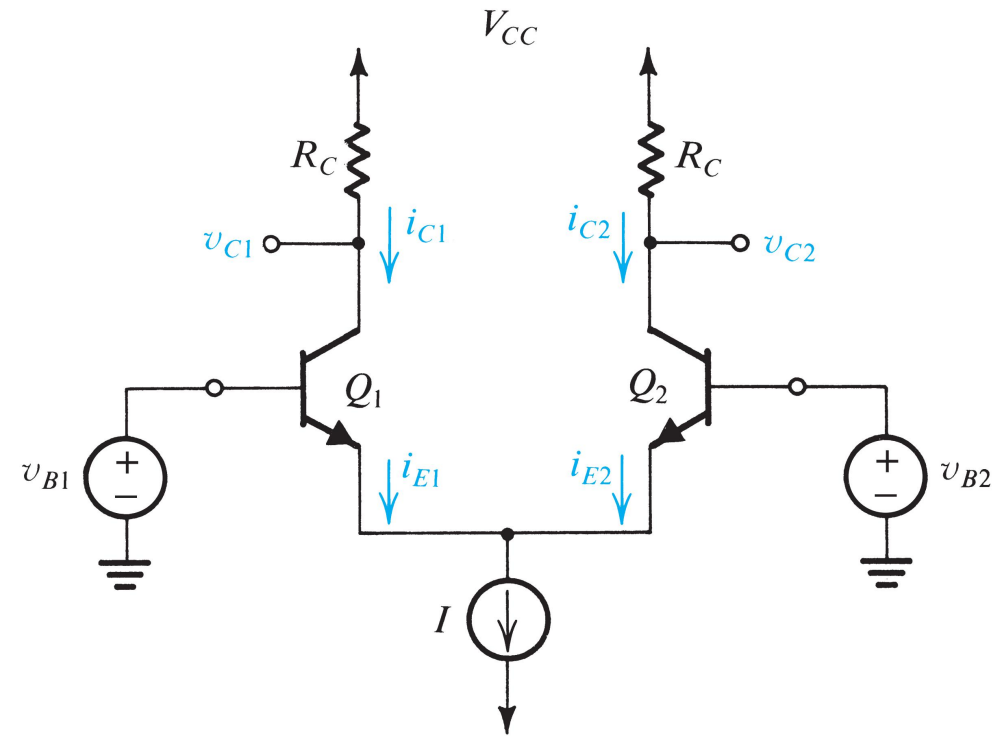
Chương 3 - Mạch khuếch đại liên tầng

1. Mạch ghép Cascade
2. Mạch ghép Cascode
3. Mạch ghép Darlington

➤ **4. Mạch ghép vi sai**

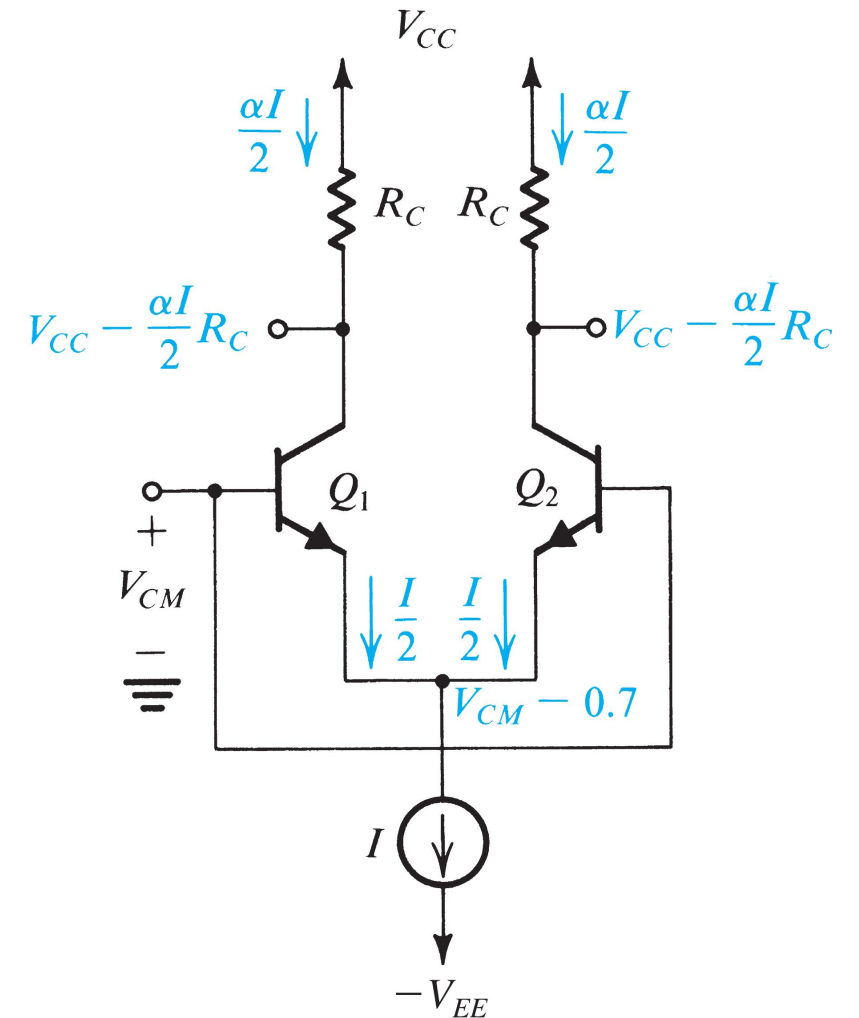
4. Mạch ghép vi sai

- Là mạch gồm 2 BJT hoàn toàn giống nhau, kết nối như hình bên.
- Nguồn dòng cực E xem như nguồn dòng lý tưởng, với trở kháng $\rightarrow \infty$.
- Có thể sử dụng R_E thay cho nguồn dòng, nhưng ở đây tập trung phân tích trường hợp sử dụng nguồn dòng, trường hợp sử dụng R_E sinh viên tự phân tích, thông qua một số bài tập ở cuối chương.



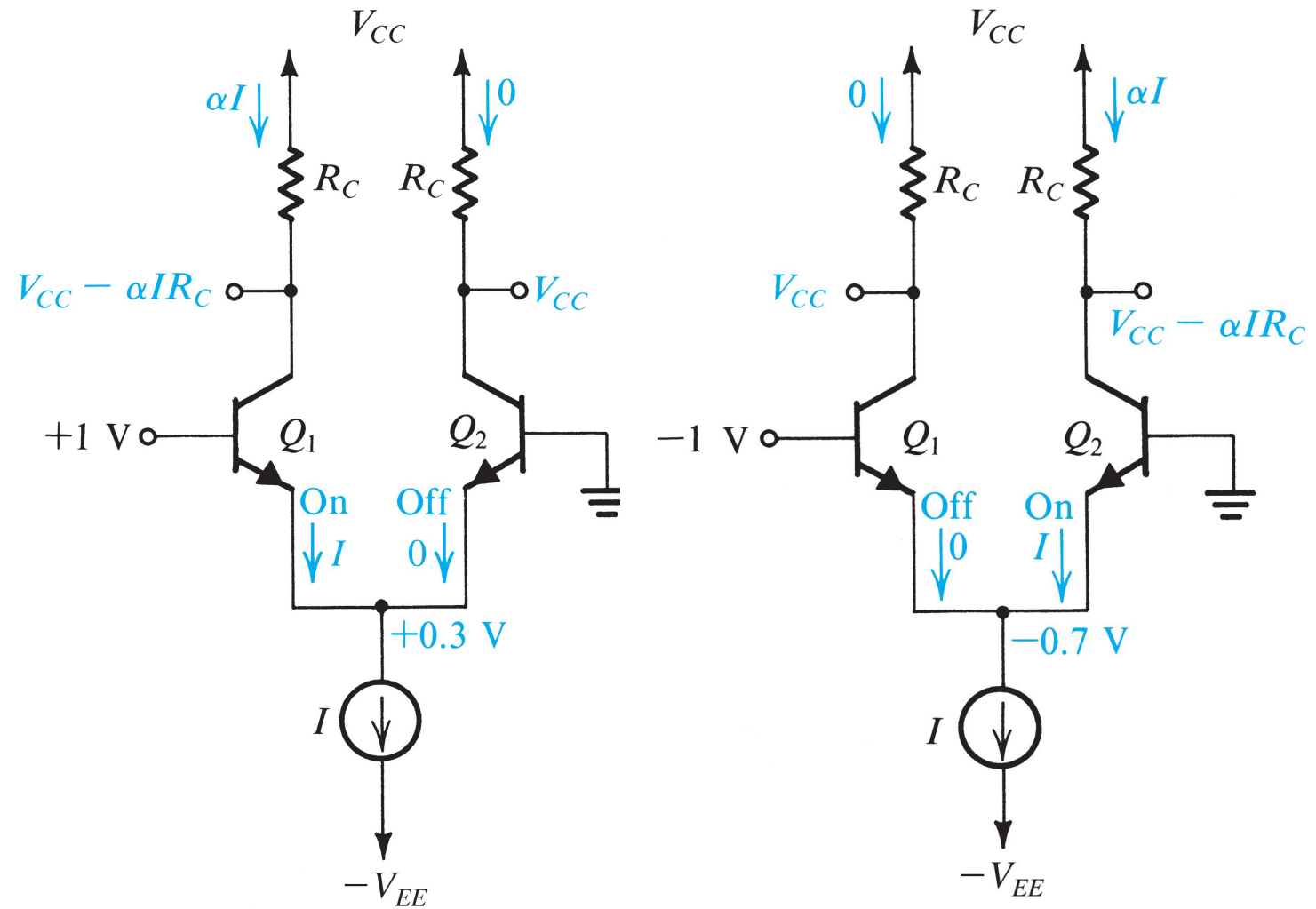
4. Mạch ghép vi sai

- Xét trường hợp $v_{B1} = v_{B2} = V_{CM}$. Do 2 BJT hoàn toàn giống nhau nên dễ dàng xác định các giá trị dòng áp như hình.
- Trong trường hợp này, nếu thay đổi giá trị V_{CM} nhưng vẫn đủ để duy trì cho 2 BJT hoạt động trong vùng tích cực, thì các đại lượng dòng - áp ở cực C duy trì không đổi, và không phụ thuộc vào V_{CM} .



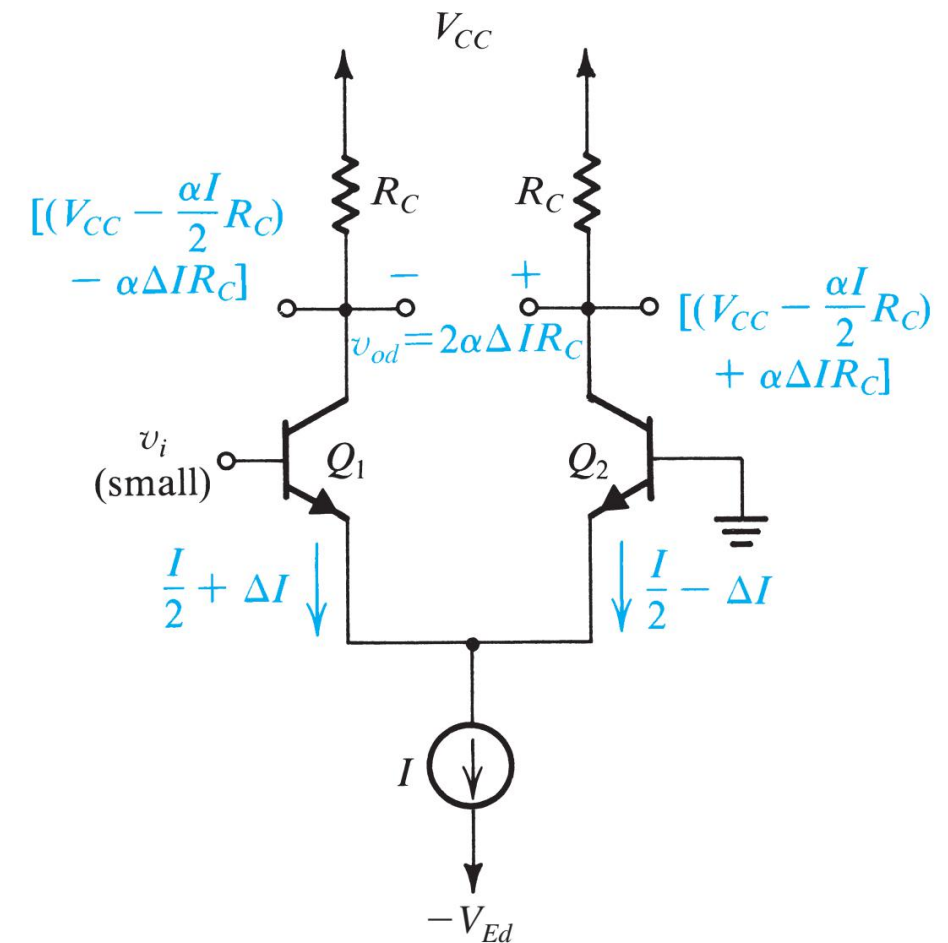
4. Mạch ghép vi sai

- Xét trường hợp $v_{B1} = 1V$, $v_{B2} = 0$ và trường hợp $v_{B1} = -1V$, $v_{B2} = 0$, ta thấy điện áp cực C thay đổi khi sự chênh lệch giữa hai điện áp ngõ vào thay đổi.



4. Mạch ghép vi sai

- Nếu chênh lệch áp ngõ vào là v_i đủ nhỏ, thì dòng điện cực E của 2 BJT lần lượt là $I/2 \pm \Delta I$, với ΔI tỉ lệ v_i .
- Khi đó áp tại cực C của 2 BJT sẽ chênh nhau một lượng $2\alpha\Delta I \cdot R_C$, có nghĩa là cũng tỉ lệ với v_i .



4. Mạch ghép vi sai

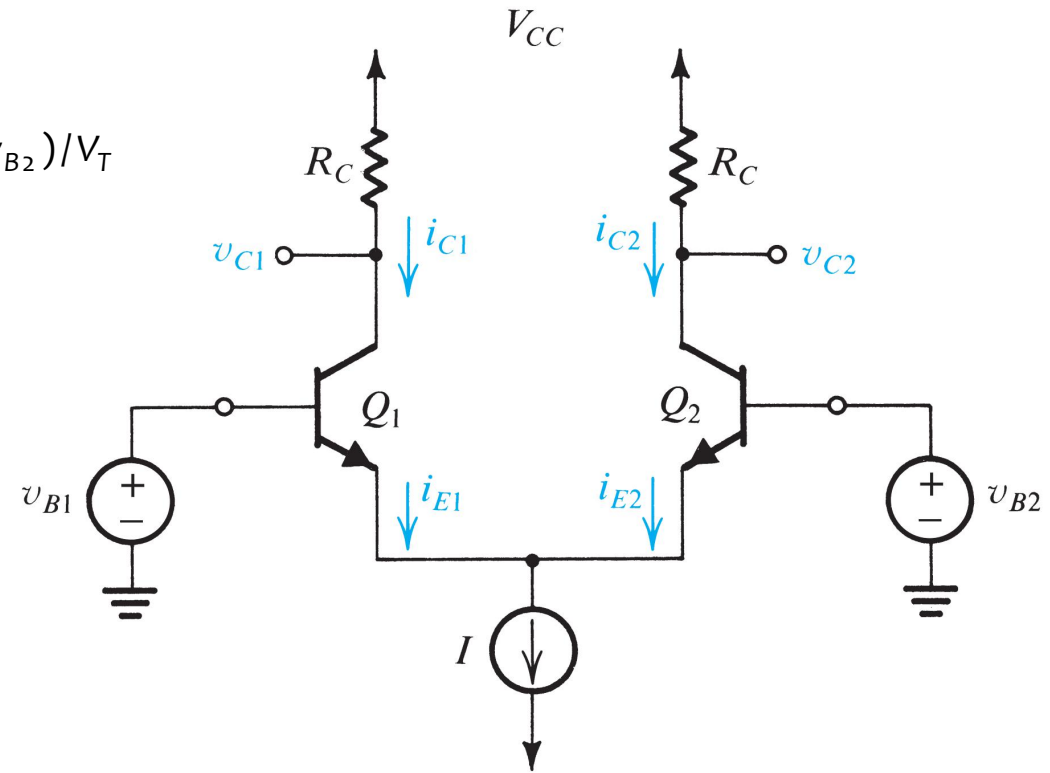
- Trường hợp tổng quát, bỏ qua hiệu ứng Early:

$$i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B1} - v_E)/V_T}; \quad i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(v_{B2} - v_E)/V_T} \Rightarrow \frac{i_{E1}}{i_{E2}} = e^{(v_{B1} - v_{B2})/V_T}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{i_{E1}}{i_{E1} + i_{E2}} = \frac{1}{1 + e^{(v_{B2} - v_{B1})/V_T}} \\ \frac{i_{E2}}{i_{E1} + i_{E2}} = \frac{1}{1 + e^{(v_{B1} - v_{B2})/V_T}} \end{cases}$$

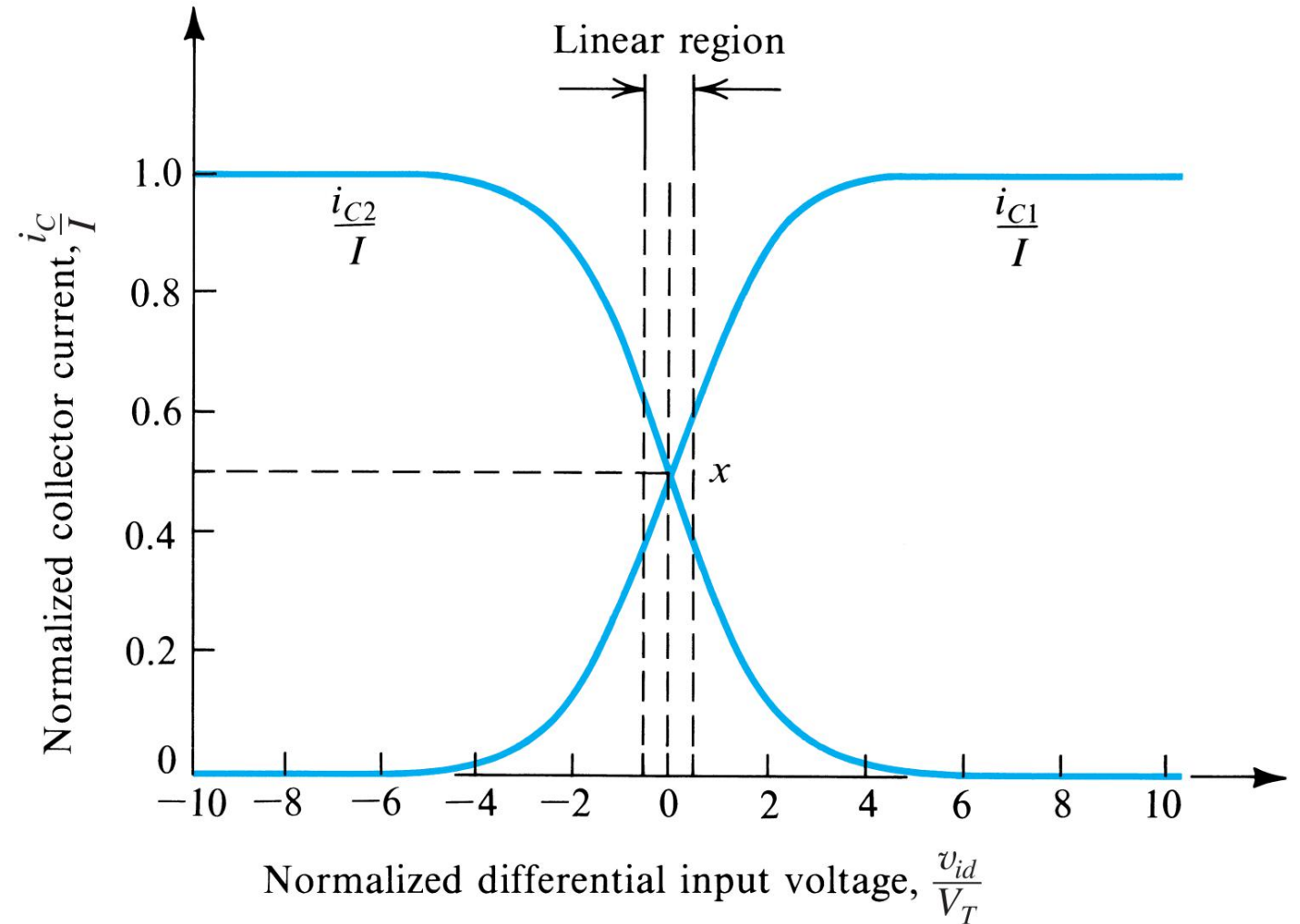
Do $i_{E1} + i_{E2} = I$ và đặt $v_{B1} - v_{B2} = v_{id}$:

$$\Rightarrow \begin{cases} i_{E1} = \frac{I}{1 + e^{-v_{id}/V_T}} \\ i_{E2} = \frac{I}{1 + e^{v_{id}/V_T}} \end{cases}$$



4. Mạch ghép vi sai

- Xấp xỉ $\alpha \approx 1$, khi đó nếu v_{id} đủ nhỏ thì có thể điều khiển dòng i_c gần như tuyến tính theo v_{id} .



4. Mạch ghép vi sai

Phân tích mạch tín hiệu nhỏ:

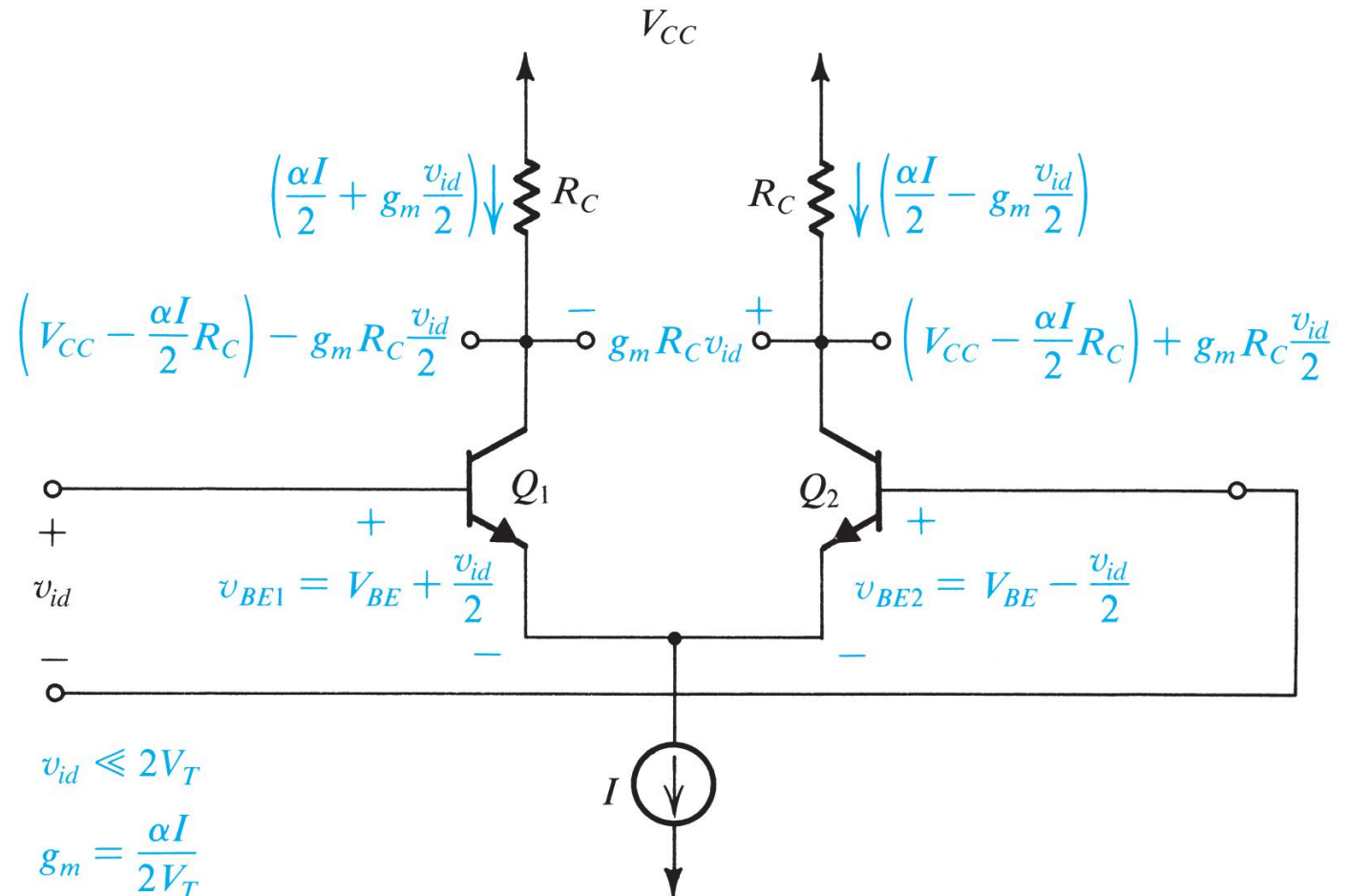
- Điện áp ngõ vào của 2 BJT là:

$$v_{1,2} = V_{CM} \pm \frac{v_{id}}{2}$$

Lưu ý:

- CM: common mode
- d: differential mode

$$i_{C1} = \frac{\alpha I}{1 + e^{-\frac{v_{id}}{V_T}}} = \frac{\alpha I e^{\frac{v_{id}}{2V_T}}}{e^{\frac{v_{id}}{2V_T}} + e^{-\frac{v_{id}}{2V_T}}}$$



Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT

4. Mạch ghép vi sai

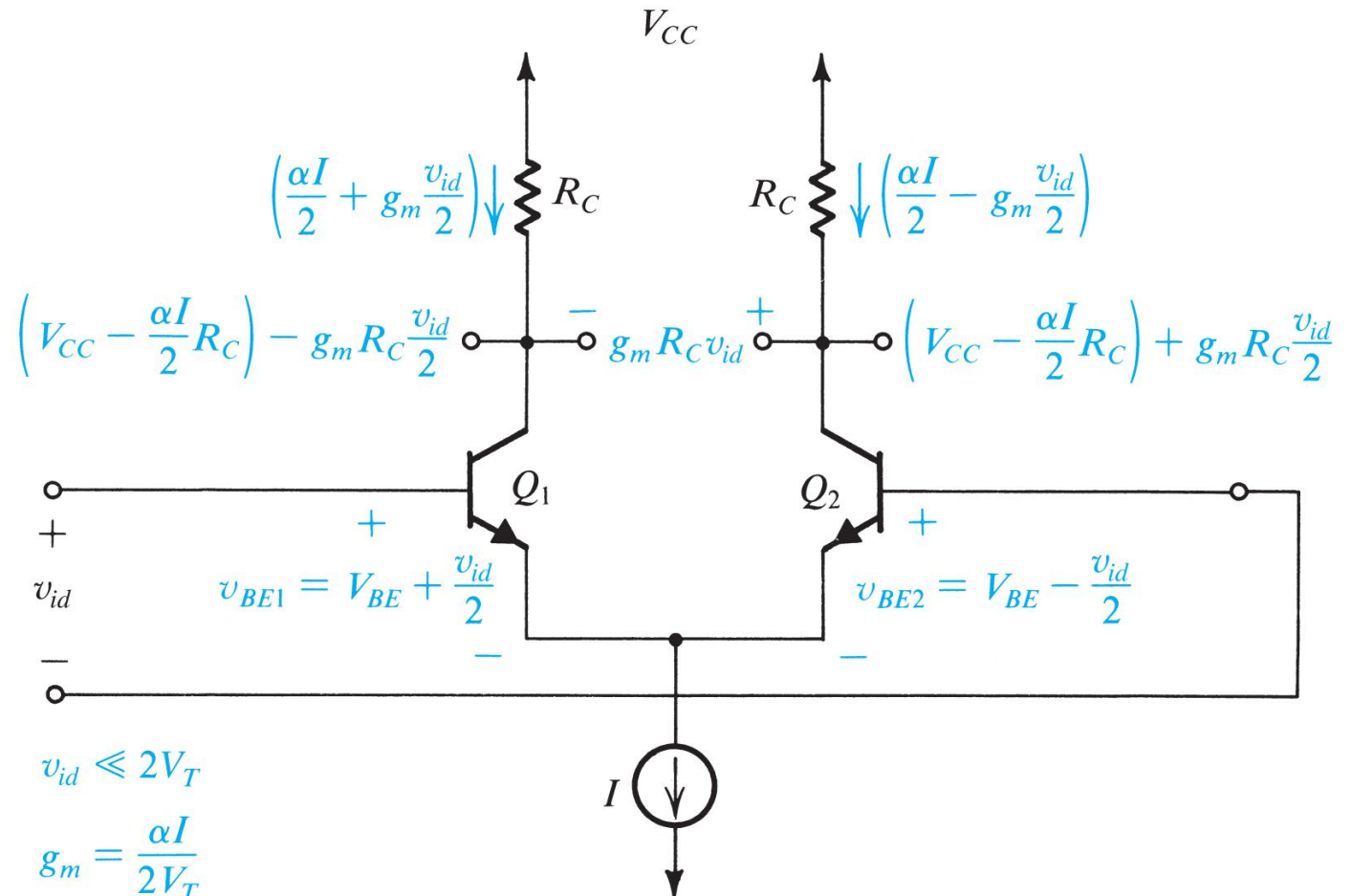
Giả sử $v_{id} \ll 2V_T$:

$$i_{C1} \approx \frac{\alpha I \left(1 + \frac{v_{id}}{2V_T} \right)}{1 + \frac{v_{id}}{2V_T} + 1 - \frac{v_{id}}{2V_T}}$$

$$= \frac{\alpha I}{2} + \frac{\alpha I}{2V_T} \frac{v_{id}}{2} = \frac{\alpha I}{2} + g_m \frac{v_{id}}{2}$$

Tương tự:

$$i_{C2} \approx \frac{\alpha I}{2} - g_m \frac{v_{id}}{2}$$



Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT

4. Mạch ghép vi sai

Độ lợi áp vi sai (Differential Voltage Gain):

$$\begin{cases} i_{C1} = I_{C1} + g_m \frac{V_{id}}{2} \\ i_{C2} = I_{C1} - g_m \frac{V_{id}}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_{C1} = (V_{CC} - I_C R_C) - g_m R_C \frac{V_{id}}{2} = V_{C1} + v_{c1} \\ v_{C2} = (V_{CC} - I_C R_C) + g_m R_C \frac{V_{id}}{2} = V_{C2} + v_{c2} \end{cases}$$

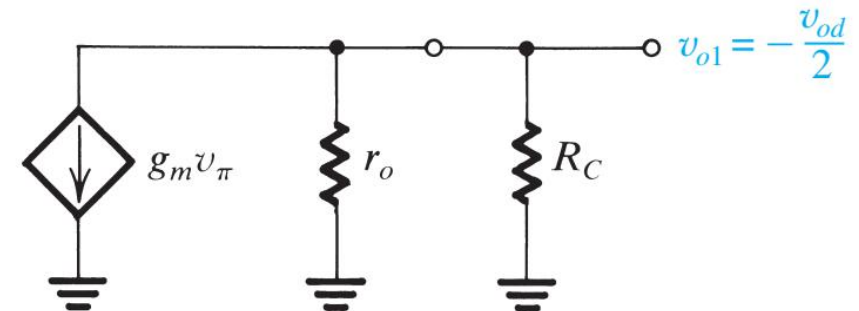
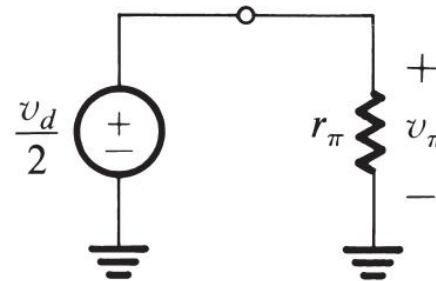
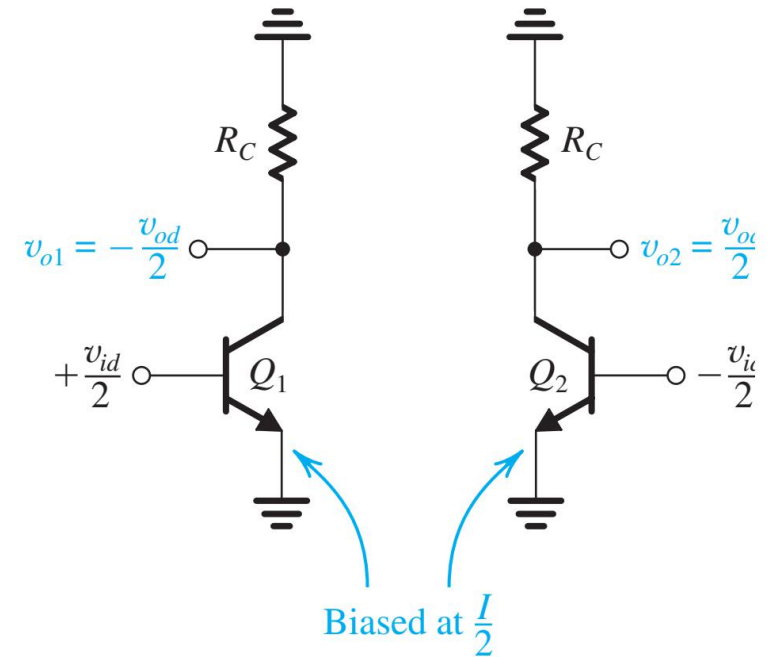
$$A_d = \frac{V_{od}}{V_{id}} = \frac{V_{c2} - V_{c1}}{V_{id}} = g_m R_C$$

4. Mạch ghép vi sai

- Do 2 BJT được phân cực hoàn toàn giống nhau nên có thể tách thành 2 mạch khuếch đại CE.
- Nếu chỉ xét riêng ngõ ra của một BJT, giả sử Q₁, khi đó:

$$A_d = \frac{v_{o1}}{v_{id}} = -\frac{g_m(R_C \parallel r_o)}{2} = -\frac{\beta}{2r_\pi}(R_C \parallel r_o)$$

$$\approx -\frac{g_m R_C}{2} = -\frac{\beta}{2r_\pi} R_C$$



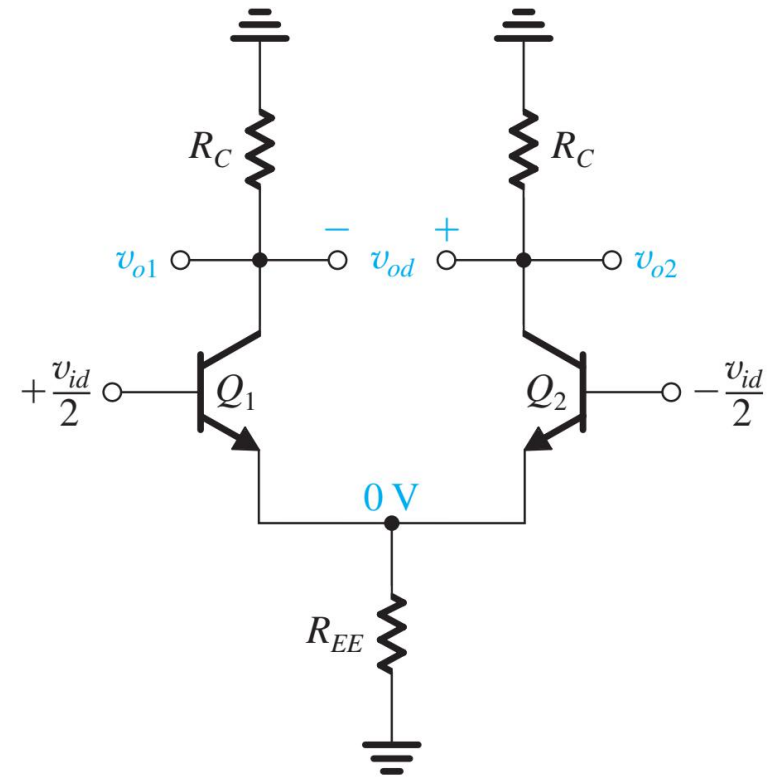
4. Mạch ghép vi sai

- Trường hợp nguồn dòng có nội trở $R_{EE} < \infty$, bài toán sẽ phức tạp hơn nhiều:

$$V_{o1} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} \left\{ \frac{\frac{V_{id}}{2} \left[1 + \frac{r_\pi}{(1+\beta)R_{EE}} \right] - \left(-\frac{V_{id}}{2} \right)}{2 + \frac{r_\pi}{(1+\beta)R_{EE}}} \right\}$$

- Tuy nhiên do thông thường $(1+\beta)R_{EE} \gg r_\pi$, nên trường hợp này vẫn có thể xấp xỉ

$$A_d = -\frac{V_{o1}}{V_{id}} \approx -\frac{g_m R_C}{2} = -\frac{\beta}{2r_\pi} R_C$$



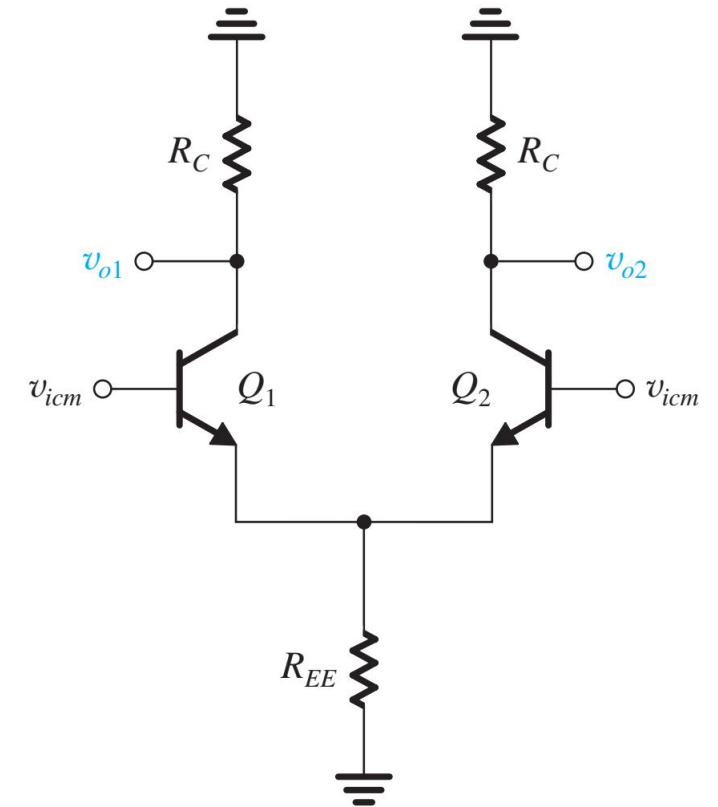
4. Mạch ghép vi sai

Độ lợi mode chung (Common-Mode Gain): ngõ vào

$$V_1 = V_2 = V_{icm}$$

- Nếu mạch vi sai phân cực với nguồn dòng lý tưởng (trở kháng = ∞) như ở phần trước thì $A_{cm} = 0$ (ngõ ra của mỗi BJT chỉ có thành phần DC, không có thành phần AC).

- Thực tế thì nguồn dòng có nội trở $R_{EE} < \infty$, nên có mạch tương đương AC như hình.



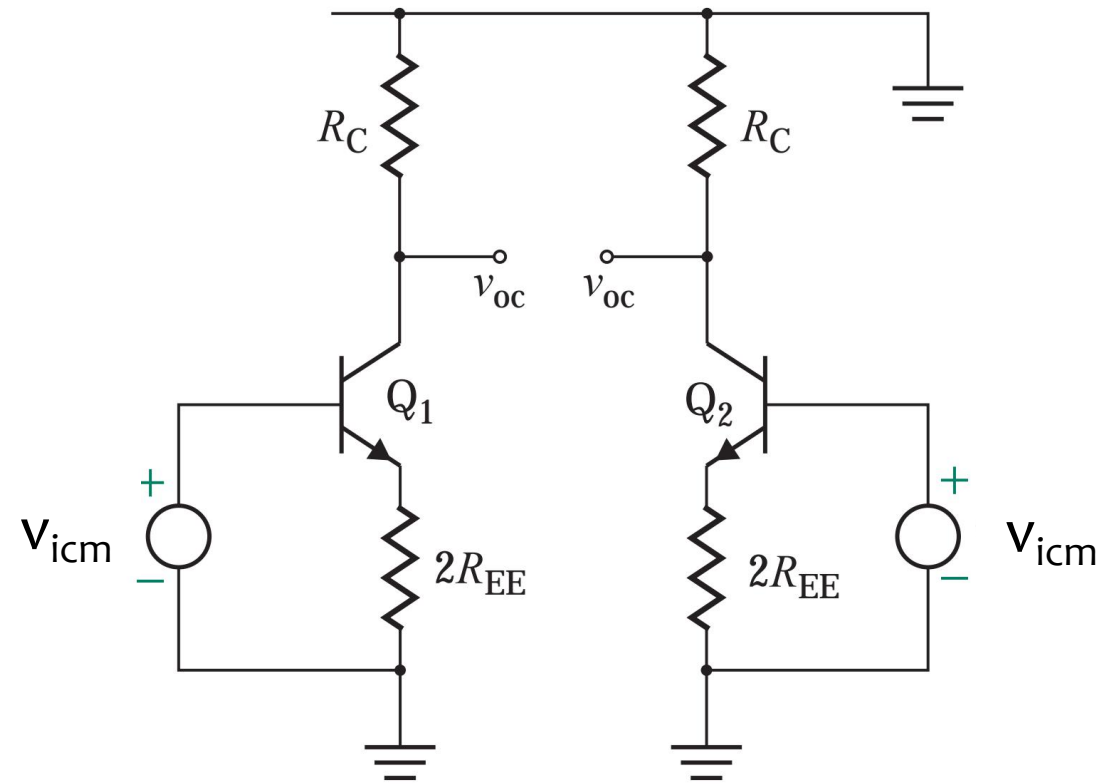
4. Mạch ghép vi sai

- Do tính đối xứng, có thể tách thành 2 mạch độc lập.

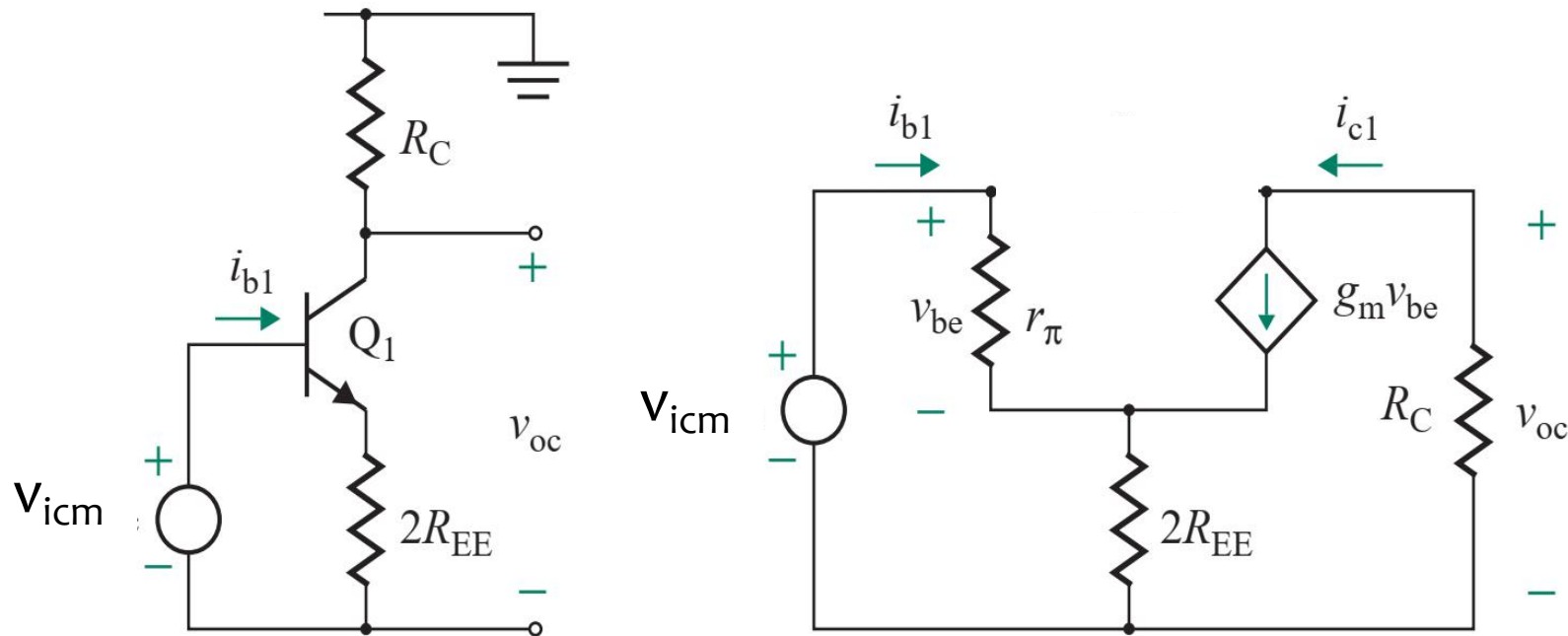
- Trường hợp này, nếu xét:

$$V_{ocm} = V_{c2} - V_{c1} = 0$$

thì hệ số khuếch đại cũng bằng 0, tuy nhiên để xem xét kỹ hơn, ta **tính độ lợi riêng cho từng BJT.**



4. Mạch ghép vi sai



- Độ lợi mode chung (common mode gain):

$$A_{cm} = \frac{v_o}{v_{icm}} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi + (\beta + 1)2R_{EE}}$$

4. Mạch ghép vi sai

Tỉ số nén (triệt) tín hiệu đồng pha CMRR (Common-Mode Rejection Ratio):

$$CMRR = \frac{|A_d|}{|A_{cm}|}; \quad CMRR_{dB} = 20 \log_{10} \frac{|A_d|}{|A_{cm}|}$$

Một số nhận xét:

- Nếu mạch vi sai phân cực bằng nguồn dòng lý tưởng thì $CMRR \rightarrow \infty$.
- Thực tế thì nguồn dòng không lý tưởng: $CMRR < \infty$.
- Có thể phân cực mạch vi sai dùng điện trở R_E chứ không nhất thiết phải dùng nguồn dòng, tuy nhiên CMRR sẽ bị giảm đáng kể.

4. Mạch ghép vi sai

Trường hợp hai ngõ vào v_1 và v_2 bất kỳ:

Khi đó, đặt:
$$\begin{cases} v_{id} = v_1 - v_2 \\ v_{icm} = \frac{v_1 + v_2}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_1 = v_{icm} + \frac{v_d}{2} \\ v_2 = v_{icm} - \frac{v_d}{2} \end{cases}$$

Do đang xét mạch ở vùng (gần như) tuyến tính, nên có thể áp dụng phương pháp xếp chồng, bằng cách xét lần lượt:

- Mode vi sai: $v_1 = v_d/2$; $v_2 = -v_d/2$, tính được $A_d = v_{o1}/v_d$.
- Mode chung: $v_1 = v_2 = v_{icm}$, tính được $A_{cm} = v_{o1}/v_{icm}$.

Xếp chồng: $v_{o1} = A_d v_d + A_{cm} v_{icm}$.

Nếu ngõ ra lấy ở v_{o2} thì cũng làm tương tự.

4. Mạch ghép vi sai

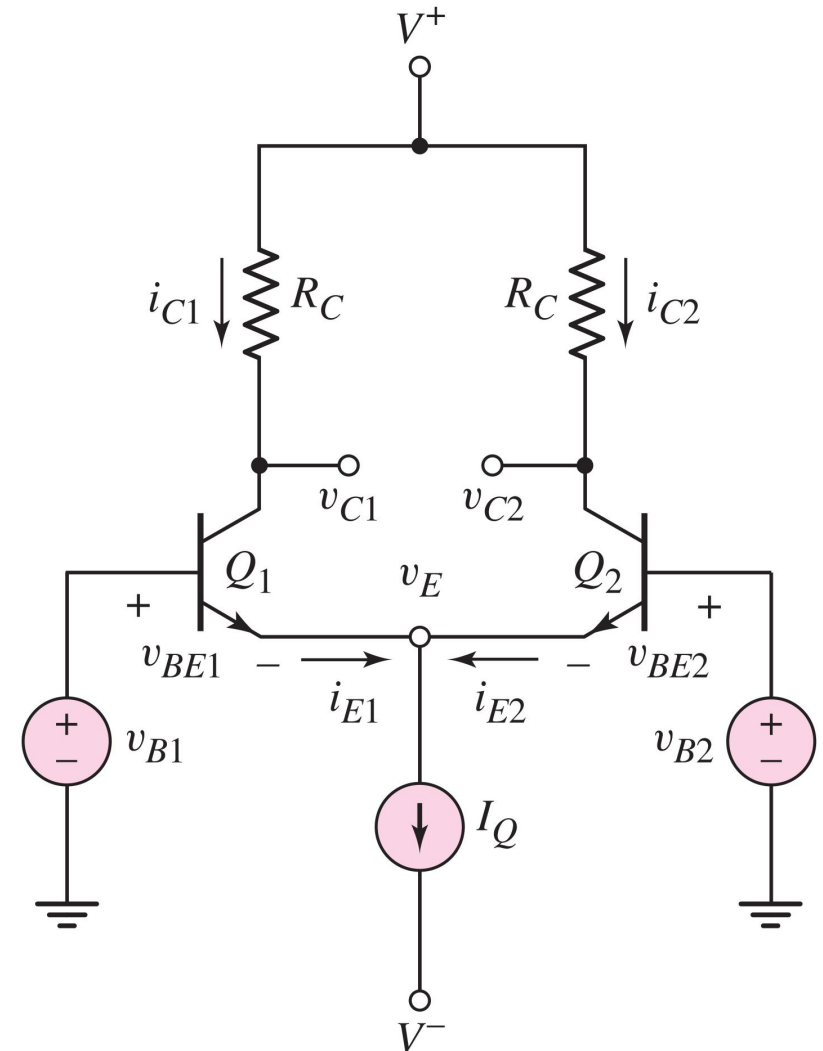
Ví dụ: Cho mạch vi sai như hình với:

$V^+ = 10V$, $V^- = -10V$, $I_Q = 0.8mA$, $R_C = 12k\Omega$.

BJT có $\beta = 100$, $V_A = \infty$, $V_T = 26mV$.

Nguồn dòng có nội trở R_o (hay R_{EE}) = $25k\Omega$.

Xét ngõ ra tại v_{C2} , tính A_d , A_{cm} , CMRR.



4. Mạch ghép vi sai

Đáp án:

$$I_{CQ2} = I_Q/2 = 0.4\text{mA.}$$

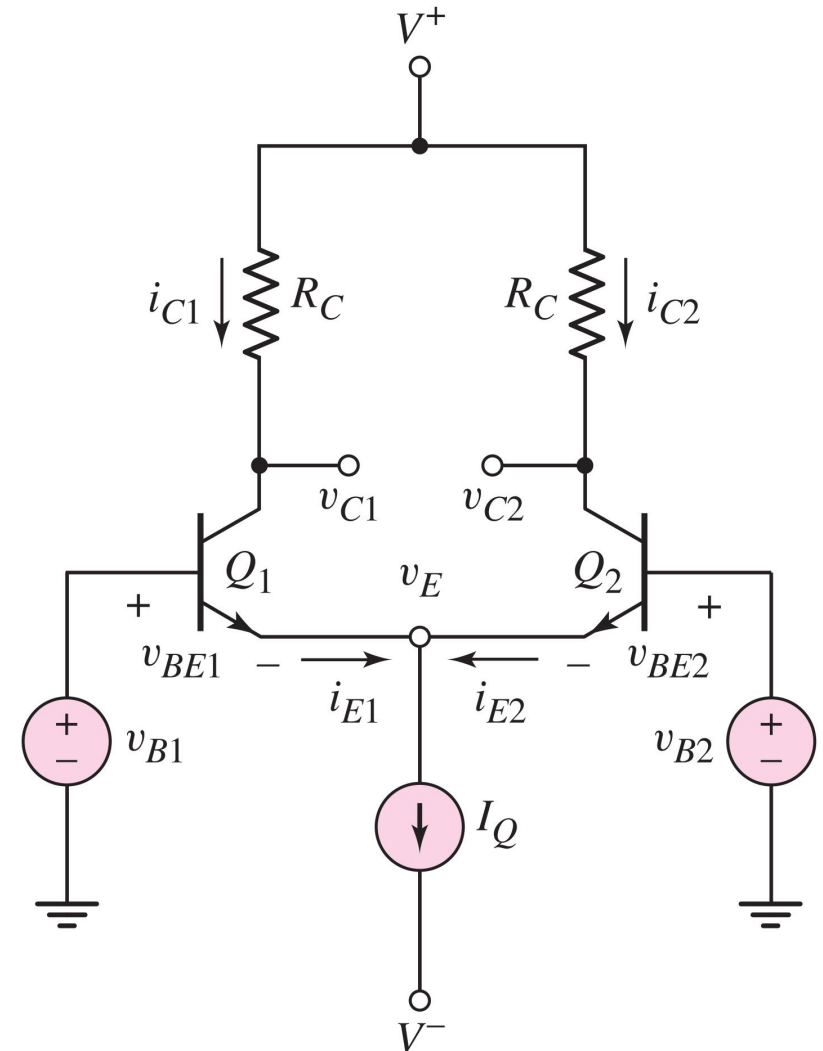
$$r_{\pi} = 6500\Omega.$$

$$A_d \approx -\frac{\beta R_C}{2r_{\pi}} = -92.3$$

$$A_{cm} = -\frac{\beta R_C}{r_{\pi} + (\beta + 1)2R_{EE}} = -0.237$$

$$\text{CMRR} = 389$$

$$\text{CMRR}_{dB} = 51.8\text{dB}$$



Nguyễn Phước Bảo Duy - HCMUT

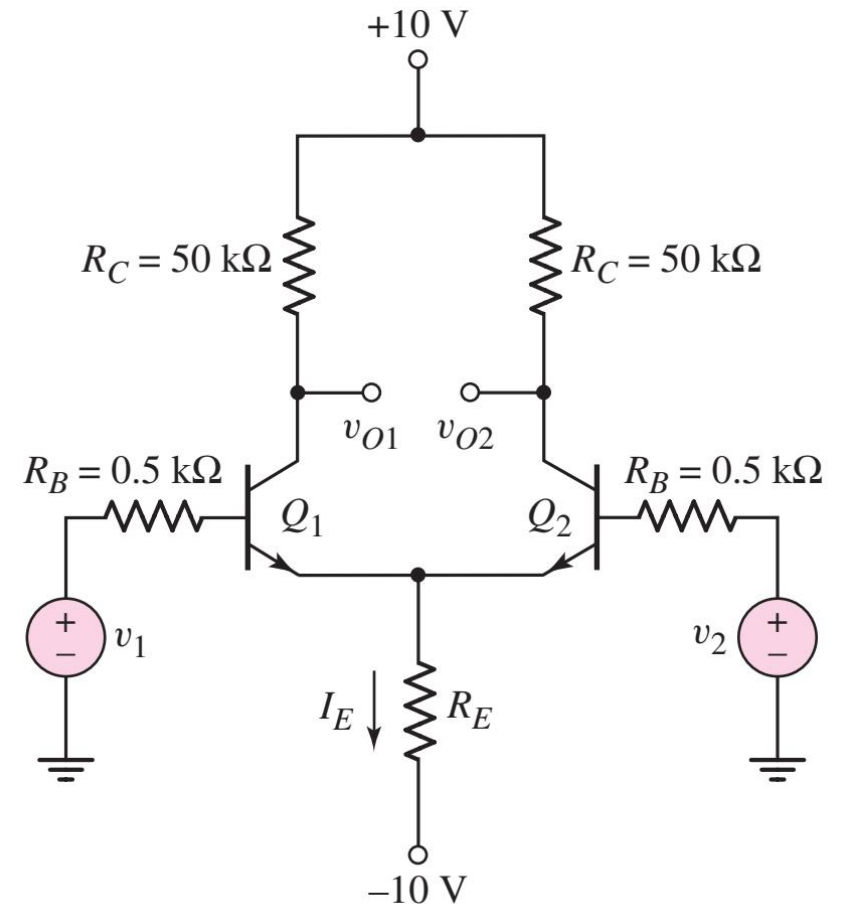
4. Mạch ghép vi sai

Ví dụ: Cho mạch vi sai như hình, $R_E = 66\text{k}\Omega$.

$\beta = 100$, $V_A = \infty$, $V_T = 26\text{mV}$.

a. Tính toán các giá trị phân cực DC.

b. Tính A_d , A_{cm} và CMRR với ngõ ra v_{o2} .



4. Mạch ghép vi sai

Đáp án:

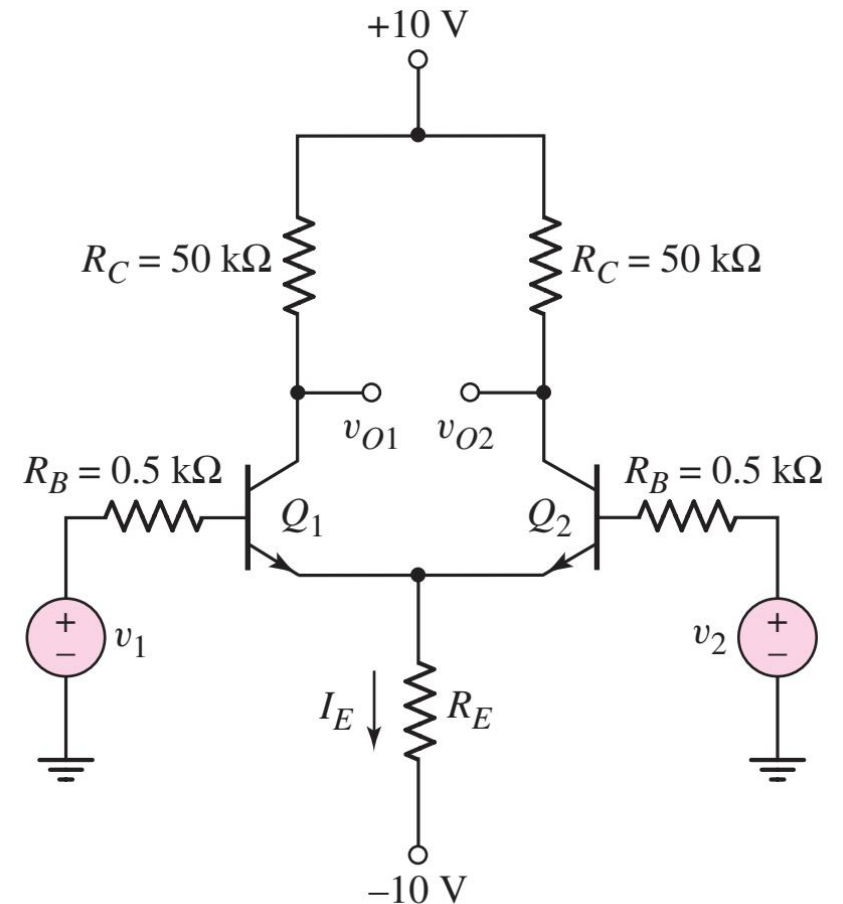
a. Do tính đối xứng: $I_{CQ1} = I_{CQ2} \dots$

$$I_{B1} = I_{B2} = \frac{10 - 0.7}{500 + 2 \times 101 \times 66000} = 0.70 \mu A$$

$$I_{C1} = I_{C2} = 70 \mu A$$

Từ đó tính được các giá trị DC khác.

$$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = \frac{26mV}{0.75 \mu A} = 37.1k\Omega$$



4. Mạch ghép vi sai

Đáp án:

b.

$$A_d \approx \frac{\beta R_C}{2(r_\pi + R_B)} = -66.5$$

$$A_{cm} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi + R_B + (\beta + 1)2R_{EE}} = -0.374$$

$$CMRR = 189.84$$

$$CMRR_{dB} = 45.56dB$$

