ĐHBK Tp HCM-Khoa Đ-ĐT
BMĐT
GVPT: Hồ Trung Mỹ
Môn học: Dụng cụ bán dẫn

Chương 5

BJT

BJT

- Giới thiệu
- Bức tranh ý niệm
- Đặc tính tĩnh của BJT
- **Các tham số hiệu năng của dụng cụ**
- **Các hiệu ứng thứ cấp**
- **Các đặc tuyến của BJT**
- Mô hình tín hiệu nhỏ của BJT – TD: Các mạch KĐ
- BJT ở tần số cao
- Các loại BJT khác
- Các ứng dụng của BJT: Gương dòng điện, …
- Thyristor

5.4 Thiết kế dụng cụ và các tham số hiệu năng của dụng cụ

- Trong phần này ta sẽ khảo sát làm thế nào việc thiết kế dụng cụ làm ảnh hưởng hiệu năng của BJT. Qua các tham số hình học và vật liệu mà ta có thể điều khiển/kiểm soát là nồng độ tạp chất, bề rộng miền nền, diện tích dụng cụ, và trong 1 số trường hợp là sự lựa chọn dụng cụ (TD: Si hoặc GaAs,...). Thường thì ta khó thay đổi hệ thống vật liệu vì khó thay đổi công nghệ xử lý.
- Các tham số hiệu năng chính mà ta muốn cải thiện là độ lợi dòng và tần số hoạt động của dụng cụ.
- Ta sẽ tập trung vào chế độ tích cực thuận của BJT NPN để có

$$V_{BE} >> V_T \quad \text{và } V_{BC} >> V_T$$

- Với BJT được thiết kế tốt, ta luôn có $W_b << L_b$

Hiệu suất phát

Theo định nghĩa:

$$\gamma_e = \frac{I_{EN}}{I_{EN} + I_{EP}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{EP}}{I_{EN}}} \approx 1 - \frac{I_{EP}}{I_{EN}}$$

(vì thực tế $I_{EP} << I_{EN}$)

Theo phần chứng minh trước (5.3.1), ta có

$$I_{EN} \approx qA(D_B/W_B)n_{b0} \exp(V_{BE}/V_T) + qA(W_B/\tau_B)\, n_{b0} \exp(V_{BE}/V_T)$$

$$I_{EN} \approx qA(D_B/W_B)n_{b0} \exp(V_{BE}/V_T)$$

và

$$I_{EP} \approx qA(D_E/L_E)\, p_{e0} \exp(V_{BE}/V_T)$$

Suy ra:

$$\boxed{\gamma_e \approx 1 - \frac{I_{EP}}{I_{EN}} = 1 - \frac{p_{e0}}{n_{b0}} \frac{D_E}{D_B} \frac{W_B}{L_E}}$$

Như vậy muốn có hiệu suất phát → 1, ta nên thiết kế dụng cụ có $W_B << L_E$ và $p_{eo} << n_{bo}$. Suy ra ta cần có ***bề rộng miền nền nhỏ*** và ***pha tạp chất ở E >> pha tạp chất ở B***. Dĩ nhiên bề rộng miền nền cũng có giới hạn không thể quá ngắn!

Hệ số vận chuyển miền nền

Theo định nghĩa: $$B = \frac{I_C}{I_{EN}}$$

Với I_C và I_{EN} (từ 5.3.1)

$I_C = qA(D_B/W_B)\, n_{b0} \exp(V_{BE}/V_T)$

$I_{EN} \approx qA(D_B/W_B) n_{b0} \exp(V_{BE}/V_T) + qA(W_B/2\tau_B) n_{b0} \exp(V_{BE}/V_T)$

(chú ý là thành phần thứ 2 ở I_{EN} luôn luôn << thành phần 1)

Suy ra:

$$B = \frac{1}{1+\frac{W_{Bn}^2}{2D_B\tau_B}} = \frac{1}{1+\frac{W_{Bn}^2}{2L_B^2}} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}\left(\frac{W_{Bn}}{L_B}\right)^2} \approx 1-\frac{1}{2}\left(\frac{W_{Bn}}{L_B}\right)^2$$ với $W_{Bn} << L_B$

Chú ý: Hệ số vận chuyển miền nền *B* phụ thuộc vào bề rộng miền nền trung hòa (W_{Bn}) chứ không phải bề rộng miền nền khi được chế tạo. Như vậy nó phụ thuộc vào điều kiện phân cực. Điều này làm gây ra hiệu ứng Early mà ta sẽ xét sau.

Độ lợi dòng và hỗ dẫn

Độ lợi dòng B chung:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{BI_{EN}}{I_{EN} + I_{EP}} = \gamma_e B = \left[1 - \frac{p_{e0}}{n_{b0}} \frac{D_E}{D_B} \frac{W_B}{L_E}\right]\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{W_{Bn}}{L_B}\right)^2\right]$$

Suy ra để có được độ lợi dòng cao, cần có W_B nhỏ, N_{AB} thấp và N_{DE} cao
Tỉ số của dòng thu I_C trên dòng nền I_B rất quan trọng vì người ta dùng dòng nền để điều khiển dụng cụ.

Độ lợi dòng E chung (DC):

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

Từ biểu thức trên, ta thấy để có β cao ta cần pha tạp chất cao ở miền phát và bề rộng miền nền nhỏ. Một tham số quan trọng khác cho thấy hiệu năng của dụng cụ là ***hỗ dẫn***, nó mô tả việc điều khiển dòng ra (I_C) bằng phân cực ngõ vào (V_{BE}). Hỗ dẫn có trị là

$$\boxed{g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{\beta I_B}{V_T}}$$

Hỗ dẫn của BJT rất cao so với FET có cùng kích thước.Điều này có được do I_C là hàm mũ theo V_{BE}.

- **Các tham số hiệu năng của BJT loại PNP:**
  - Hiệu suất phát $$\gamma_e = \frac{I_C}{I_{Ep} + I_{En}}$$
  - Hệ số vận chuyển miền nền $$B = \frac{I_C}{I_{Ep}}$$
  - Độ lợi dòng B chung $$\alpha = \gamma_e B = \frac{I_C}{I_E}$$
  - Độ lợi dòng E chung $$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

5.5 Các hiệu ứng thứ cấp

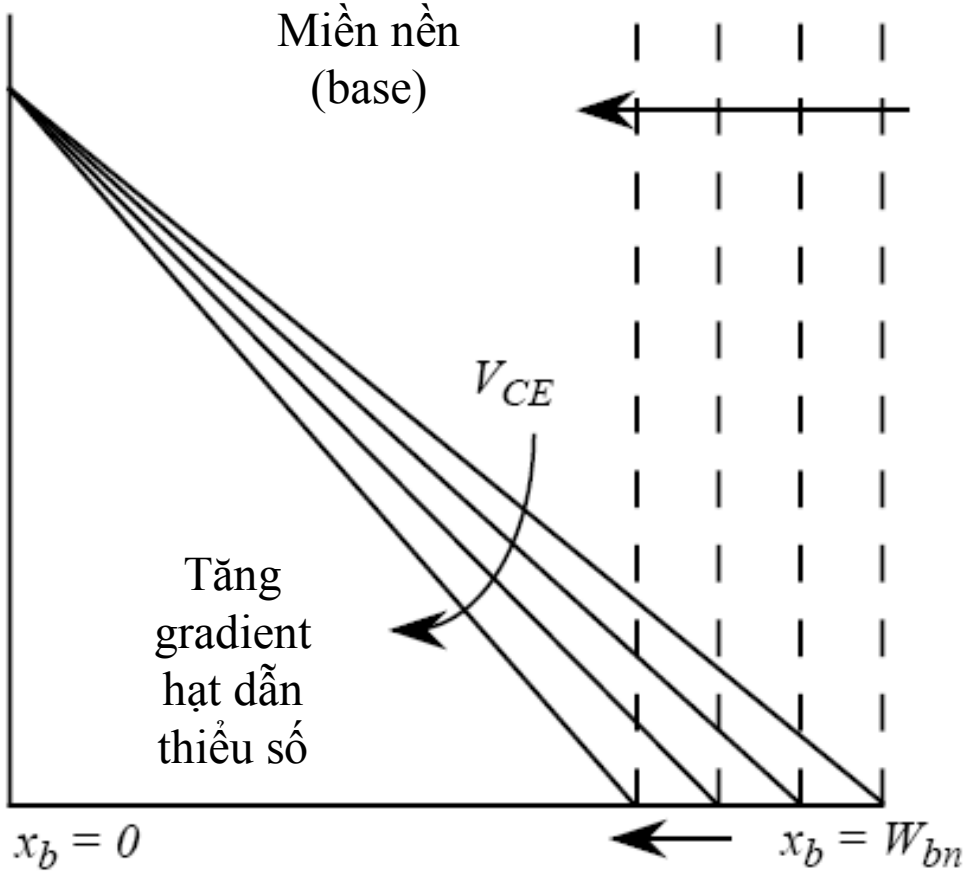
- Điều chế miền nền-hiệu ứng Early
- Đánh thủng: xuyên qua và thác lũ

Điều chế miền nền

Dòng điện thu tỉ lệ nghịch với W_{Bn} (bề rộng miền nền trung hòa)

Tăng V_{CE} làm giảm W_{Bn} → dòng I_C tăng.

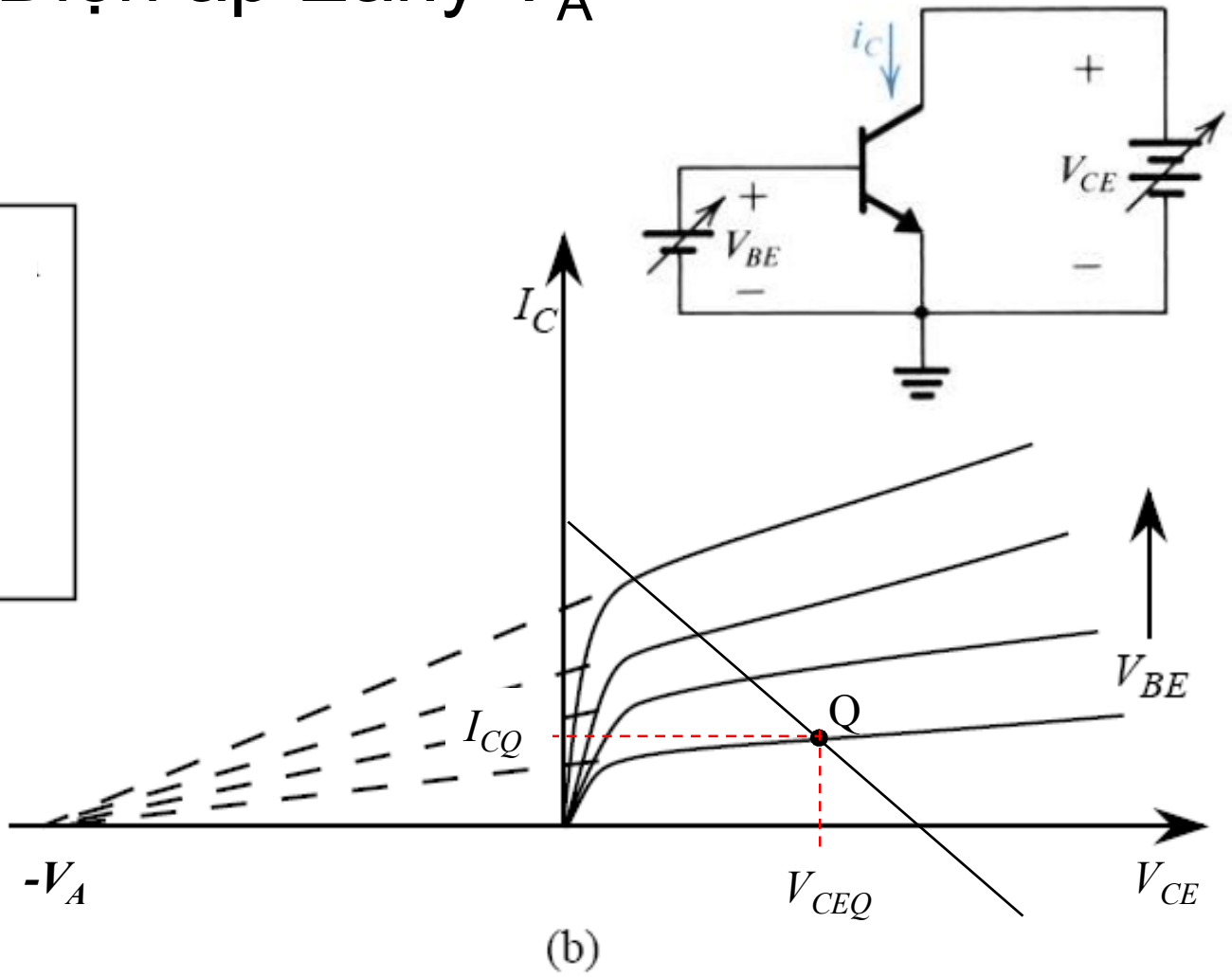
Khi thay đổi V_{CE} → W_{Bn} thay đổi (điều chế miền nền)



(a)

Điện áp Early V_A

Nếu pha tạp chất sao cho $N_{DC} << N_{AB}$ → bề rộng miền nghèo ở J_C sẽ nằm bên phía miền thu (Collector) → điện áp Early V_A lớn.



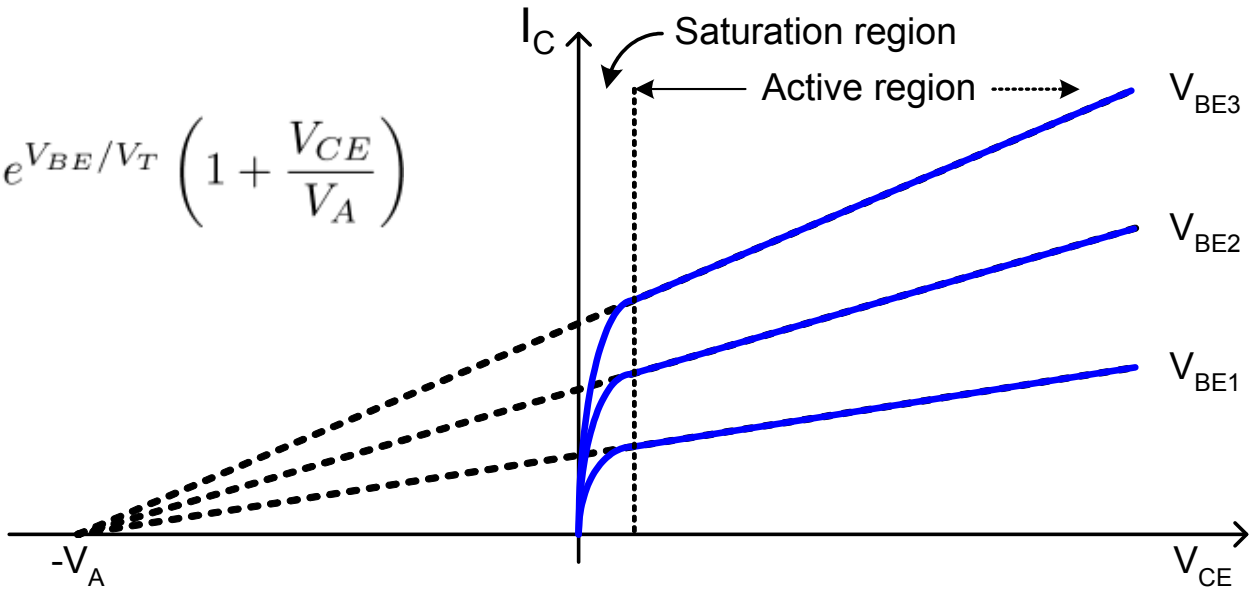
Điện trở ra r_o

$$r_o = \left.\frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C}\right|_Q = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}} \cong \frac{V_A}{I_{CQ}}$$

Với V_A = 50V đến 200V

Hiệu ứng Early

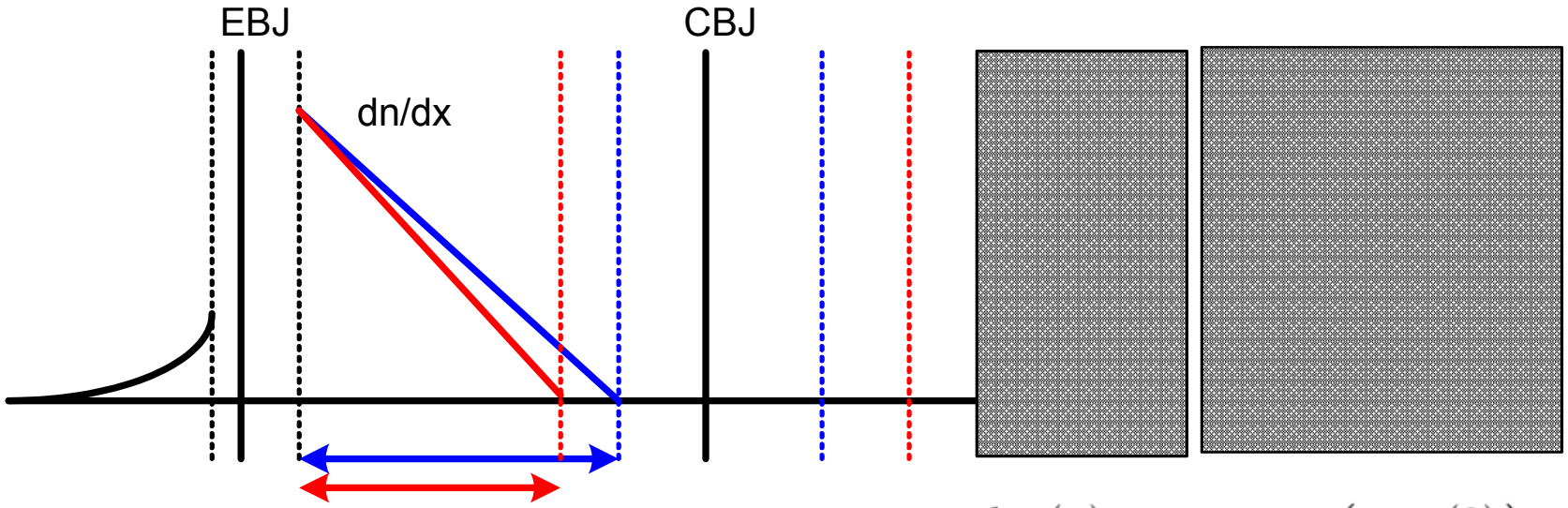
$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}\left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$



- Hiệu ứng Early
  - Dòng điện trong miền tích cực (hơi) phụ thuộc vào V_{CE}
  - V_A là tham số của BJT (50 đến 100) và được gọi là điện áp Early
  - Do sự giảm bề rộng miền nghèo hiệu dụng W_{Bn} khi phân cực ngược tăng
  - Làm xuất hiện thêm đại lượng điện áp Early trong phương trình dòng điện
  - Độ dốc khác không nghĩa là điện trở KHÔNG phải vô hận.

Hiệu ứng Early

- Cái gì gây ra hiệu ứng Early?
  - Tăng V_{CB} làm cho bề rộng miền nghèo của J_C tăng lên và như vậy bề rộng miền nền giảm (điều chế miền nền)
  - Bề rộng miền nền hiệu dụng W_{Bn} càng ngắn thì dn/dx càng cao.



$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx} = A_E q D_n \left(-\frac{n_p(0)}{W} \right)$$

Đánh thủng trong BJT

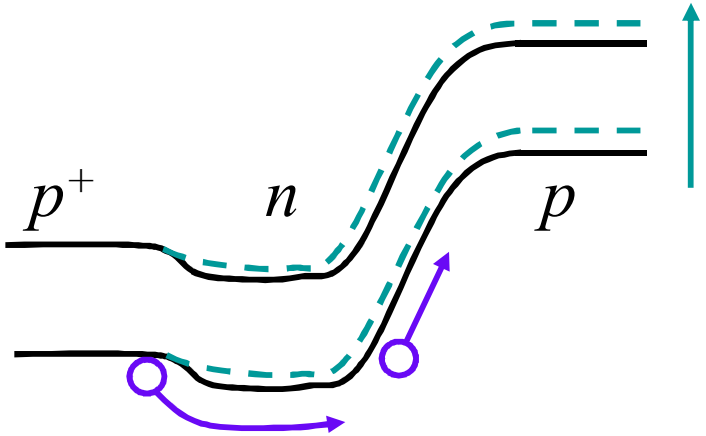
Có 2 cơ chế đánh thủng quan trọng trong BJT:

(1) **đánh thủng xuyên qua** (punch-through breakdown)

(2) **đánh thủng thác lũ** (avalanche breakdown)
[tương tự với đánh thủng trong các chuyển tiếp PN]

- ***Đánh thủng xuyên qua*** (***punch-through breakdown***) xảy ra khi điện áp phân cực ngược V_{BC} lớn đến nỗi mà các miền ghèo của J_E và J_C trộn lẫn nhau ($W_{Bn} \rightarrow 0$).

  Độ cao của rào E-B với lỗ bị ảnh hưởng bởi V_{BC}, nghĩa là sự tăng nhỏ trong V_{BC} cần cho sự tăng lớn ở I_C.



V_{BC} tăng

Chú ý: Điện áp xuyên-qua thường lớn hơn nhiều điện áp đánh thủng thác lũ

- Cơ chế ***đánh thủng thác lũ*** (avalance breakdown) trong BJT phụ thuộc vào cấu hình mạch (CE hay CB).

- Với cấu hình ***CB***, đánh thủng thác lũ trong J_C (E hở) BV_{BC} có được từ điện trường (đánh thủng) cực đại E_{BR} (~300 kV/cm với Si và 400 kV/cm với GaAs):

- Sự tăng dòng điện do điện áp BV_{BC} cao hơn được phản ánh qua ***hệ số nhân*** (multiplication factor) M_{CB} trong biểu thức dòng điện. Nó bằng trong các điều kiện làm việc bình thường, và lớn hơn 1 khi đánh thủng thác lũ xảy ra.

- Khi cực E hở, hệ số nhân của J_C là :

$$M_{CB} = \left[1 - \left(\frac{V_{BC}}{BV_{BC}} \right)^{m_b} \right]^{-1}$$

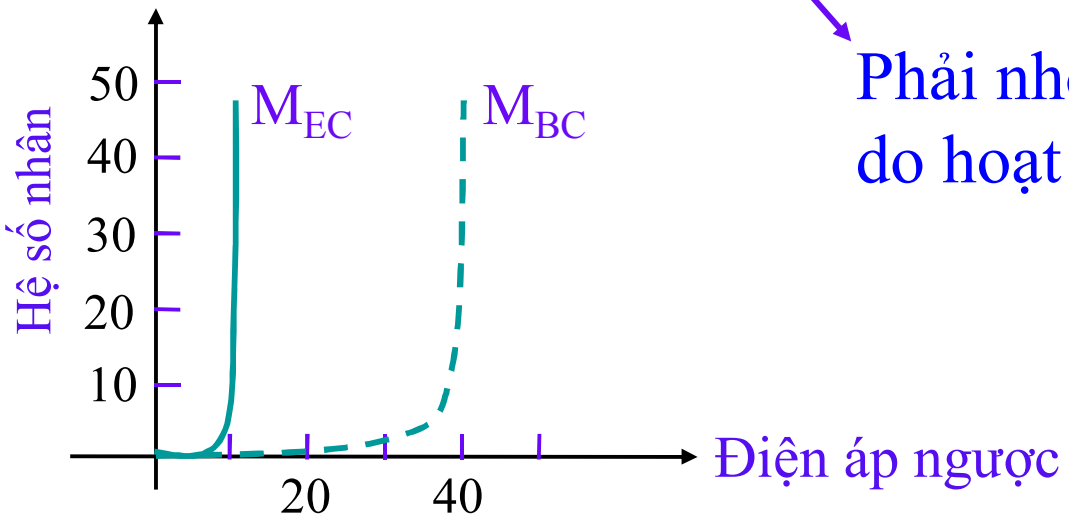
- Với cấu hình CE, điện áp đánh thủng CE là BV_{EC} có liên hệ với với BV_{BC}:

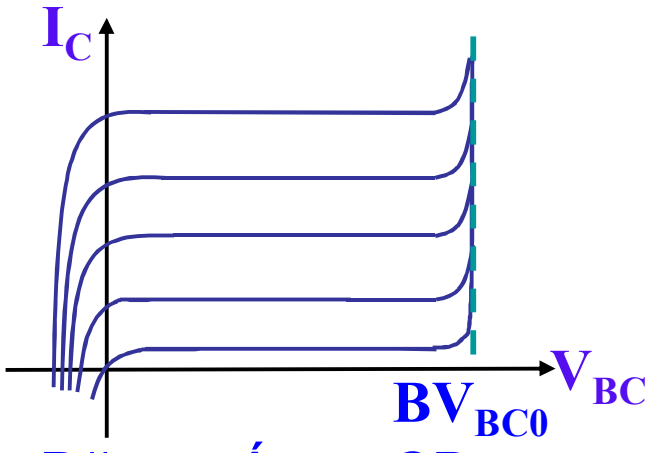
$I_E = I_C$ ⟶ Cấu hình B hở

$$I_C = M_{BC}\left(\alpha_{dc} I_E + I_{BC0}\right) \rightarrow I_C = \frac{M_{BC} I_{BC0}}{1 - \alpha_{dc} M_{BC}} = M_{EC} I_{EC0}$$

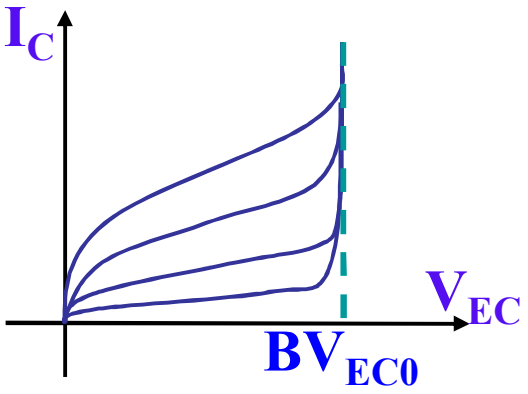
$$M_{EC} = \frac{M_{BC}(1 - \alpha_{dc})}{1 - \alpha_{dc} M_{BC}} \rightarrow BV_{EC} = BV_{BC}\left(1 - \alpha_{dc}\right)^{1/m_b}$$

Phải nhỏ hơn nhiều BV_{BC} do hoạt động của BJT.



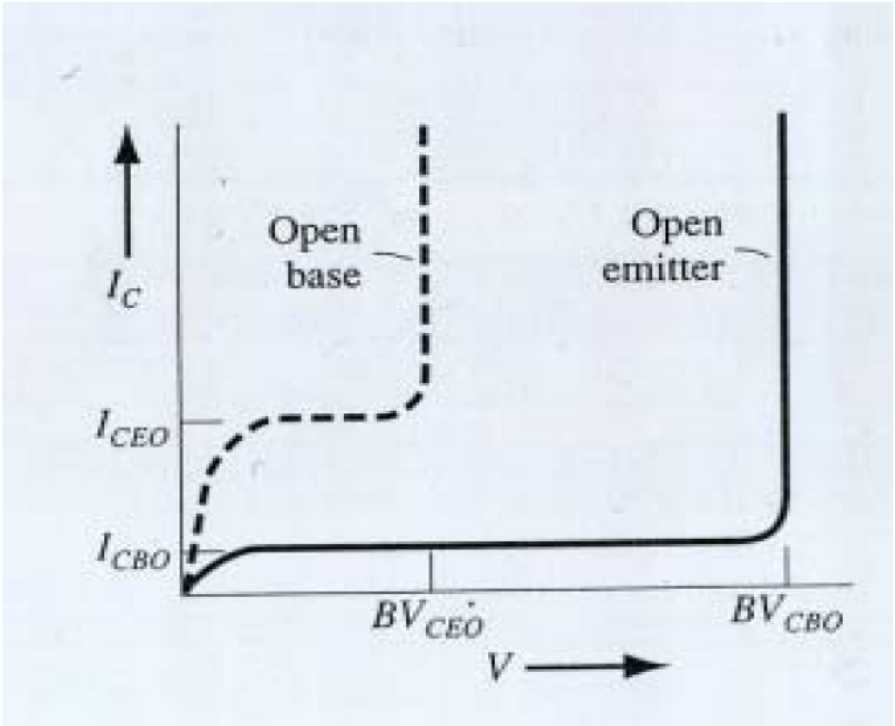


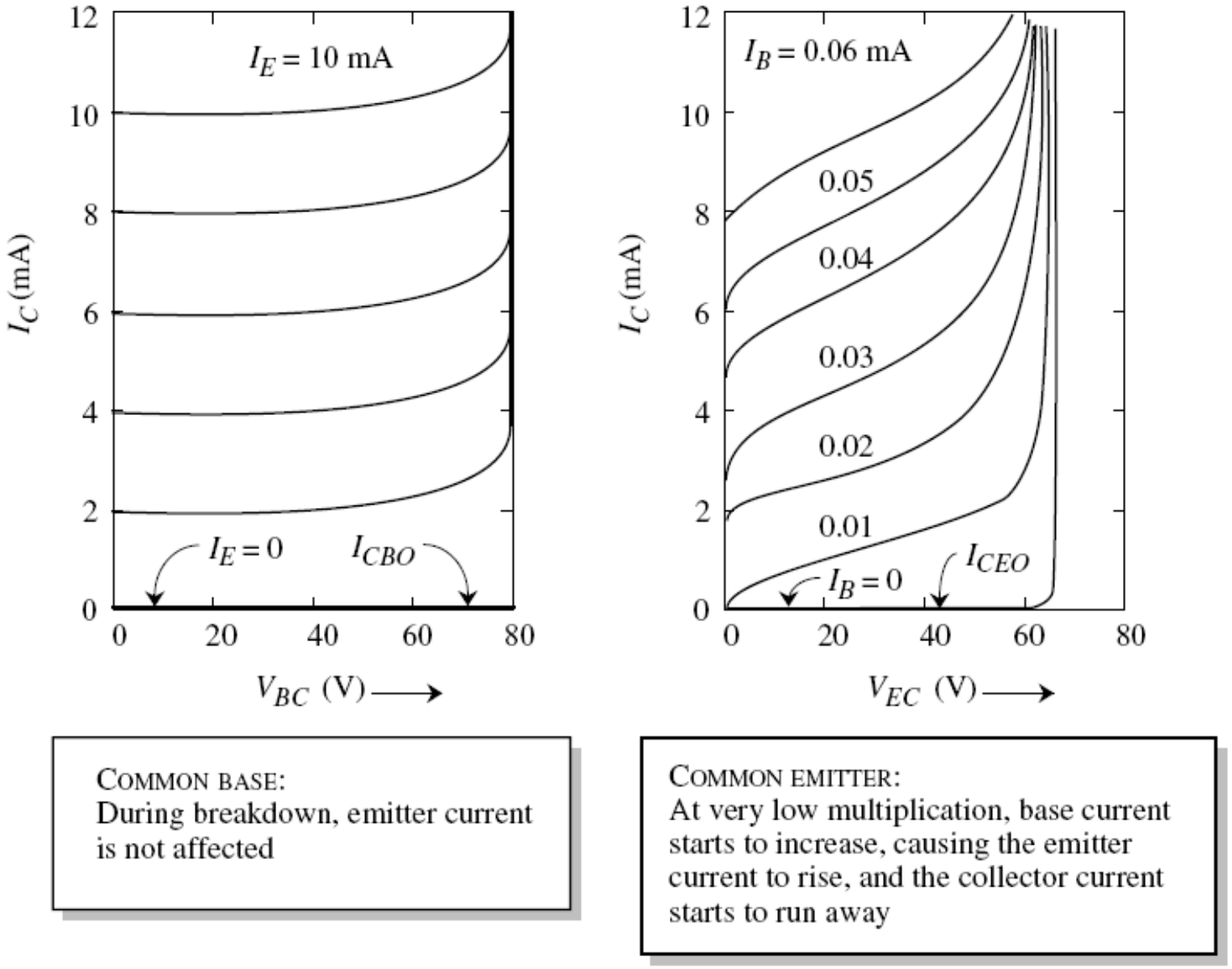
Đặc tuyến ra CB



Đặc tuyến ra CE

$$BV_{CE0} = BV_{CB0}\sqrt[n]{1-\alpha} \cong \frac{BV_{CB0}}{\sqrt[n]{\beta}}$$





Avalanche breakdown related characteristics of a bipolar transistor in the commonbase and common-emitter configurations.

Transistor (NPN) Voltage Ratings

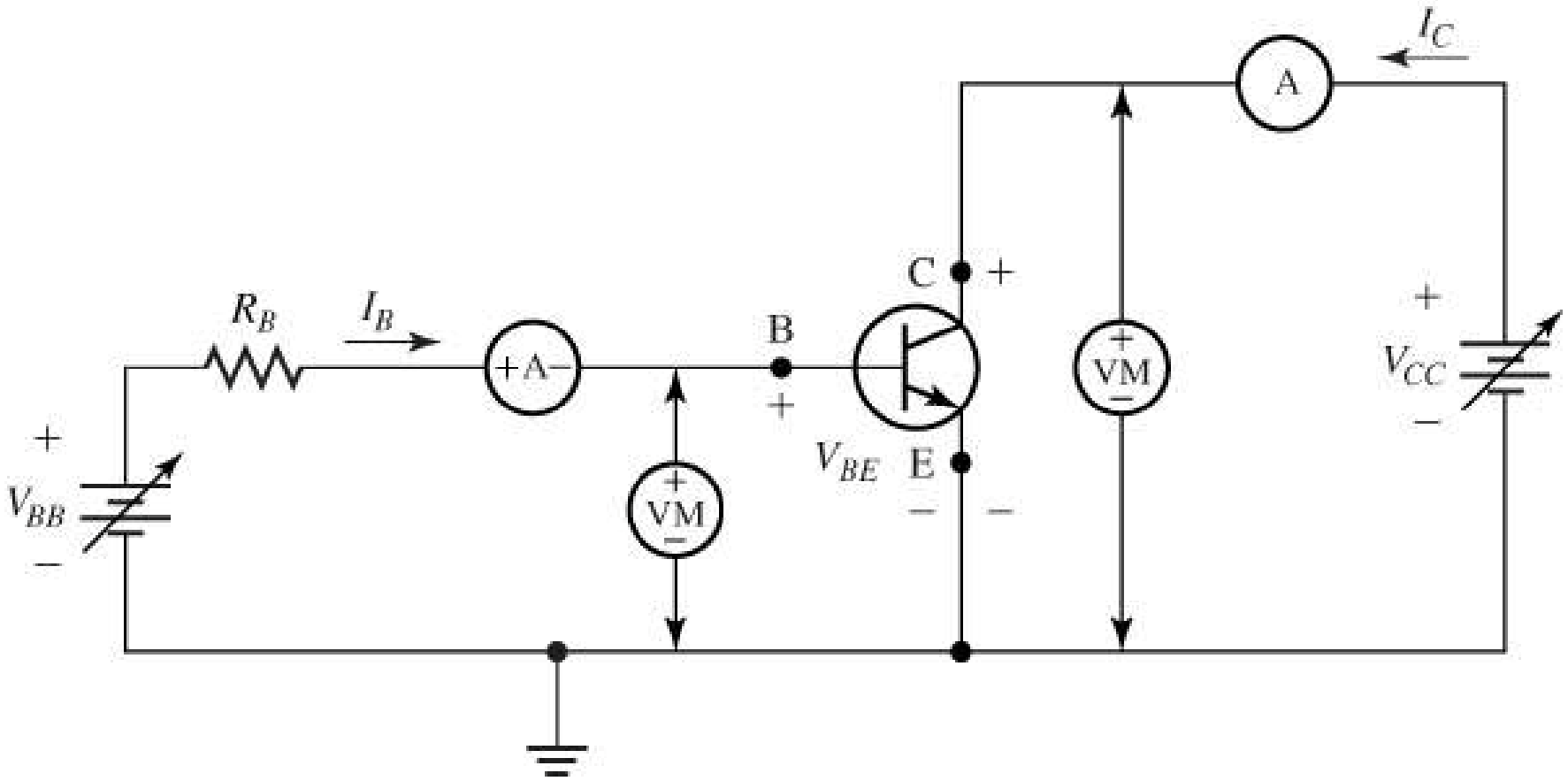
Rating	Description	2N3904
V_{CBO}	V_{CB} with emitter circuit open	60 V_{dc}
V_{CEO}	V_{CE} with base circuit open	40 V_{dc}
V_{EBO}	V_{EB} with collector circuit open	6 V_{dc}

o = with the 3rd terminal open circuit
s = with the 3rd terminal short circuit (usually B and E)
x = with some specified circuit conditions

5.5 Các đặc tuyến của BJT

- Đặc tuyến vào
- Đặc tuyến ra
- Đặc tuyến truyền đạt
- Các giới hạn hoạt động với BJT

Mạch đo đặc tuyến BJT NPN

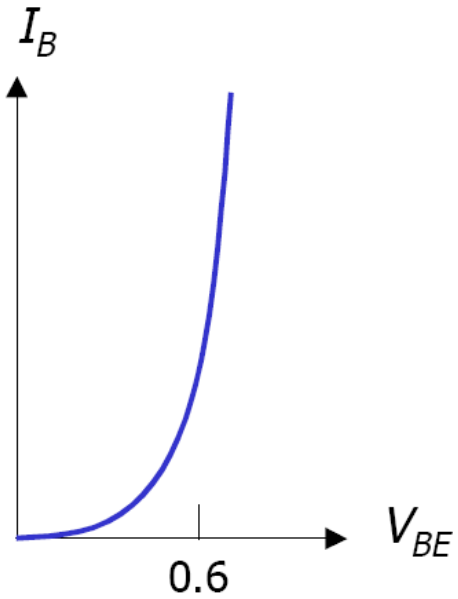


Detailed BJT characteristics

Input characteristic (I_B versus V_{BE})

Obviously, V_{BE} and I_B are related by diode characteristic.

$$I_B = I_{ss}\left(e^{V_{BE}/V_T} - 1\right)$$



thermal voltage

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV @room temp}$$

Boltzman's constant

absolute temperature

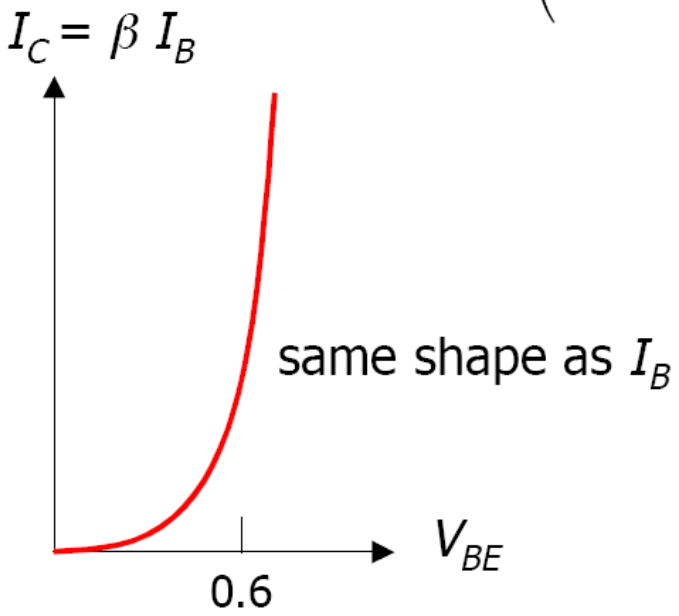
electronic charge

Detailed BJT characteristics

Transfer characteristic (I_C versus V_{BE})

Also, I_C is just I_B multiplied by β.

$$I_C = \beta I_{ss}\left(e^{V_{BE}/V_T} - 1\right) = I_s\left(e^{V_{BE}/V_T} - 1\right)$$



thermal voltage

Boltzman's constant

absolute temperature

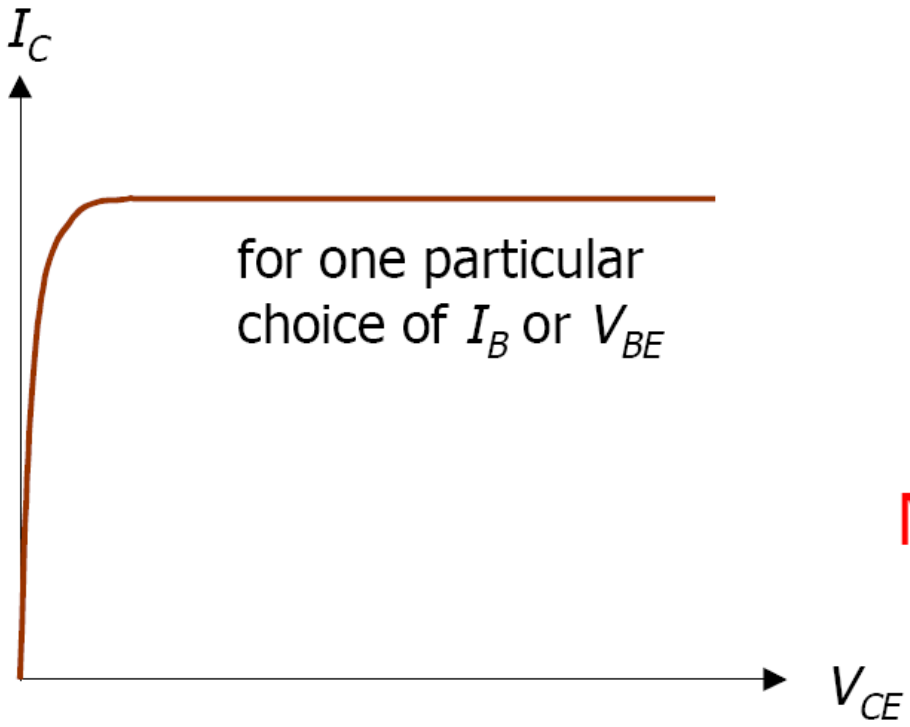
$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV @room temp}$$

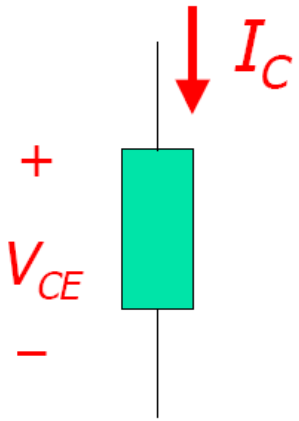
electronic charge

Detailed BJT characteristics

Output characteristic (I_C versus V_{CE})

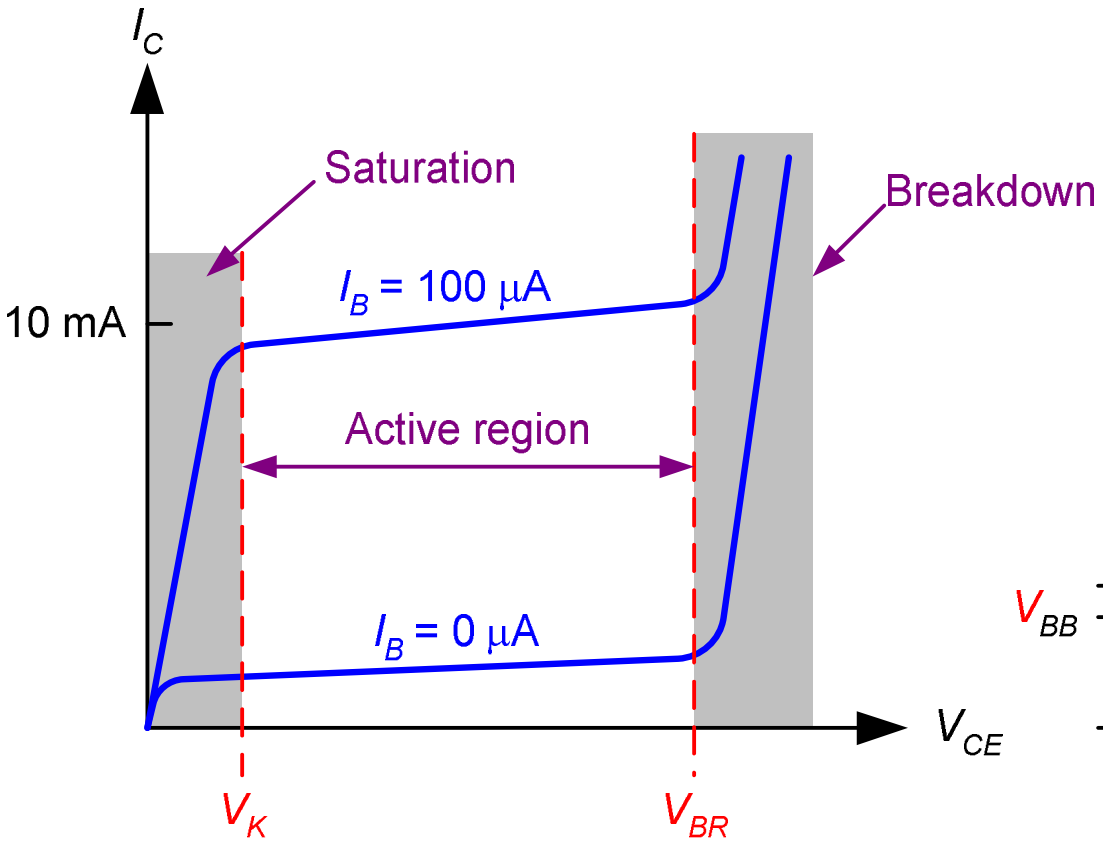
I_C is nearly flat unless near saturation.

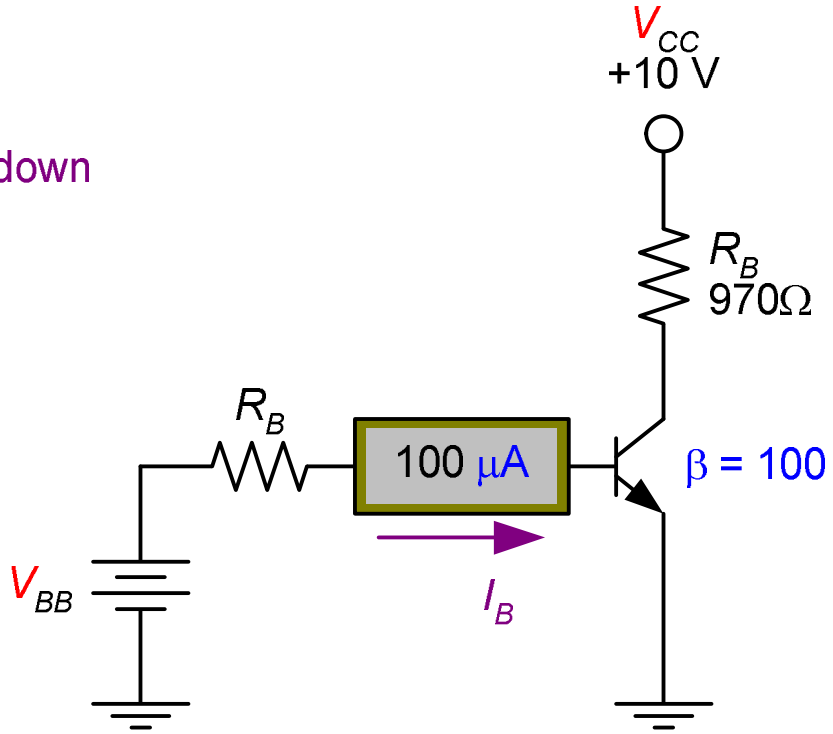




Not Ohm's law!!

A collector characteristic curve.

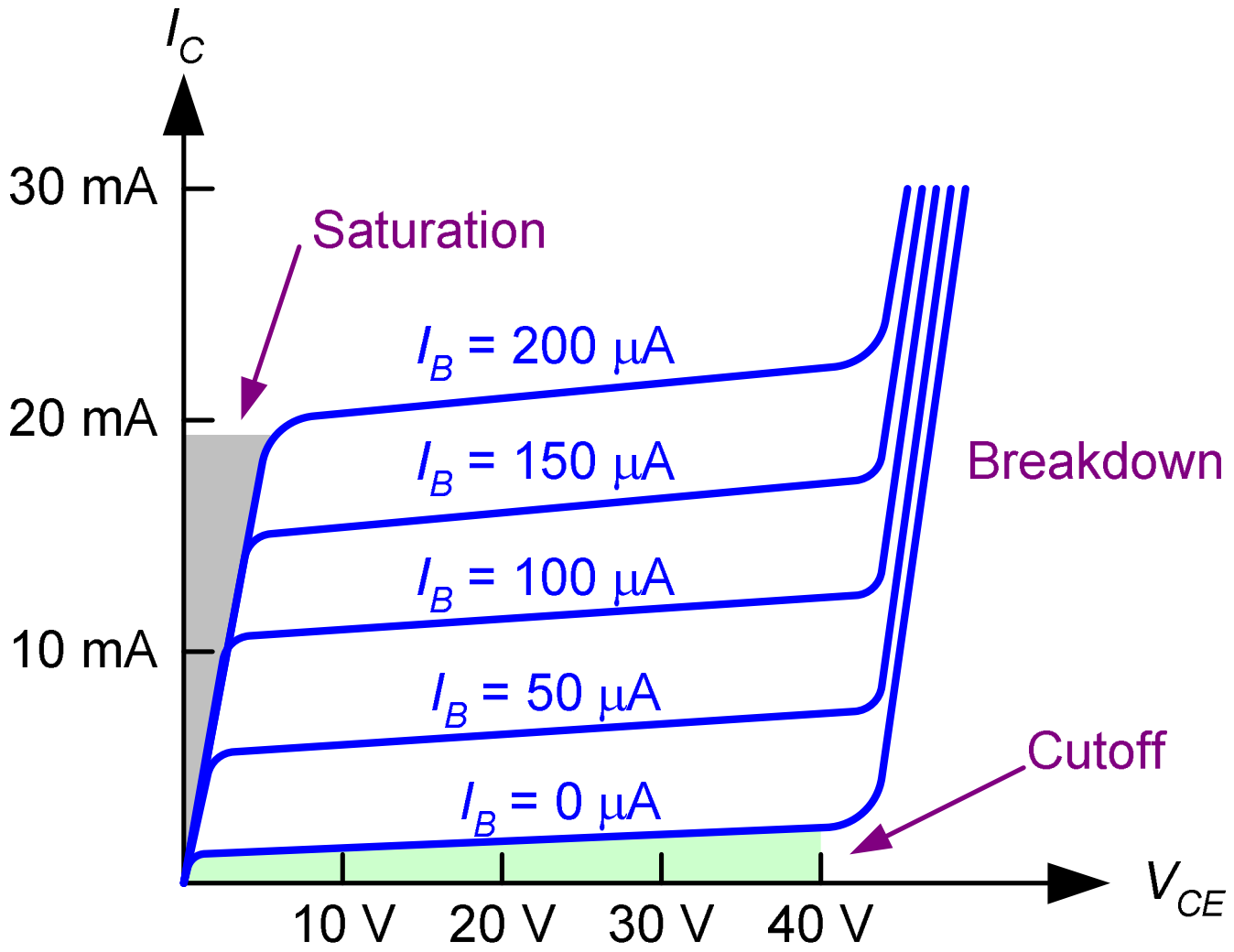




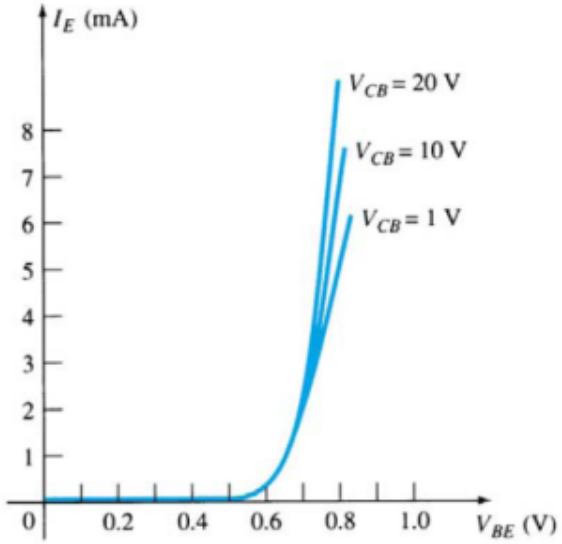
Operating region?

V_{CE} = ?

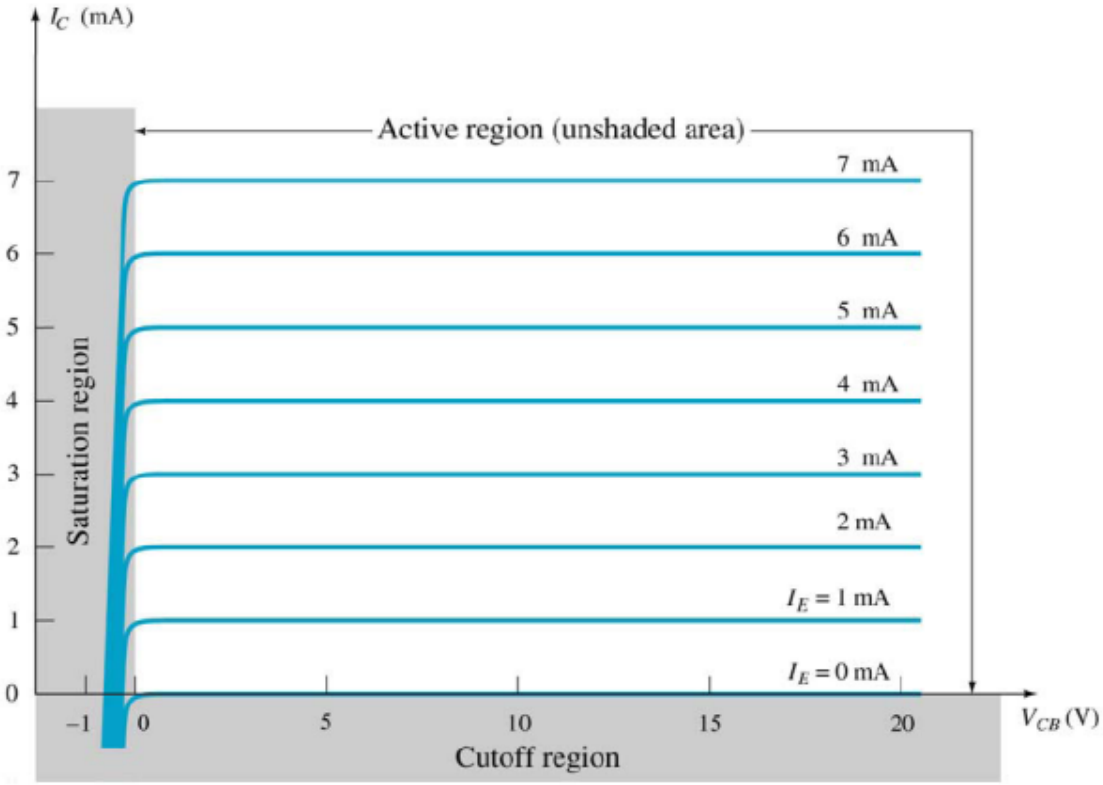
A composite of collector characteristic curves of a BJT



Đặc tuyến của BJT NPN mắc CB

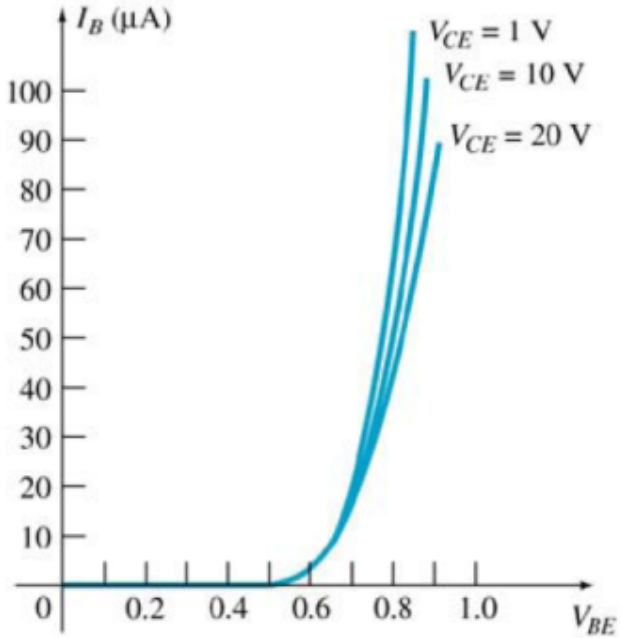


a) Đặc tuyến vào

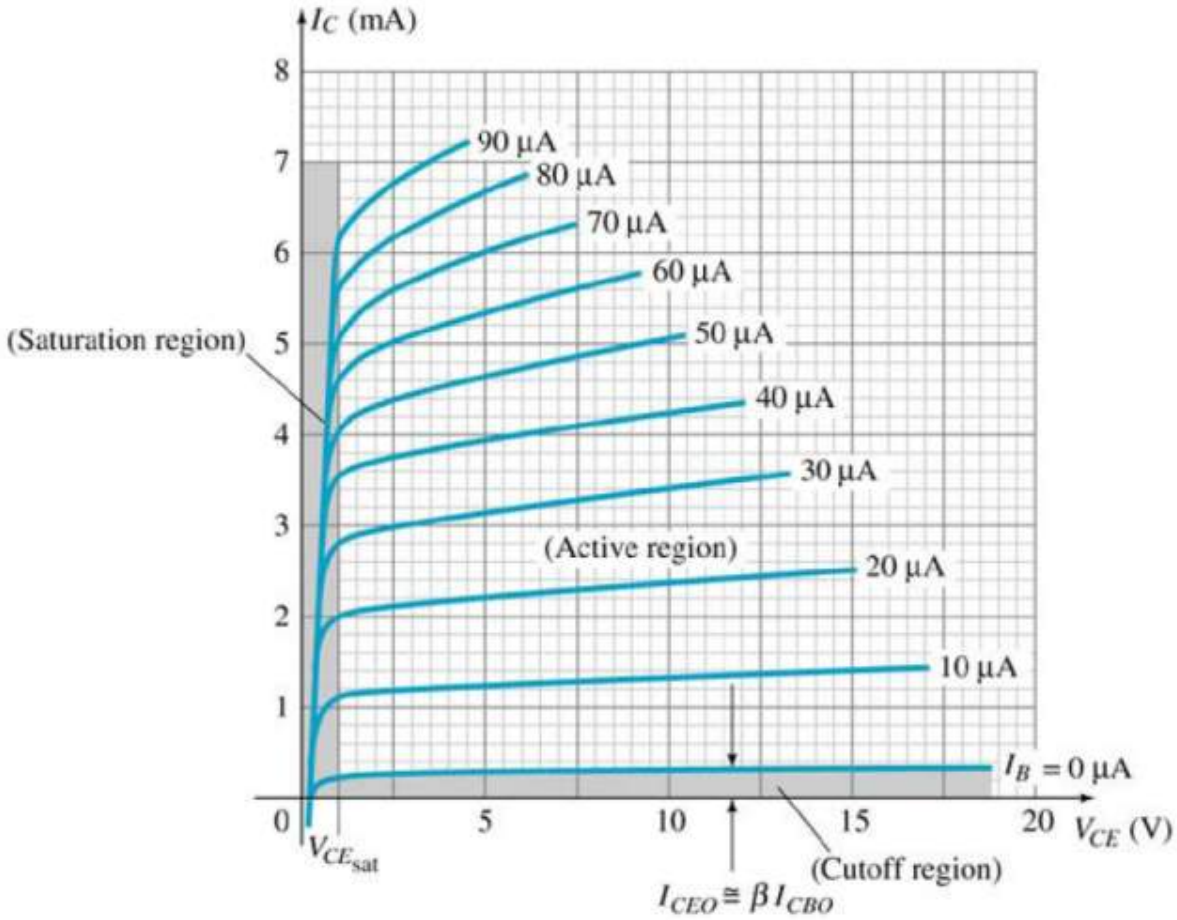


b) Đặc tuyến ra

Đặc tuyến của BJT NPN mắc CE

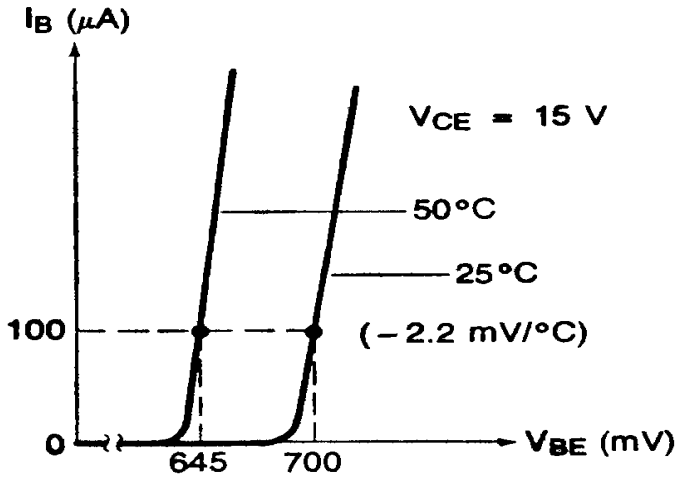


a) Đặc tuyến vào

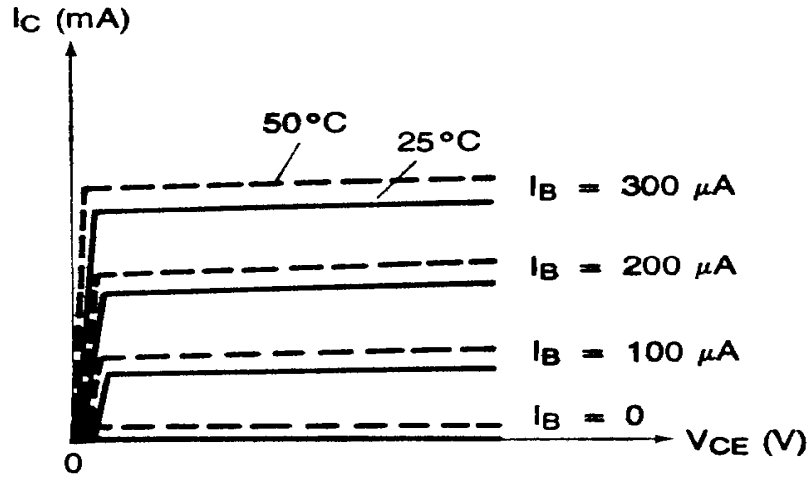


b) Đặc tuyến ra

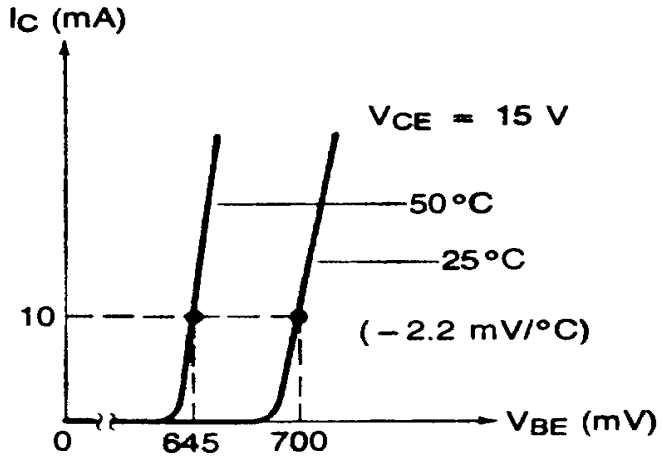
Ảnh hưởng của nhiệt độ đến đặc tuyến (NPN-CE):



a) Đặc tuyến vào



b) Đặc tuyến ra



c) Đặc tuyến truyền đạt

Important small-signal characteristic

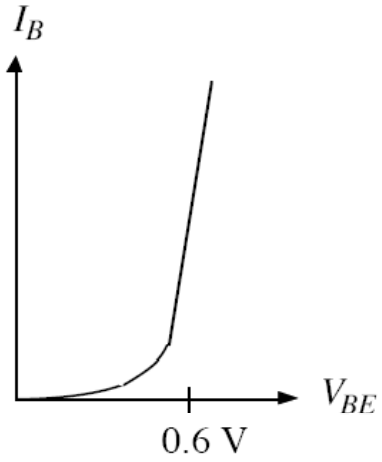
Different I_B (or V_{BE}) has different output characteristic.

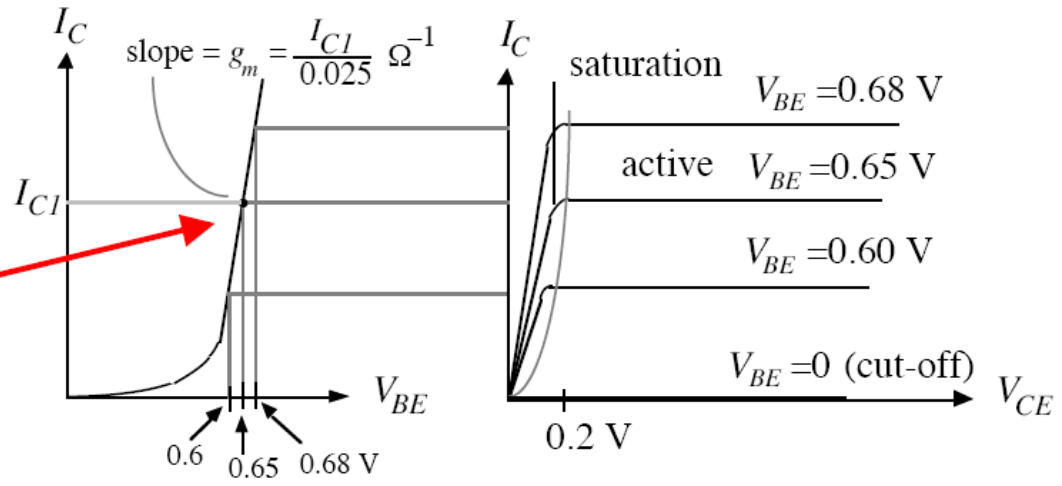
A range of V_{BE} corresponds to a range of I_C.

Transconductance:

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

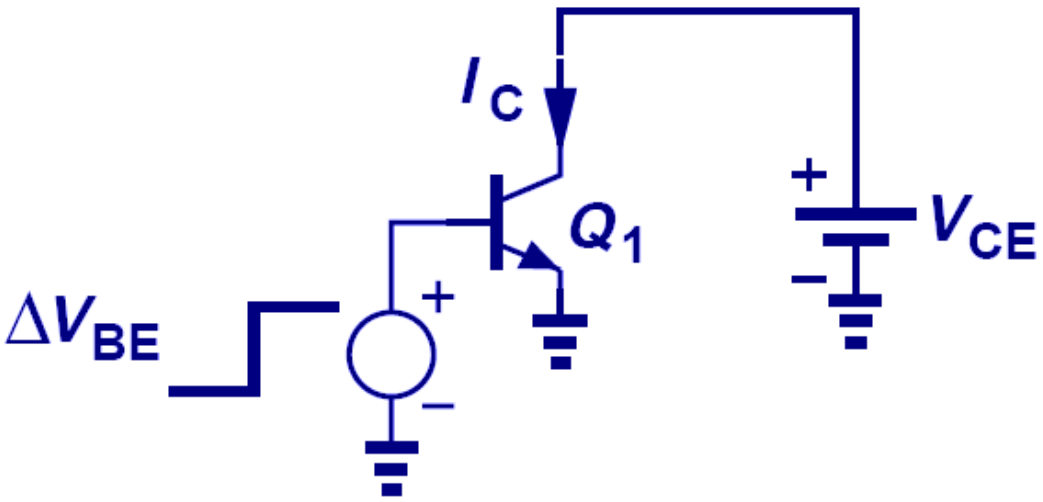
= slope on the transfer char.





Transconductance, g_m

- The ***transconductance*** (g_m) of a transistor is a measure of how well it converts a voltage signal into a current signal.
- It will be shown later that g_m is one of the most important parameters in integrated circuit design.



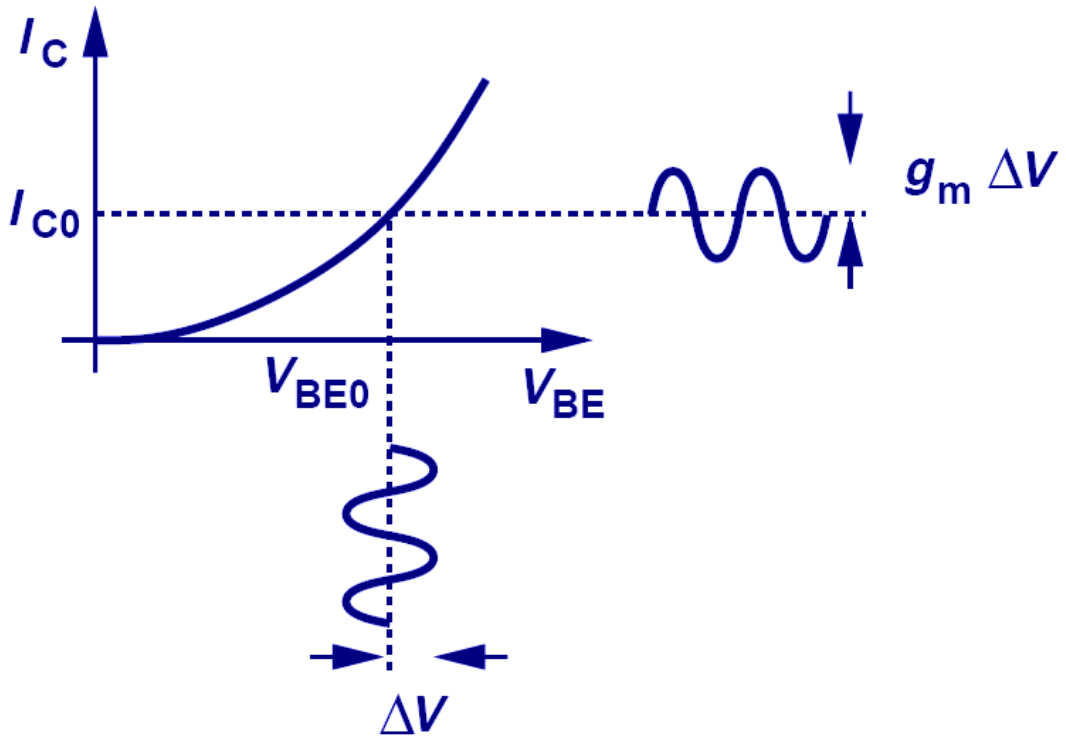
$$g_m \equiv \frac{dI_C}{dV_{BE}} \cong \frac{d}{dV_{BE}}\left(I_S \exp\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

$$g_m = \frac{1}{V_T} I_S \exp\frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

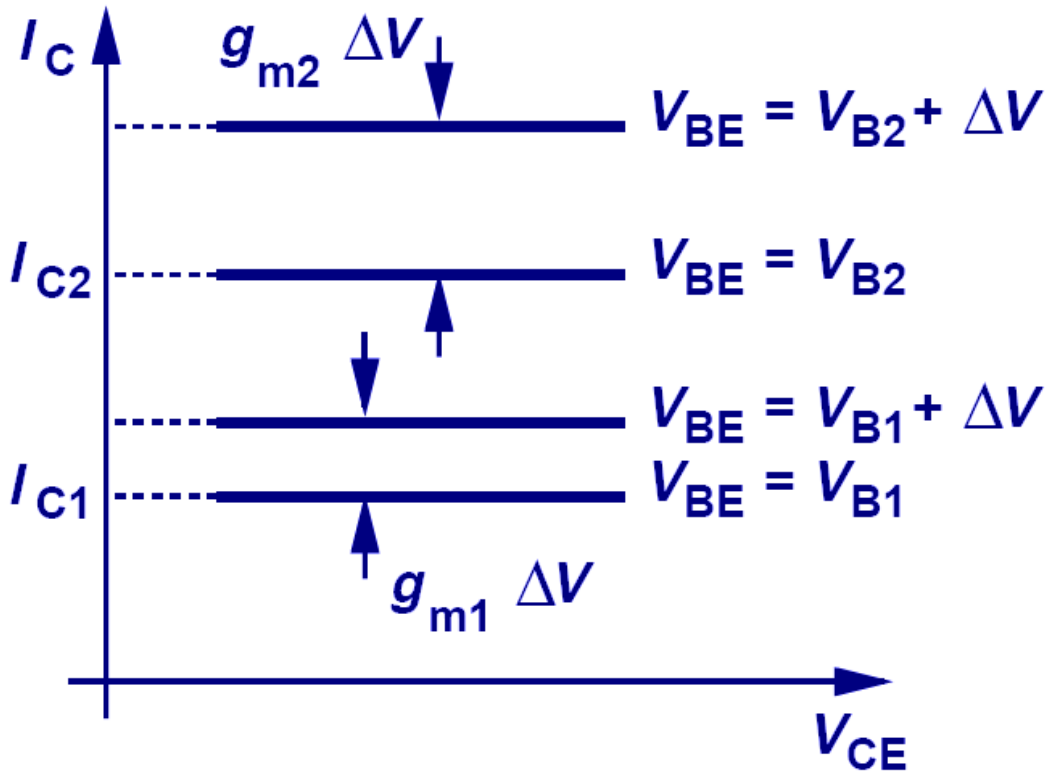
Visualization of Transconductance

- g_m can be visualized as the slope of the I_C *vs.* V_{BE} curve.
- The slope (hence g_m) increases with I_C.



Transconductance and I_C

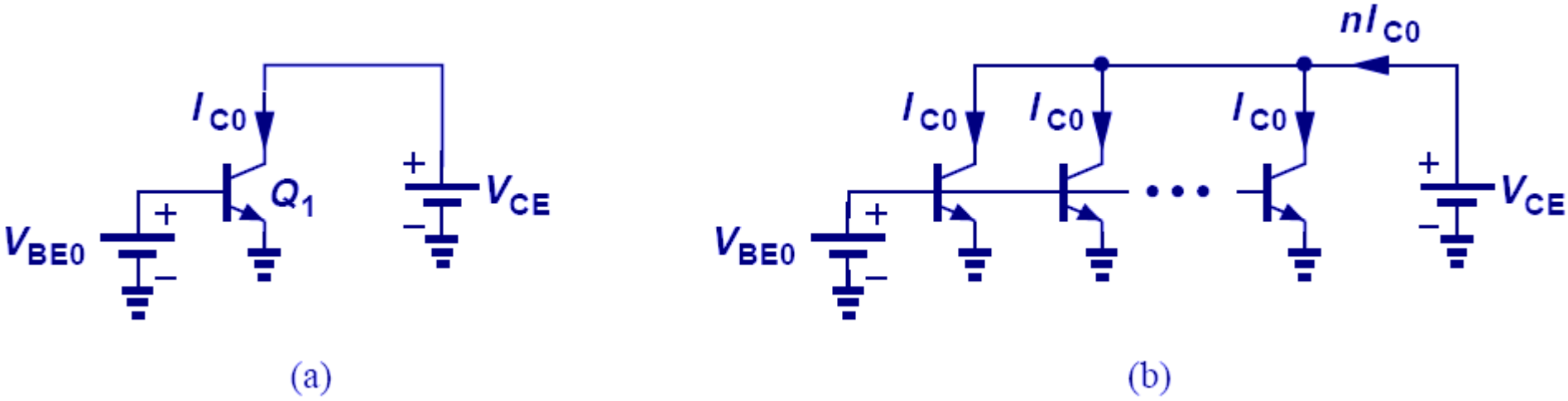
- For a given V_{BE} swing (ΔV), the resulting current swing about I_{C2} is larger than it is about I_{C1}.
  - This is because g_m is larger when $V_{BE} = V_{B2}$.



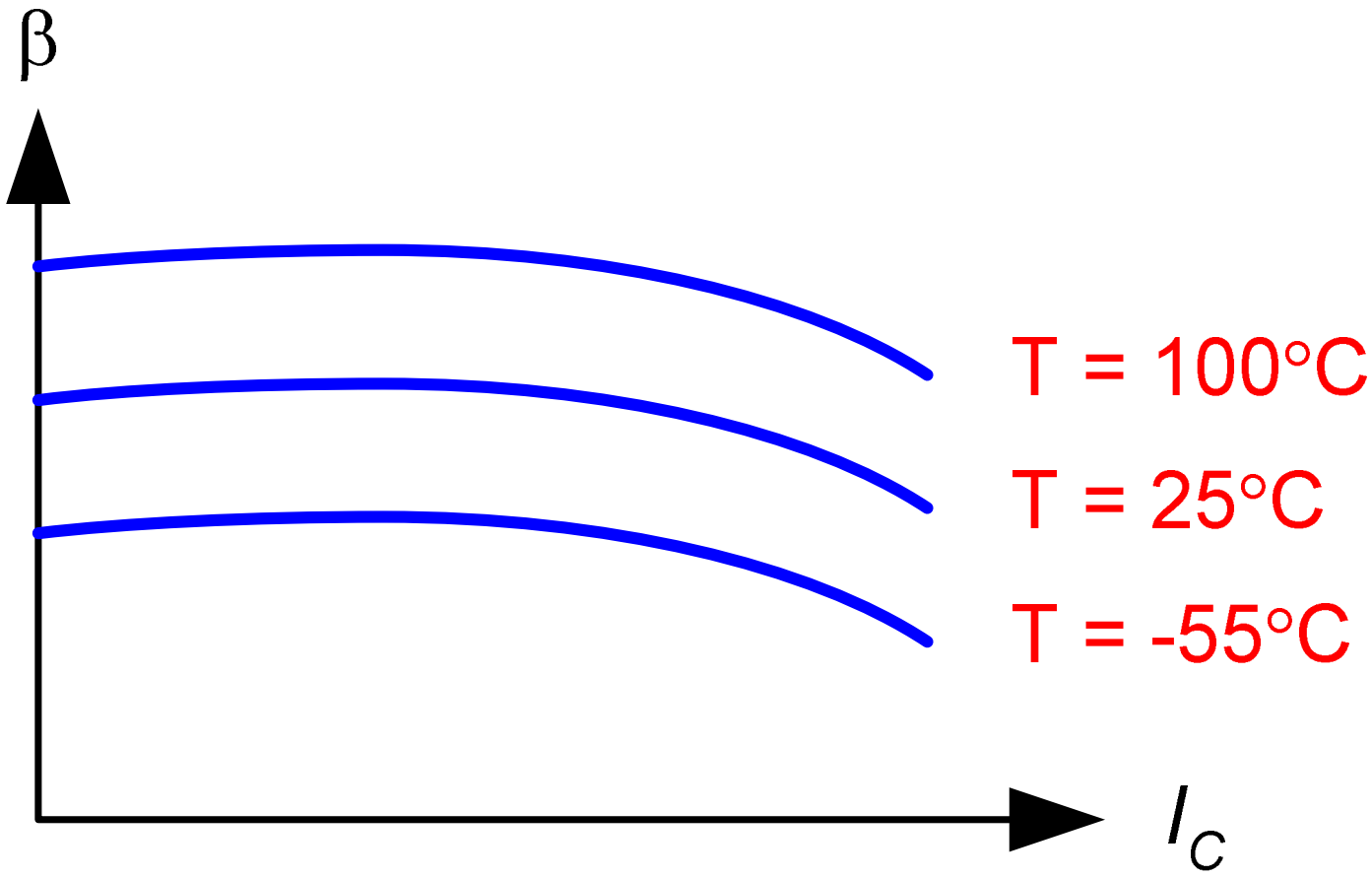
Transconductance and Emitter Area

- When the BJT emitter area is increased by a factor n, I_S increases by the factor n.

  $\Rightarrow$ For a fixed value of V_{BE}, I_C and hence g_m increase by a factor of n.



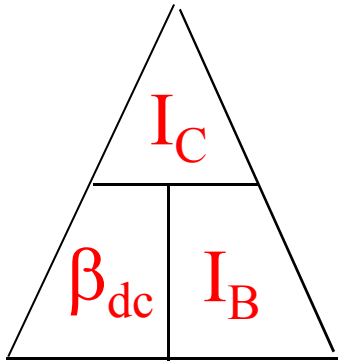
Ảnh hưởng của nhiệt độ và dòng I_C đến β



Beta (β) or **amplification factor**

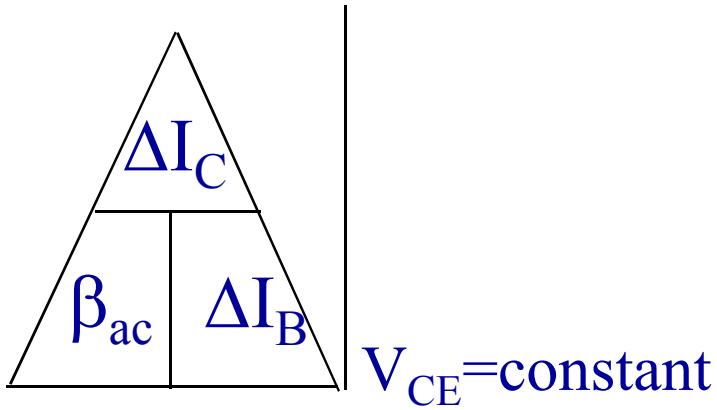
- The ratio of dc collector current (I_C) to the dc base current (I_B) is dc beta (β_{dc}) which is dc current gain where I_C and I_B are determined at a particular operating point, Q-point (quiescent point).
- It's define by the following equation:

$$\mathbf{30 < \beta_{dc} < 300} \rightarrow \text{2N3904}$$



- On data sheet, $\beta_{dc}=\boldsymbol{h}_{FE}$ with *h* is derived from ac hybrid equivalent cct. FE are derived from forward-current amplification and common-emitter configuration respectivley.

- For ac conditions an ac beta has been defined as the changes of collector current (I_C) compared to the changes of base current (I_B) where I_C and I_B are determined at operating point.
- On data sheet, $\beta_{ac}=h_{fe}$
- It can defined by the following equation:



TD: Từ đặc tuyến ra của cấu hình CE, hãy tìm β_{ac} và β_{dc} với điểm làm việc ở I_B=25 μA và V_{CE}=7.5V.

Bài giải:

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\Big|_{Vce = \text{constant}}$$

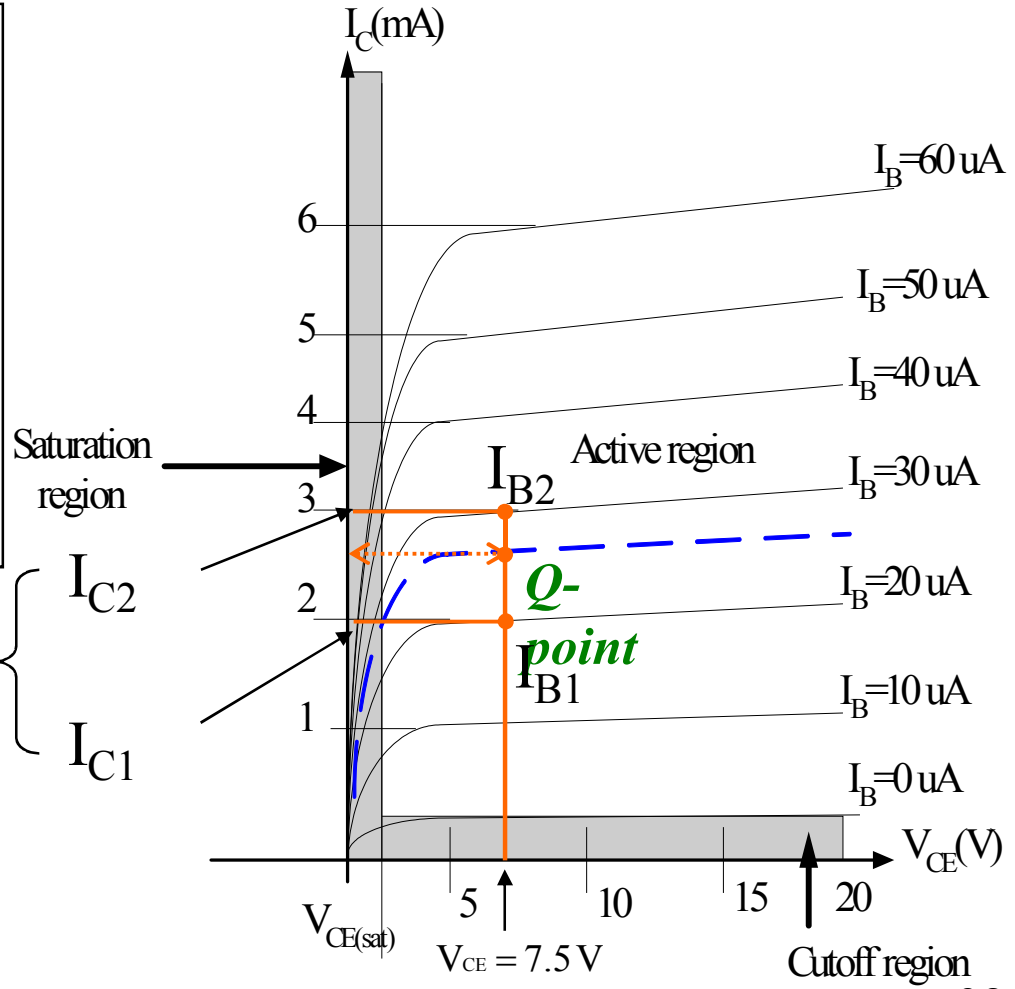
$$= \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}} = \frac{3.2\,m - 2.2\,m}{30\,\mu - 20\,\mu}$$

$$= \frac{1\,m}{10\,\mu} = 100$$

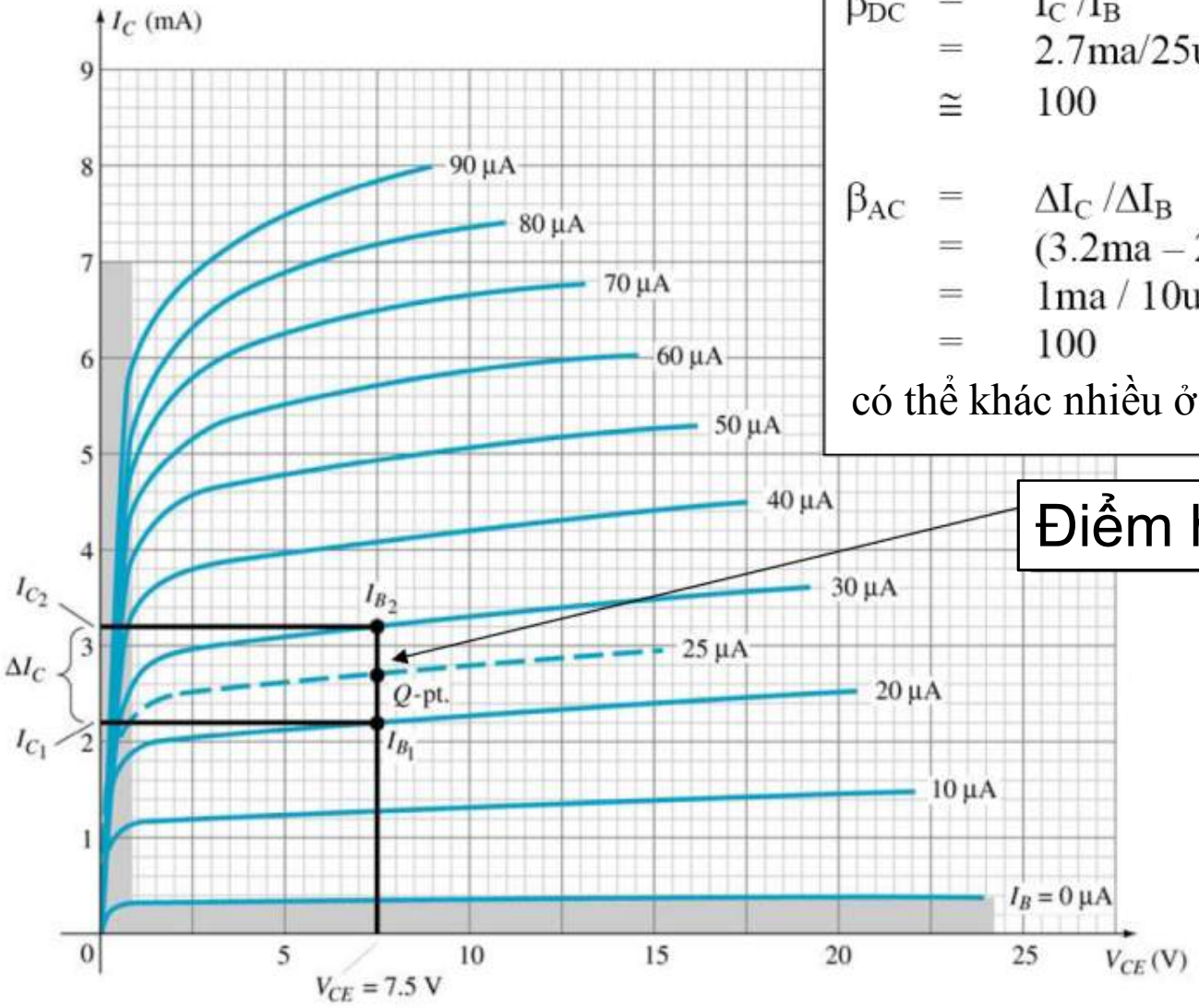
$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$= \frac{2.7\,m}{25\,\mu}$$

$$= \underline{\underline{108}}$$



Xác định β_{dc} và β_{ac} từ đặc tuyến collector



$\beta_{DC} = I_C / I_B$
$= 2.7ma/25ua$
$\cong 100$

$\beta_{AC} = \Delta I_C / \Delta I_B$
$= (3.2ma - 2.2ma)/(30ua-20ua)$
$= 1ma / 10ua$
$= 100$

có thể khác nhiều ở những điểm khác

Điểm hoạt động

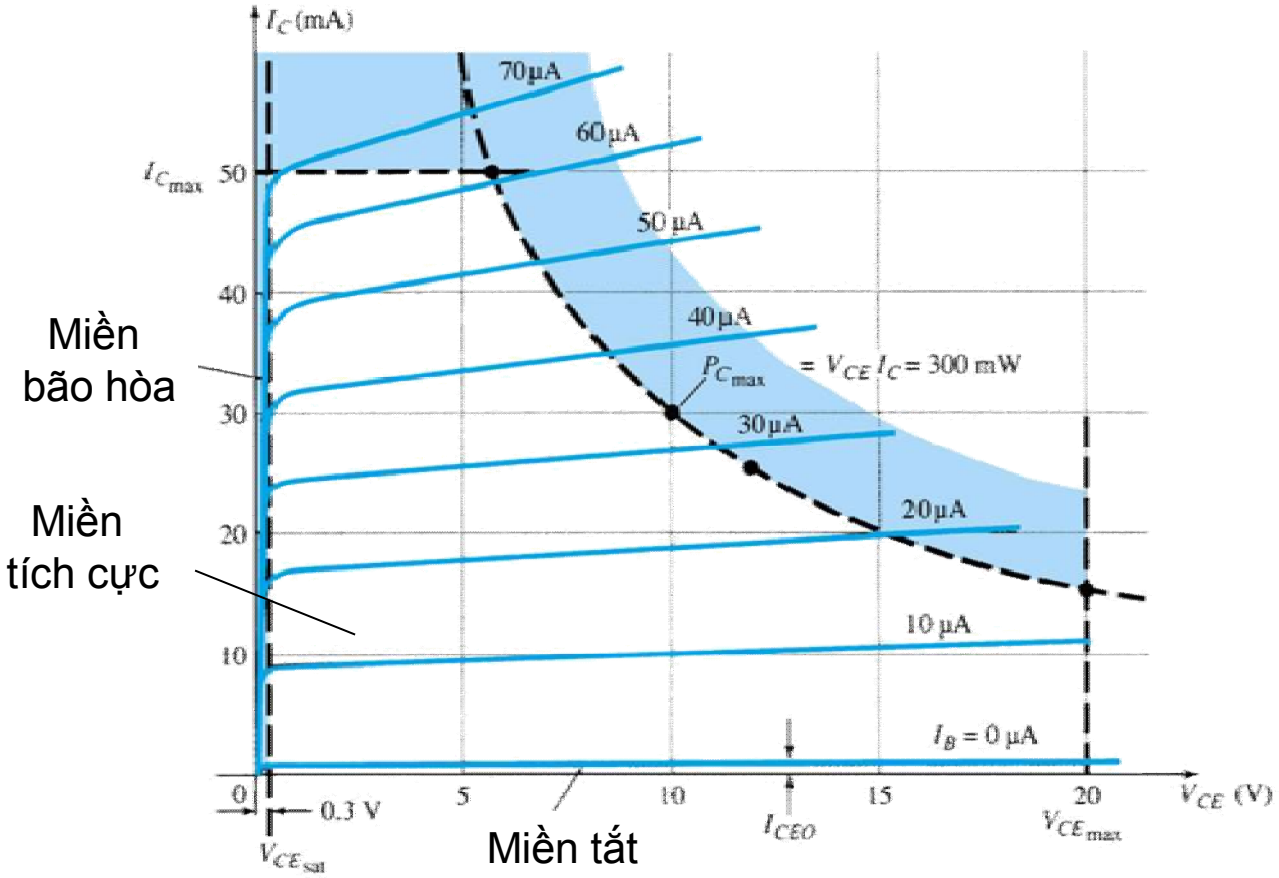
Các giới hạn hoạt động cho BJT

- Nhiều BJT dùng cho mạch khuếch đại. Như vậy ta phải lưu ý đến các giới hạn hoạt động của nó.

- Tối thiểu có 3 giá trị cực đại được đề cập trong sổ tay:
  a) Tiêu tán công suất cực đại ở miền thu: P_{Cmax} hay P_D
  b) Điện áp CE cực đại: V_{CEmax} đôi khi được gọi là $V_{BR(CEO)}$ hay V_{CEO}.
  c) Dòng [điện] thu cực đại: I_{cmax}

- Nếu dùng BJT cho mạch khuếch đại ta phải theo 1 số qui tắc sau:
  i) BJT cần làm việc ở chế độ tích cực thuận!
  ii) $I_C < I_{Cmax}$
  ii) $P_C < P_{Cmax}$

Các giới hạn làm việc của BJT



Chú ý:

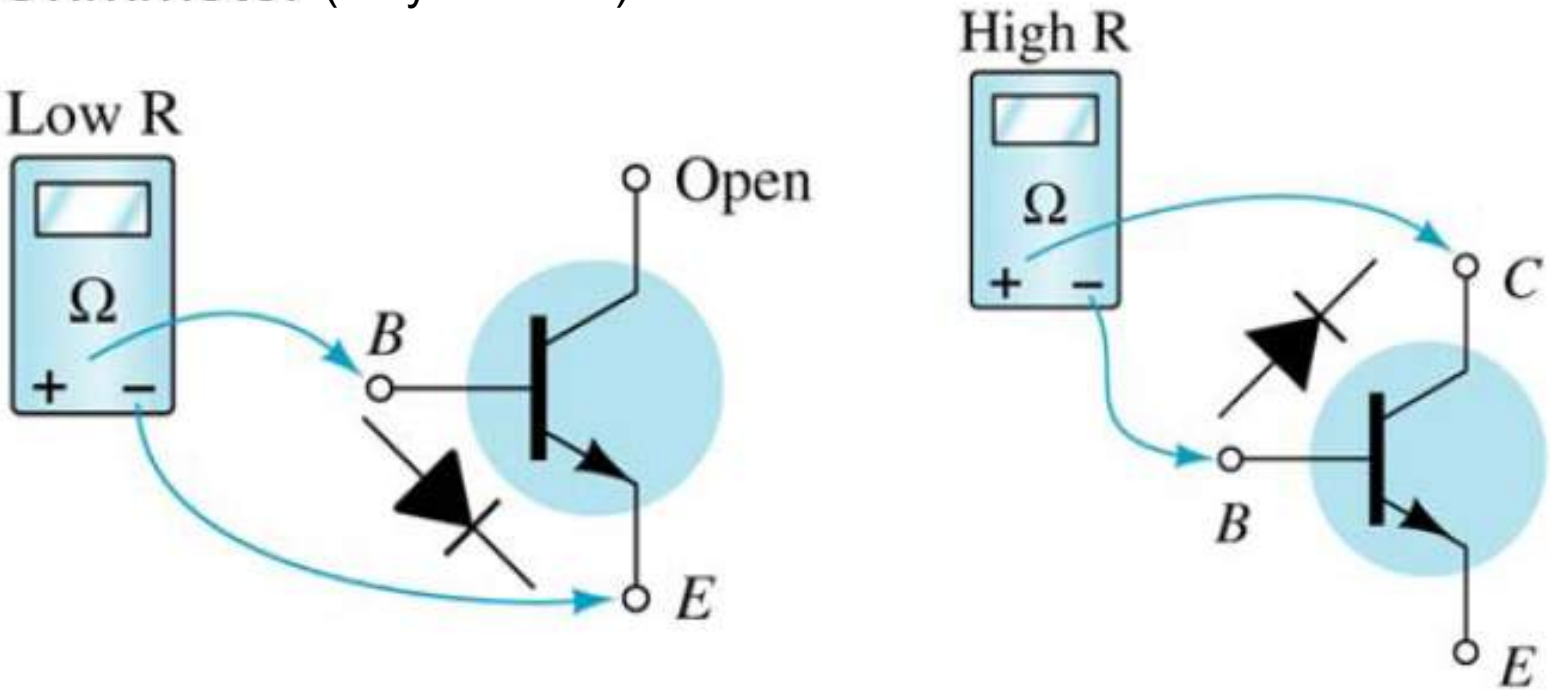
- V_{CE} có trị cực đại và I_C có trị cực tiểu (I_{Cmax}=I_{CEO}) trong miền tắt (cutoff).
- I_C có trị cực đại và V_{CE} có trị cực tiểu (V_{CE} min = V_{CEsat} = V_{CEO}) trong miền bão hòa (saturation).
- BJT hoạt động như mạch khuếch đại trong miền tích cực giữa miền bão hòa và miền tắt.

Đọc bảng dữ liệu

- BJT có công suất tiêu tán P_D:
  - < 1 W → BJT tín hiệu nhỏ
  - > 1 W → BJT công suất
- Định mức đánh thủng: V_{CB}, V_{CEO}, V_{EB}
- Dòng và công suất cực đại: I_C, $P_D@T_A$, $P_D@T_C$
- Hệ số giảm định mức [của công suất]
- Tản nhiệt
- Độ lợi dòng:
  - $h_{FE} = \beta_{dc}$ (h_{FE} phụ thuộc I_C)
  - $h_{fe} = \beta_{ac}$ (h_{fe} phụ thuộc tần số hoạt động)

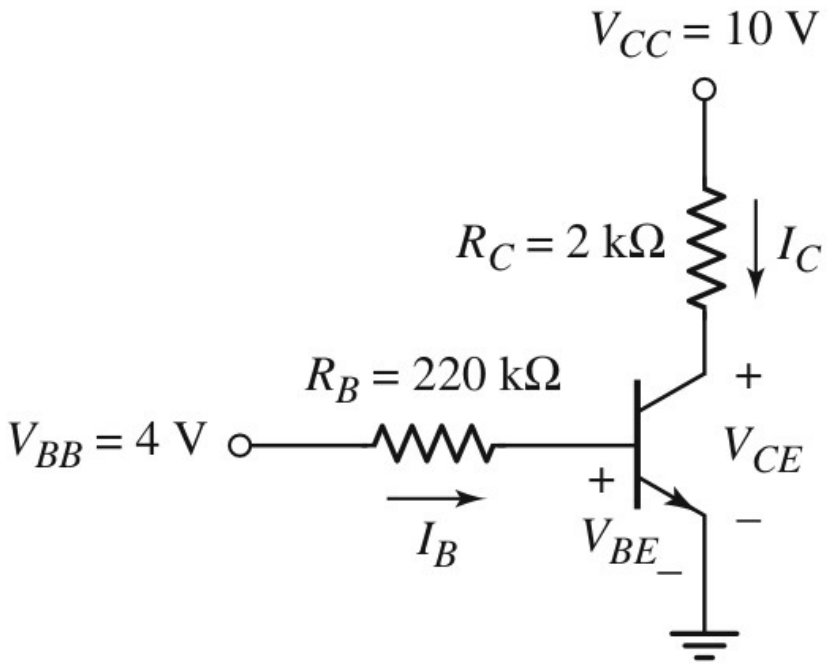
Transistor Testing

1. Curve Tracer (Máy vẽ đặc tuyến)
   Provides a graph of the characteristic curves.
2. DMM (Máy đo đa năng hiện số)
   Some DMM's will measure βDC or HFE.
3. Ohmmeter (Máy đo Ohm)



TD: Phân tích DC mạch BJT mắc CE

Tính I_B, I_C, I_E và V_{CE}. (Biết : *VBE (on)* = 0.7V và β = 200)



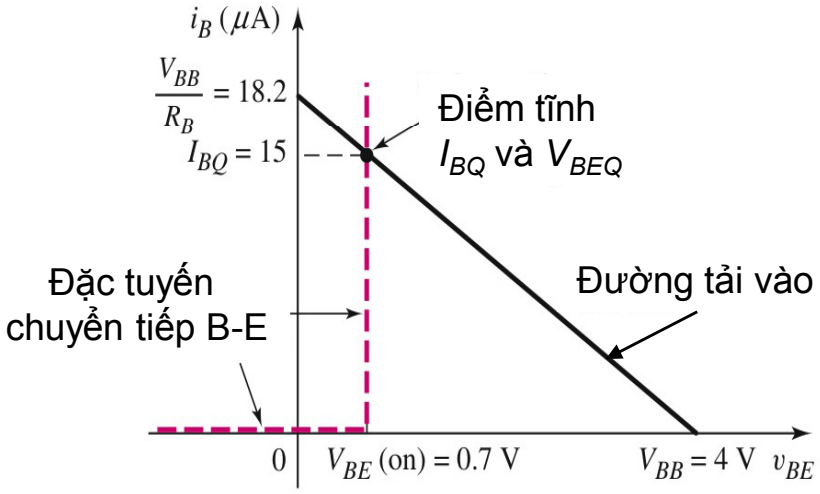
(a)

Mạch khuếch đại BJT mắc CE

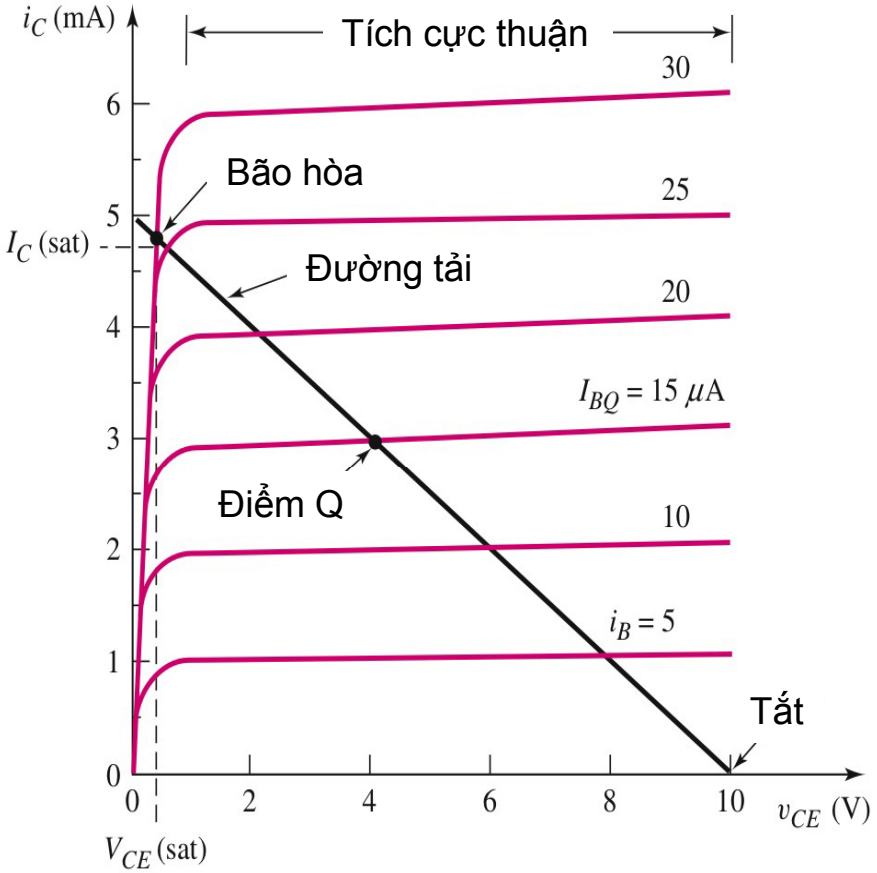
Đường tải của mạch CE

Đường tải vào: $I_B = \frac{V_{BB}}{R_B} - \frac{V_{BE}}{R_B}$

Đường tải C-E: $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}$



(a)



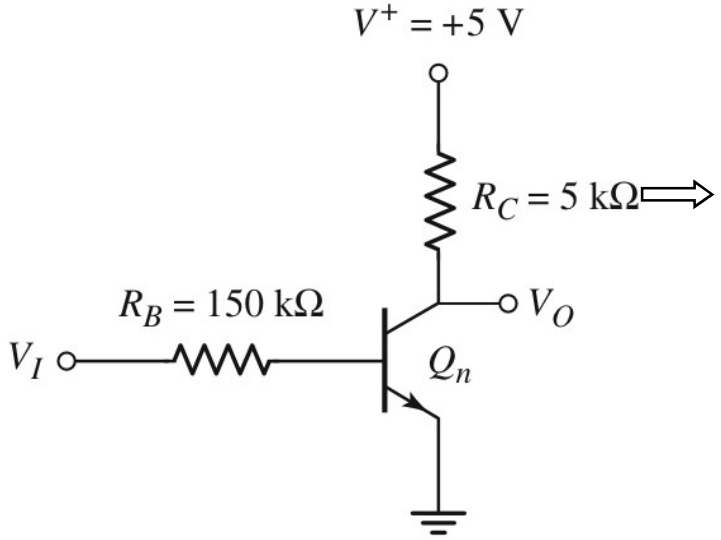
(b)

Đặc tuyến truyền đạt điện áp (1/2)
(VTC=Voltage Transfer Chracteristics)

VTC cho biết:

- Quan hệ giữa điện áp ra và điện áp vào
- Hoạt động hay trạng thái của transistor

TD:



Giả sử:

$V_{BE\,(on)} = 0.7V$

$\beta = 120$

$V_{CE(sat)} = 0.2V$

$V_A = \infty$

- ***$V_i \leq 0.7V$, Q_n = tắt (OFF)***:

  $I_B = I_C = 0$, $V_o = V^+ = 5V$

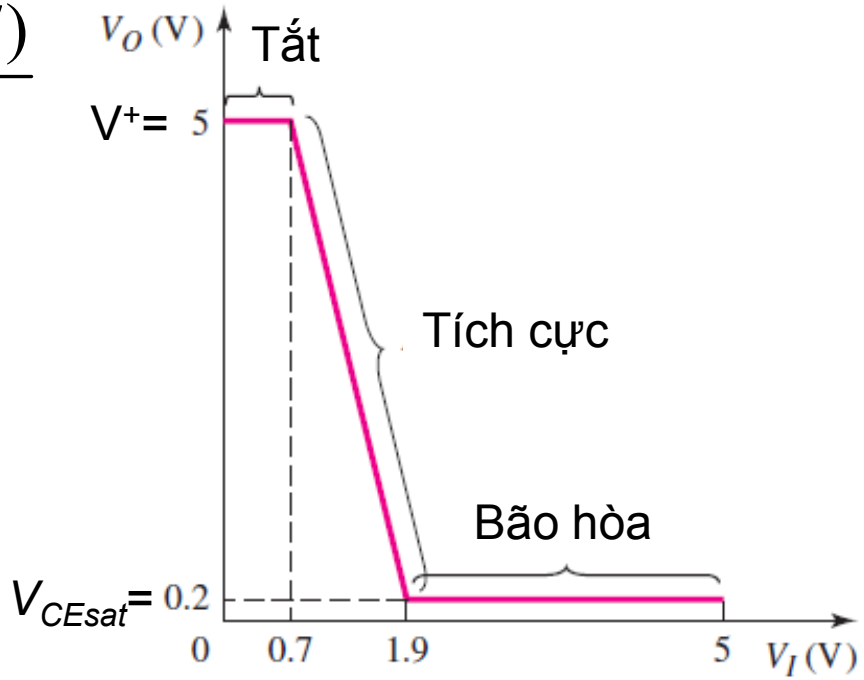
Đặc tuyến truyền đạt điện áp (2/2)

- ***V_i* > 0.7, *Q_n*= *dẫn*** (tích cực thuận)

$$I_B = \frac{V_i - 0.7}{R_B}, I_C = \beta I_B = \frac{\beta(V_i - 0.7)}{R_B}$$

và

$$V_o = V^+ - I_C R_C = 5 - \frac{\beta(V_i - 0.7)R_C}{R_B}$$

- Khi V_O= *0.2V*, ***Q_n* đi vào bão hòa** và tìm được V_i:

$$0.2 = 5 - \frac{120(V_i - 0.7)5}{150} \Rightarrow V_i = 1.9V$$