

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

Chương 5

BJT

1

5.3 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 để có
$$V_{BE} \gg V_T$$
$$V_{BC} \gg V_T$$
- Với BJT được thiết kế tốt, ta luôn có $W_b \ll L_b$

2

Hiệu suất phát

$$\gamma_e = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}}$$

Để có hiệu suất phát cao ta cần tối thiểu I_{Ep} . Ta có các phương trình của I_{En} và I_{Ep} như sau:

$$\begin{aligned} I_{Ep} &= -\frac{eAD_e p_{eo}}{L_e} \exp\left(\frac{eV_{BE}}{k_B T}\right) \\ I_{En} &\cong -\frac{eAD_b n_{bo}}{L_b \tanh\left(\frac{W_{bn}}{L_b}\right)} \exp\left(\frac{eV_{BE}}{k_B T}\right) \end{aligned}$$

Như vậy hiệu suất phát trở thành

$$\gamma_e = \frac{1}{1 + (p_{eo} D_e L_b / n_{bo} D_b L_e) \tanh(W_{bn} / L_b)}$$

Nếu $W_{bn} \ll L_b$ và áp dụng $\tanh(x) \approx x$ khi $x = W_{bn} / L_b \ll 1$

$$\gamma_e \cong \frac{1}{1 + (p_{eo} D_e W_{bn} / n_{bo} D_b L_e)} \sim 1 - \frac{p_{eo} D_e W_{bn}}{n_{bo} D_b L_e}$$

Như vậy hiệu suất phát $\rightarrow 1$, ta nên thiết kế dụng cụ có $W_{bn} \ll L_b$ và $p_{eo} \ll n_{bo}$. Như vậy ta cần có bề rộng miền nền nhỏ và pha tạp chất ở E $\gg$ pha tạp chất ở B. Dĩ nhiên bề rộng miền nền cũng có giới hạn không thể quá ngắn!

cuu duong than cong . com

Hệ số vận chuyển miền nền

$$B = \frac{I_C}{I_{En}} \cong \frac{1}{\cosh\left(\frac{W_{bn}}{L_b}\right)}$$

Với bề rộng miền nền nhỏ ta có

$$B \cong 1 - \frac{W_{bn}^2}{2L_b^2}$$

cuu duong than cong . com

Chú ý là 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 hồ dẫn

Độ lợi dòng B chung:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{I_C}{I_E} = \frac{BI_{En}}{I_{En} + I_{Ep}} = \gamma_e B \\ &= \left[1 - \frac{p_{eo} D_e W_{bn}}{n_{bo} D_b L_e} \right] \left[1 - \frac{W_{bn}^2}{2L_b^2} \right]\end{aligned}$$

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:

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

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 hồ dẫn, nó mô tả việc điều khiển dòng ra (I_C) bằng phân cực ngõ vào (V_{BE}). Hồ dẫn có trị là

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

5

Độ lợi dòng β_{dc}

- i_B và i_C liên hệ qua phương trình sau:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T}$$

và β là

$$\beta = \frac{1}{\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b}}$$

- **Beta** xem như là hằng số với BJT cụ thể
- β có trị từ 100-200 trong các dụng cụ hiện đại (nhưng có thể cao hơn)
- Được gọi là **độ lợi dòng CE**
- Để có được độ lợi dòng cao, cần có W nhỏ, N_A thấp và N_D cao.

6

- **Các tham số hiệu năng của BJT loại PNP:**

- Hiệu suất phát $\gamma \equiv \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}}$

- Hệ số vận chuyển miền nền $\alpha_T \equiv \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}}$

- Độ lợi dòng B chung $\alpha_{dc} \equiv \gamma \alpha_T = \frac{I_{Cp}}{I_E}$

- Độ lợi dòng E chung $\beta_{dc} \equiv \frac{I_C}{I_B} \cong \frac{\alpha_{dc}}{1 - \alpha_{dc}}$

7

5.4 Các hiệu ứng thứ cấp

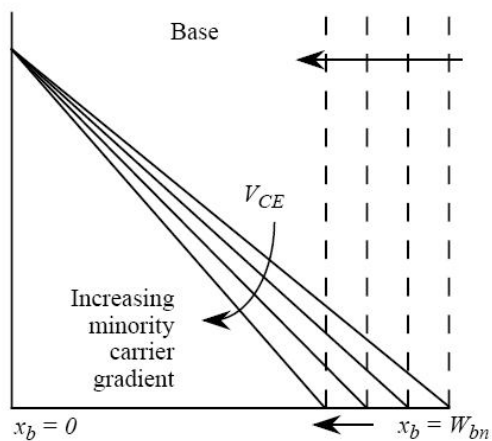
- Điều chế miền nền-hiệu ứng Early
- Đánh thủng: xuyên qua và thác lũ

8

Điều chế miền nền

Collector current $\propto \frac{1}{W_{bn}}$; W_{bn} = neutral base width

Increasing V_{CE} causes a reduction in neutral base width $\rightarrow$ collector current increases.



(a)

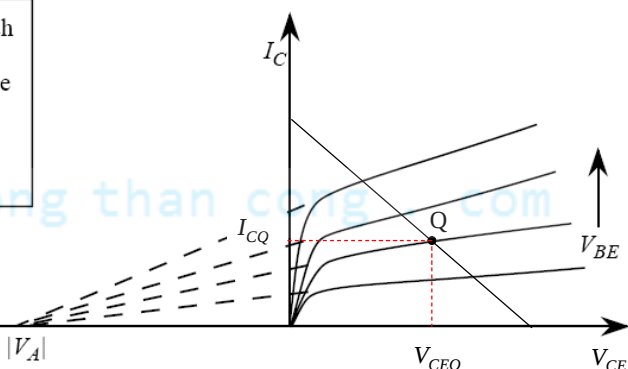
9

Điện áp Early V_A

If collector doping is much smaller than base doping the depletion width at base collector junction will be on the collector side $\rightarrow$ large early voltage, V_A .

Điện trở ra r_o :

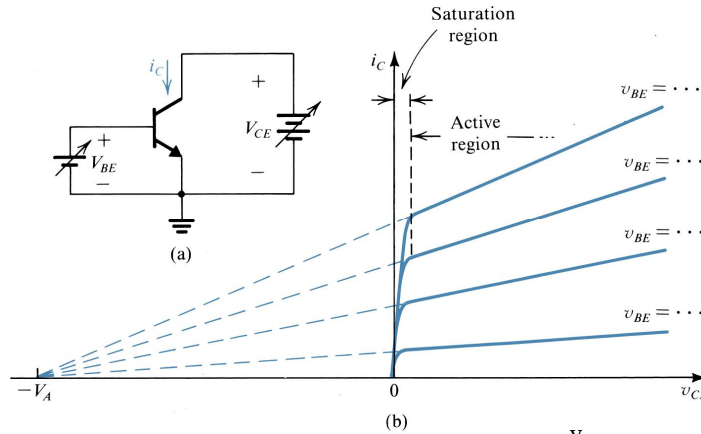
$$r_o = \left. \frac{\partial V_{CE}}{\partial I_C} \right|_Q = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}} \approx \frac{V_A}{I_{CQ}}$$



(b)

10

Sự phụ thuộc của i_C vào áp collector – Hiệu ứng Early Dependence of i_C on the Collector Voltage – Early Effect



$V_A = 50V$ đến $100V$

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

(a) Conceptual circuit for measuring the i_C - v_{CE} characteristics of the BJT. (b) The i_C - v_{CE} characteristics of a practical BJT.

11

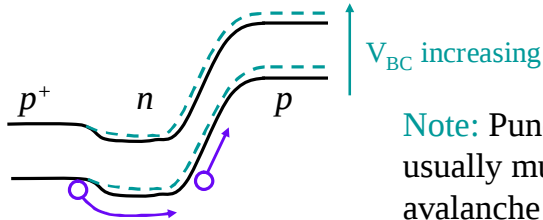
Đánh thủng trong BJT

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 tiếp xúc PN]

12

- The **punch-through breakdown** occurs when the reverse-bias C-B voltage is so large that the C-B and the E-B depletion regions merge.
- The emitter-base barrier height for holes is affected by V_{BC} , i.e. small increase in V_{BC} is needed for large increase in I_C .



- The **mechanism of avalanche breakdown** in BJT's depend on the circuit configuration (common-emitter or common-base configuration).

13

- For a **common-base** configuration, the avalanche breakdown in the C-B junction (open emitter) BV_{BC} is obtained via the maximum (breakdown) electric field F_{BR} (~ 300 kV/cm for Si and 400 kV/cm for GaAs):

$$BV_{BC} \approx \frac{k_s \epsilon_0 F_{BR}^2}{2q} \left(\frac{1}{N_B} + \frac{1}{N_C} \right) \approx \frac{k_s \epsilon_0 F_{BR}^2}{2q N_C}$$

- The increase in current for voltages higher than BV_{BC} is reflected via the **multiplication factor** in the current expression. It equals one under normal operating conditions, and exceeds unity when avalanche breakdown occurs.
- When the emitter is open, the **multiplication factor for the C-B junction** is:

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

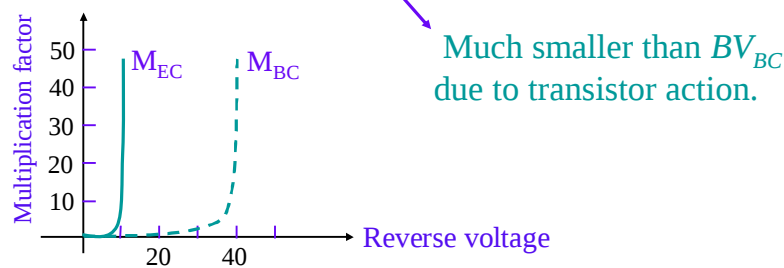
14

- For a **common-emitter** configuration, the collector-emitter breakdown voltage BV_{EC} is related to BV_{BC} :

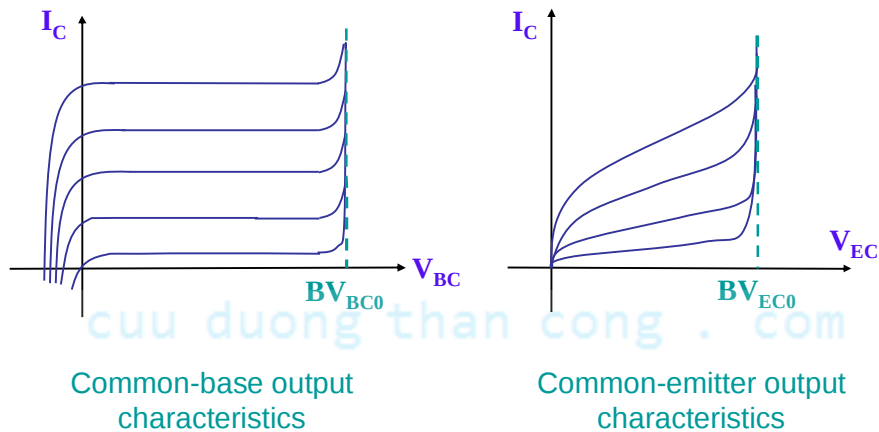
$$I_E = I_C \rightarrow \text{Open base configuration}$$

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

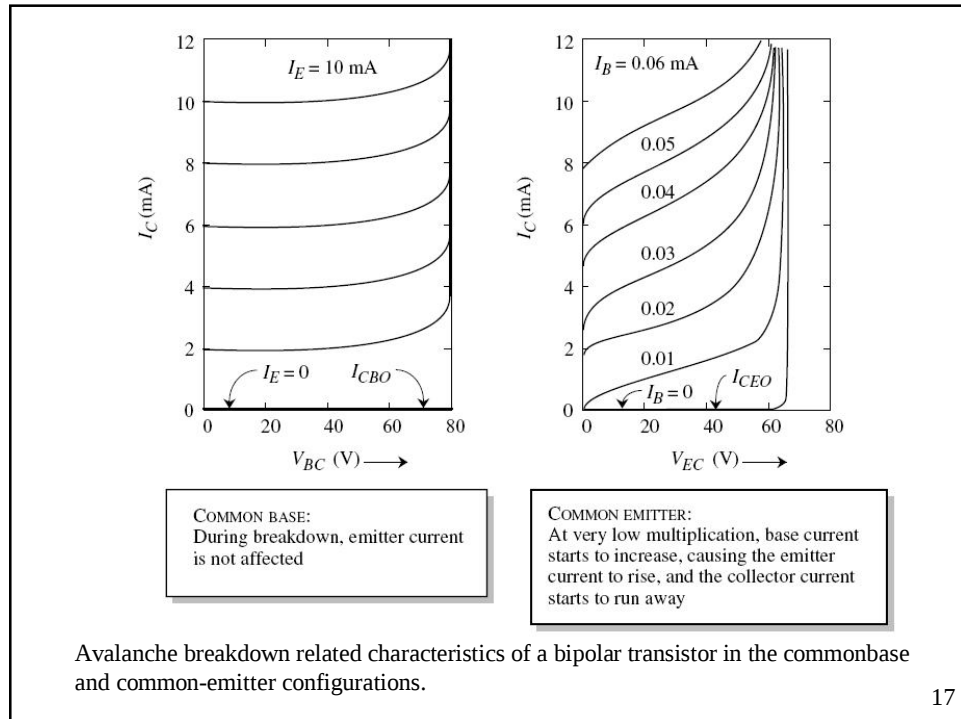
$$M_{EC} = \frac{M_{BC}(1 - \alpha_{dc})}{1 - \alpha_{dc}M_{BC}} \rightarrow BV_{EC} = BV_{BC}(1 - \alpha_{dc})^{1/m_b}$$



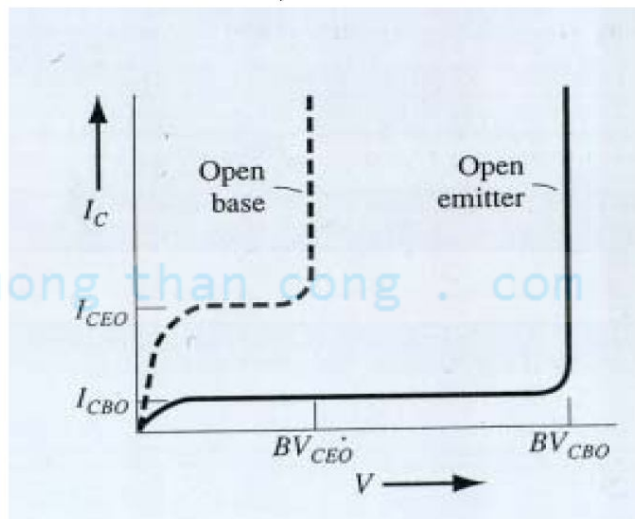
15



16



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



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

19

cuu duong than cong . com

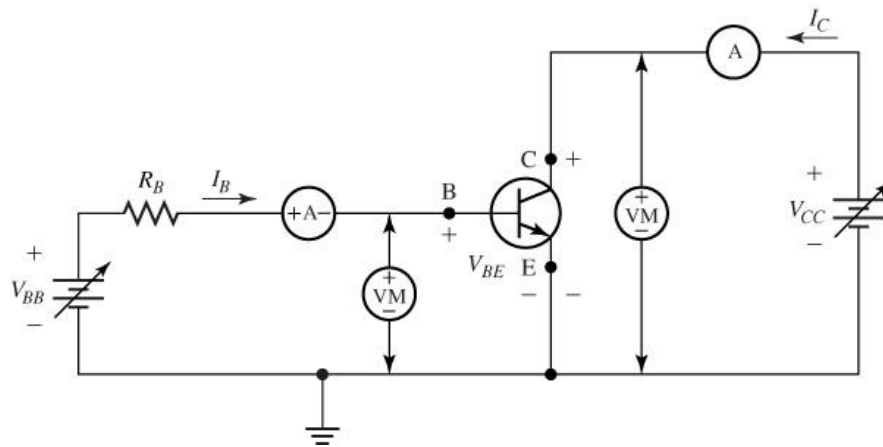
5.5 Các đặc tuyến của BJT

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

cuu duong than cong . com

20

Mạch đo đặc tuyến BJT NPN



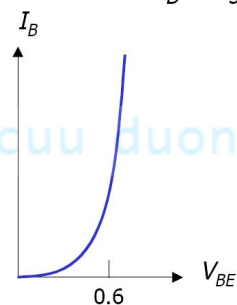
21

Detailed BJT characteristics

Input characteristic (I_B versus V_{BE})

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

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



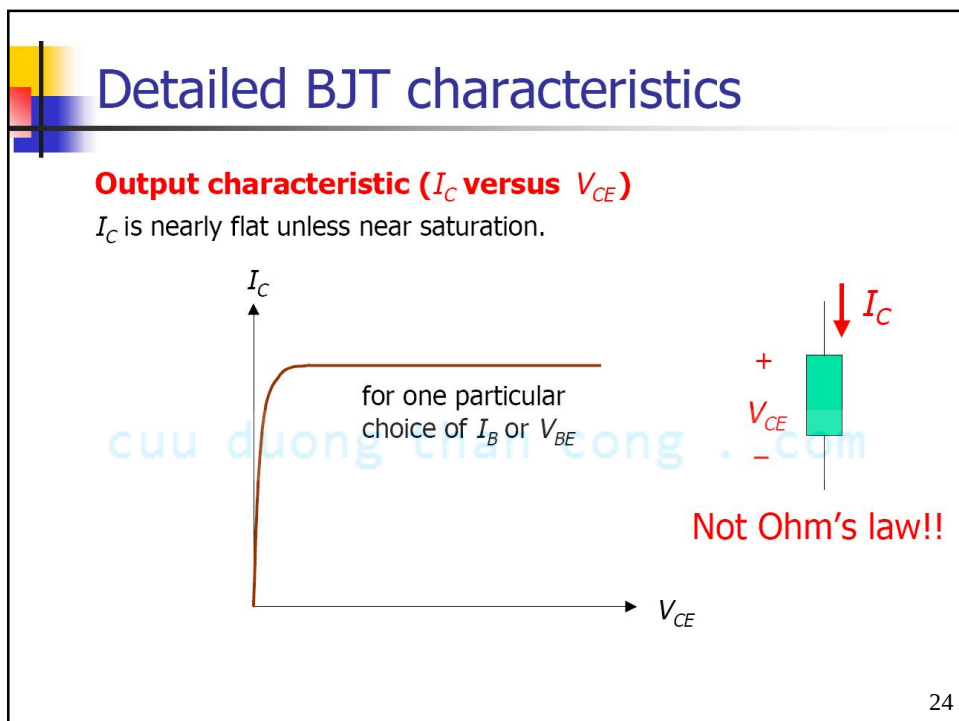
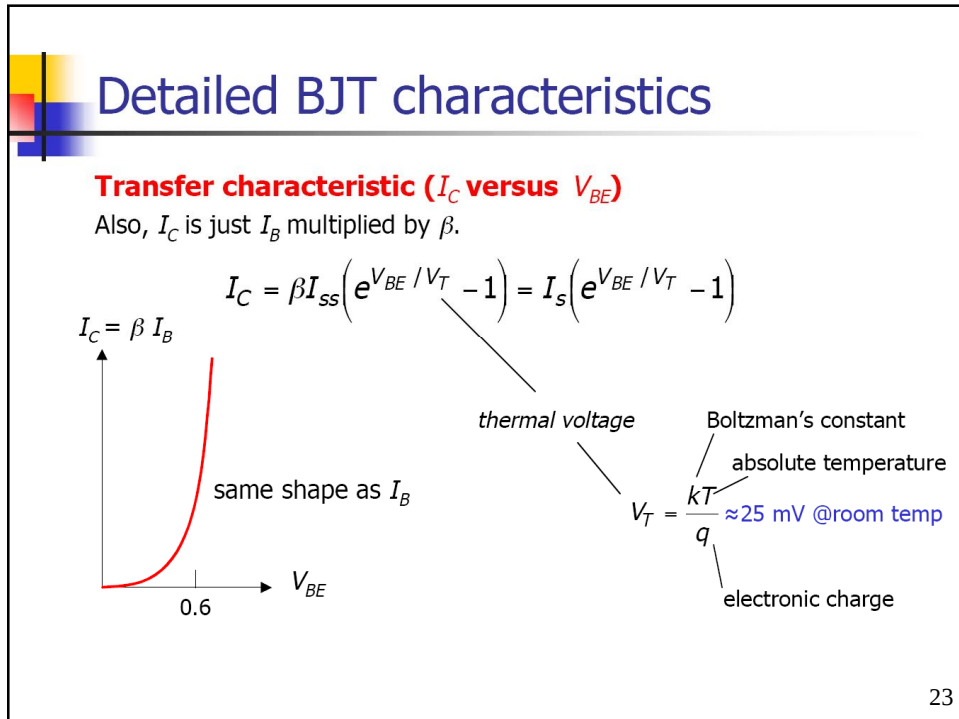
thermal voltage

Boltzman's constant
absolute temperature

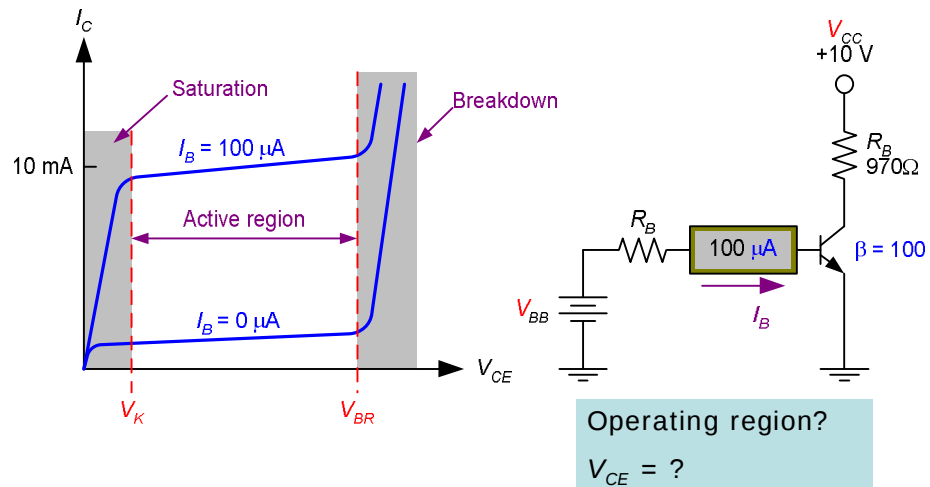
$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV @ room temp}$$

electronic charge

22

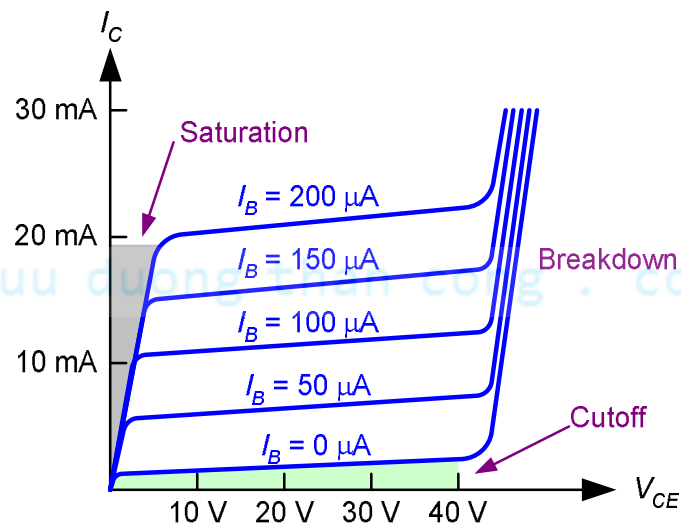


A collector characteristic curve.



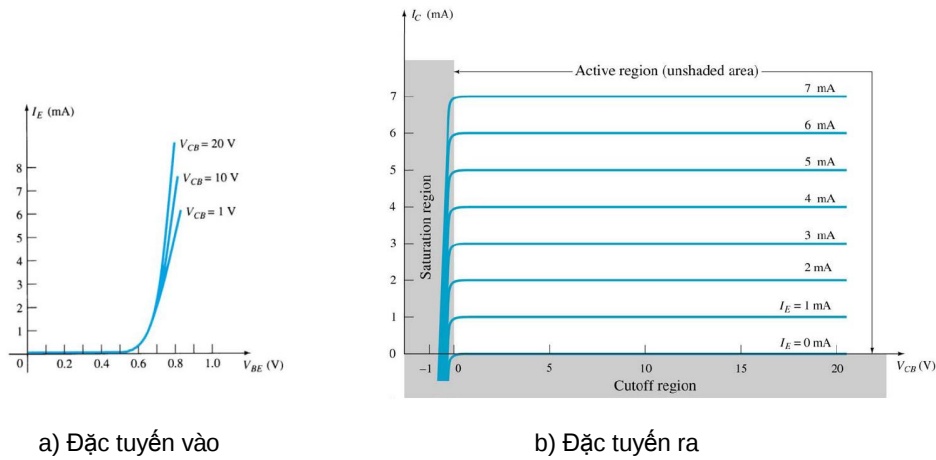
25

A composite of collector characteristic curves of a BJT



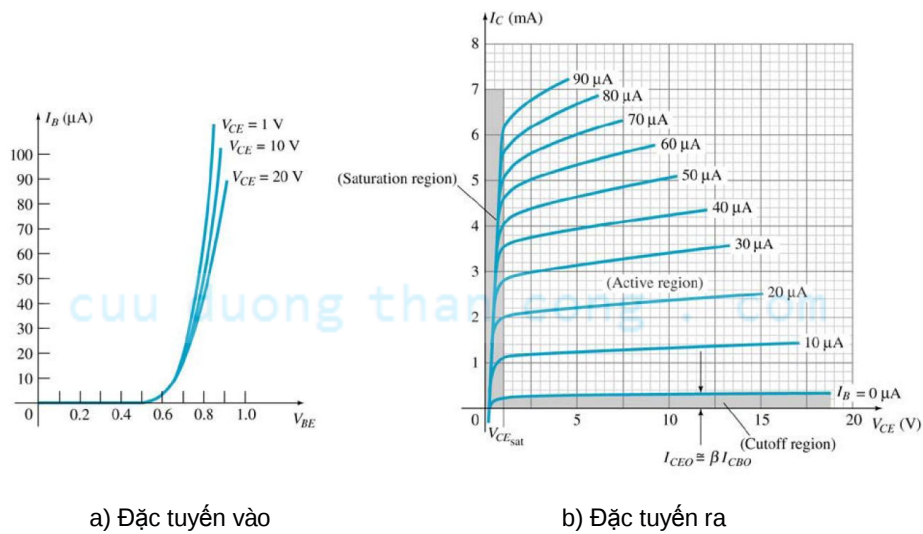
26

Đặc tuyến của BJT NPN mắc CB



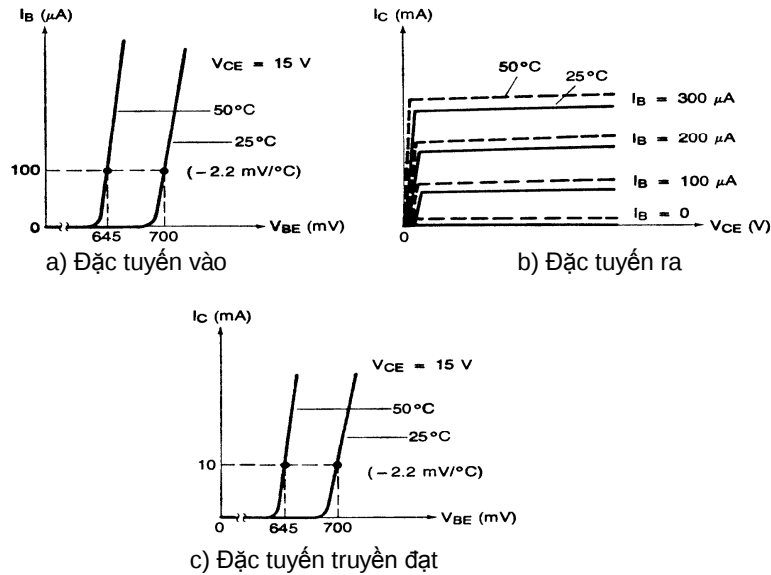
27

Đặc tuyến của BJT NPN mắc CE



28

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



29

Important small-signal characteristic

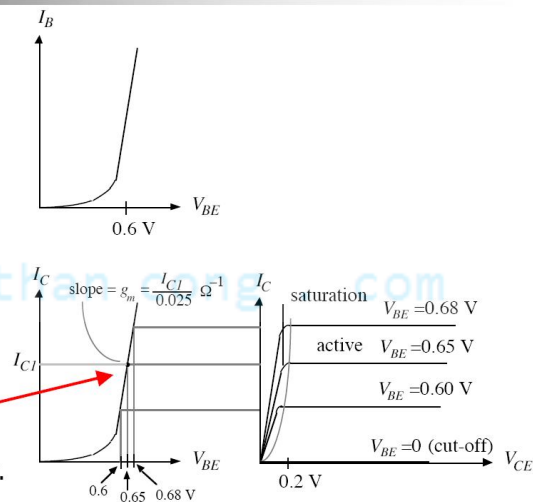
Different I_B (or V_{BE}) has different output characteristic.

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.



30

Hồ dẫn g_m

What is g_m ?

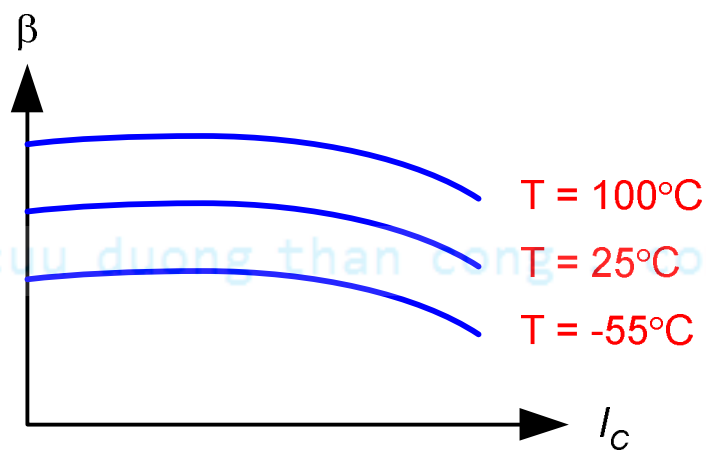
$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}}$$

A simple differentiation gives

$$\begin{aligned} g_m &= \frac{dI_C}{dV_{BE}} = \frac{d}{dV_{BE}} \left(\beta I_{SS} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) \right) \\ &= \beta I_{SS} (e^{V_{BE}/V_T}) \frac{1}{V_T} \\ &\approx \frac{I_C}{V_T} \quad \text{or} \quad \frac{I_C}{25\text{mV}} \quad \text{at room temp} \end{aligned}$$

31

Ảnh hưởng của nhiệt độ và dòng I_C đến β

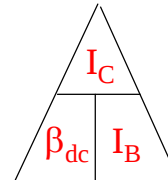


32

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:

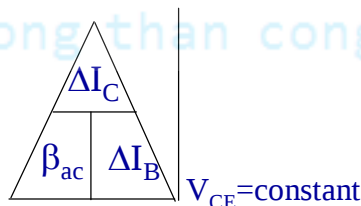
$$30 < \beta_{dc} < 300 \rightarrow 2N3904$$



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

33

- 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:



34

Example :

From o/p characteristics of CE configuration find β_{ac} and β_{dc} with an operating point at $I_B = 25 \mu A$ and $V_{CE} = 7.5V$.

35

Solution:

$$\beta_{ac} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE} = \text{constant}}$$

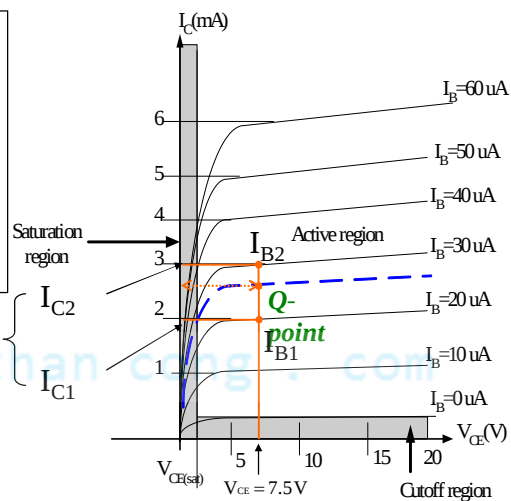
$$= \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}} = \frac{3.2 \text{ m} - 2.2 \text{ m}}{30 \mu - 20 \mu}$$

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

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

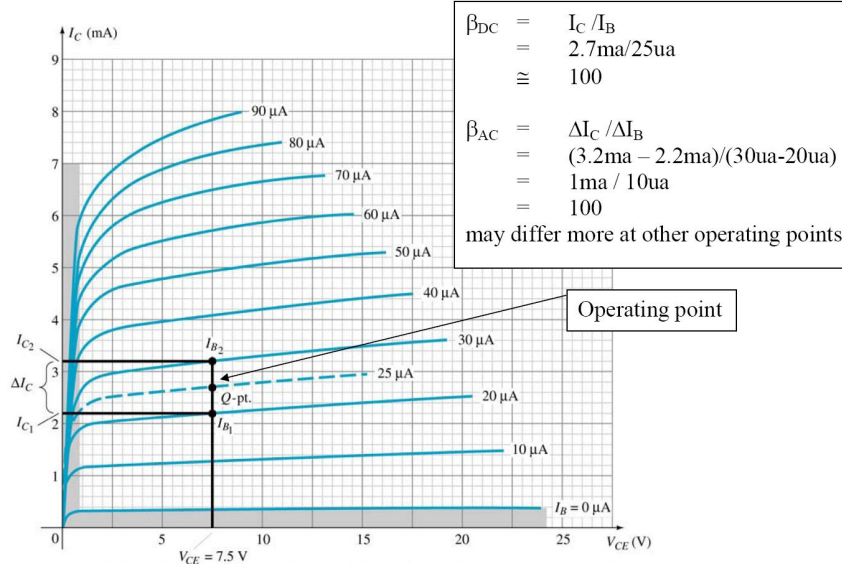
$$= \frac{2.7 \text{ m}}{25 \mu}$$

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



36

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



37

Limits of operation for transistor

- Many BJT transistor used as an amplifier. Thus it is important to notice the limits of operations.
- At least 3 maximum values is mentioned in data sheet. There are:

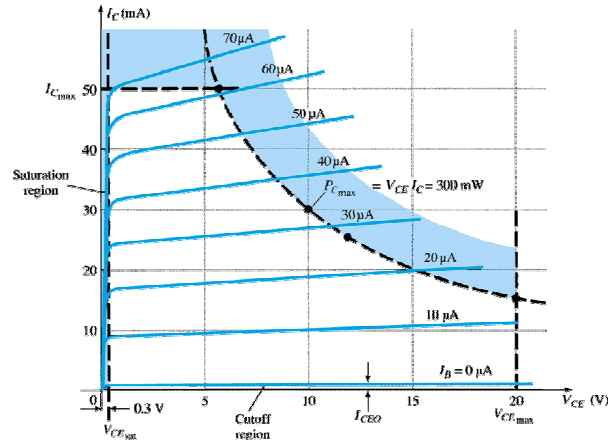
- Maximum power dissipation at collector: P_{Cmax} or P_D
- Maximum collector-emitter voltage: V_{CEmax} sometimes named as $V_{BR(CEO)}$ or V_{CEO} .
- Maximum collector current: I_{Cmax}

- There are few rules that need to be followed for BJT transistor used as an amplifier. The rules are:

- transistor need to be operate in active region!
- $I_C < I_{Cmax}$
- $P_C < P_{Cmax}$

38

Transistor limits of operation



Note: V_{CE} is at maximum and I_C is at minimum ($I_{C(max)} = I_{CEO}$) in the cutoff region.
 I_C is at maximum and V_{CE} is at minimum ($V_{CE(max)} = V_{CE(sat)} = V_{CEO}$) in the saturation region.
 The transistor operates in the active region between saturation and cutoff.

39

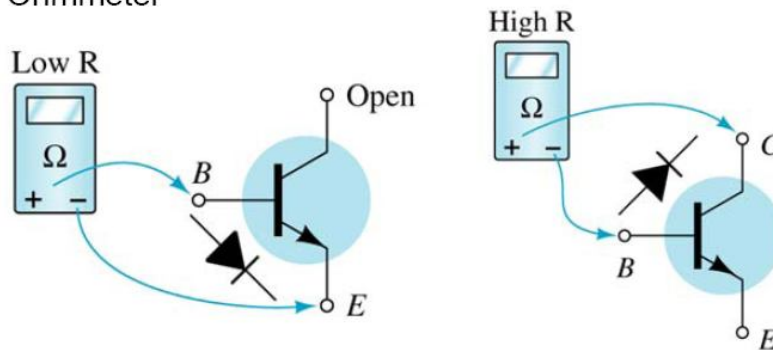
Đọc bảng dữ liệu

- 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)

40

Transistor Testing

1. Curve Tracer
Provides a graph of the characteristic curves.
2. DMM
Some DMM's will measure β_{DC} or HFE .
3. Ohmmeter



41

cuu duong than cong . com

cuu duong than cong . com