

Hướng dẫn ôn thi LT môn Vật lý bán dẫn  
HK 2 – Năm học: 2015-2016

Chú ý:

- Đề thi trắc nghiệm với tổng số câu tối thiểu là 50.
- Số đề: 4 đến 8
- Đề thi không cho sử dụng tài liệu

Trọng tâm ôn thi của các chương như sau:

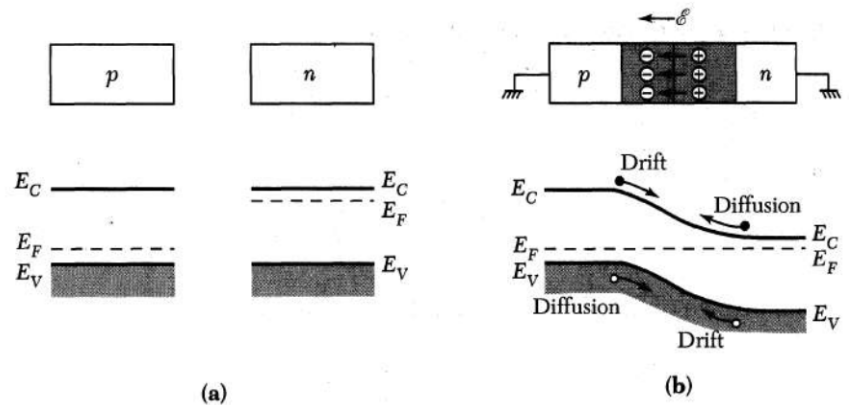
**Chương 4. Chuyển tiếp PN**

• **Chuyển tiếp PN**

- o Kể tên 4 bước chính trong quá trình planar để chế tạo chuyển tiếp PN. Tác dụng của lớp SiO<sub>2</sub> là gì?
- o Định nghĩa của chuyển tiếp PN loại bước (step), loại biến đổi đều (graded)
- o Sự tạo thành chuyển tiếp PN:

**Hình 4.1** (a) Các bán dẫn (được pha tạp chất đều) loại P và N trước khi tạo thành chuyển tiếp.

(b) Điện trường trong miền nghèo (depletion region) và giản đồ dải năng lượng của chuyển tiếp p-n ở điều kiện cân bằng nhiệt



- **Chuyển tiếp PN chưa có phân cực** (với chuyển tiếp bước) (chuyển tiếp PN ở điều kiện cân bằng)
  - o sự hình thành miền nghèo-chuyển động của hạt dẫn?
  - o miền nghèo, miền trung hòa.

**Thế nội khuếch tán  $V_{bi}$  (hay  $\phi_B$ ) hay rào thế**

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = V_T \ln \left( \frac{n_{n0}}{n_{p0}} \right) = V_T \ln \left( \frac{p_{p0}}{p_{n0}} \right)$$

**Chú ý:**  $E_m$  là điện trường cực đại tại giao tiếp của P và N,  $W$  là bề rộng miền nghèo của chuyển tiếp PN,  $W_P$  (còn gọi là  $x_p$ ) là bề rộng miền nghèo bên bán dẫn P và  $W_N$  (còn gọi là  $x_n$ ) là bề rộng miền nghèo bên bán dẫn N, và  $\epsilon_s$  là hằng số điện môi của bán dẫn.

**Miền điện tích không gian (miền nghèo)**

$$N_A W_P = N_D W_N$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} E_m W$$

$$W = W_P + W_N = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

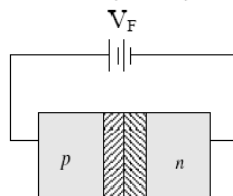
$$E_m = \frac{q N_D W_N}{\epsilon_s} = \frac{q N_A W_P}{\epsilon_s}$$

Không phân cực

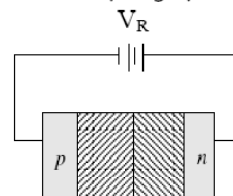


Miền nghèo

Phân cực thuận



Phân cực ngược



Các phân cực có thể có ở chuyển tiếp PN

Làm sao nhận biết chuyển tiếp PN đang ở tình trạng: không phân cực, phân cực thuận, hay phân cực ngược? (dựa vào  $V_A = V_P - V_N$ , với  $V_P$  là điện thế tại P [anode] và  $V_N$  là điện thế tại N [cathode])

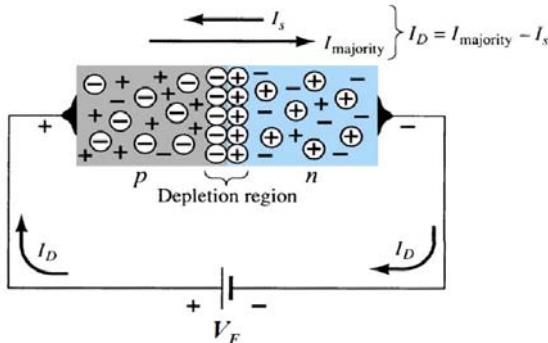
- **Chuyển tiếp PN được phân cực thuận (forward bias)** (với chuyển tiếp bước)
  - o Phân cực thuận? ( $V_P > V_N$ ).
  - o Khi phân cực thuận tăng thì : miền nghèo giảm và điện trở miền nghèo giảm.

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_F)}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \quad \text{với } V_{bi} > V_F > 0 \text{ là điện áp thuận trên diode}$$

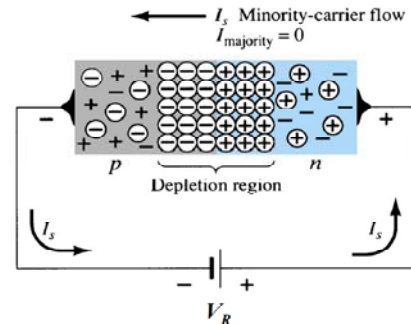
- o Dòng điện thuận do các thành phần hạt dẫn nào tạo thành, đa số hay thiểu số?
- o Phương trình dòng điện qua chuyển tiếp PN được phân cực thuận:

$$I_F = I_0 \left( e^{V_A/V_T} - 1 \right)$$

với  $I_0$  (còn được gọi là  $I_S$ ) là dòng điện bão hòa ngược và khi nhiệt độ tăng thì  $I_0$  tăng.



(a) Chuyển tiếp PN với phân cực thuận



(b) Chuyển tiếp PN với phân cực ngược

• **Chuyển tiếp PN ở phân cực ngược (reverse bias)** (với chuyển tiếp bước)

- o Phân cực ngược? ( $V_P < V_N$ )..
  - o Dòng điện ngược:  $I_R \approx I_0$  (khi nhiệt độ tăng thì  $I_0$  tăng)
  - o Bề rộng miền nghèo tăng lên
- (với điện áp ngược  $V_R$ :  $V_{BR}$  (điện áp đánh thủng)  $> V_R > 0$ , điện áp đặt vào diode là  $V_A = -V_R < 0$ )

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

• **Dòng điện sinh tái hợp**

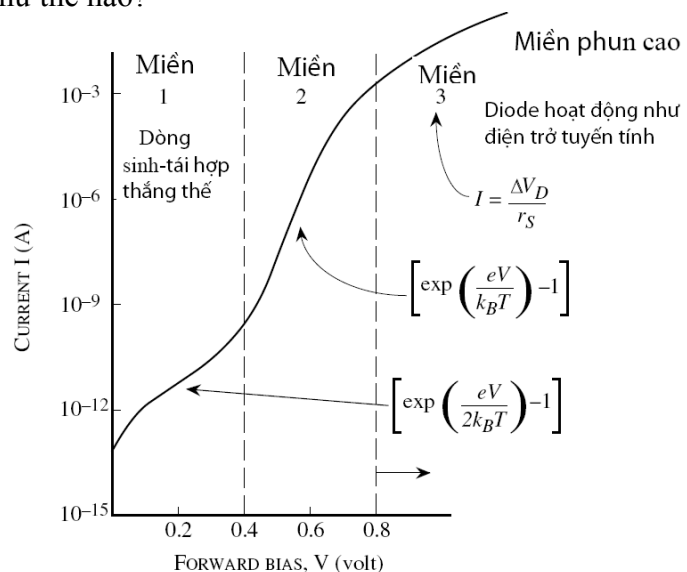
Dòng điện tái hợp thẳng thể ở phân cực thuận thấp và dòng điện khuếch tán thẳng thể ở phân cực thuận cao hơn.

$$I_F = I_0 \left( e^{V_A/\eta V_T} - 1 \right)$$

với  $\eta$  là hệ số lý tưởng (hệ số phát xạ) có trị từ 1 đến 2 tùy theo vật liệu chế tạo, thí dụ với Ge là 1, với Si là 1.1 hoặc từ 1.2 đến 2

- o xem hình 4.4 các độ dốc khác nhau do cái gì ảnh hưởng?
- o tác động của  $\eta$  đến đặc tuyến I-V như thế nào?

**Hình 4.4** Dòng diode dạng semilog ( $\ln I = f(V)$ ) ở phân cực thuận  
(Với  $e$ =điện tích điện tử;  $k_B$ =hằng số Boltzmann;  $r_s$ = điện trở khối).



• **Điện trở vật liệu khối  $R_s$**

$$I_F = I_0 \left( e^{(V_A - I_F R_s)/V_T} - 1 \right)$$

tác động của  $R_s$  đến đặc tuyến I-V như thế nào?

- **Điện dung miền nghèo của chuyển tiếp PN**

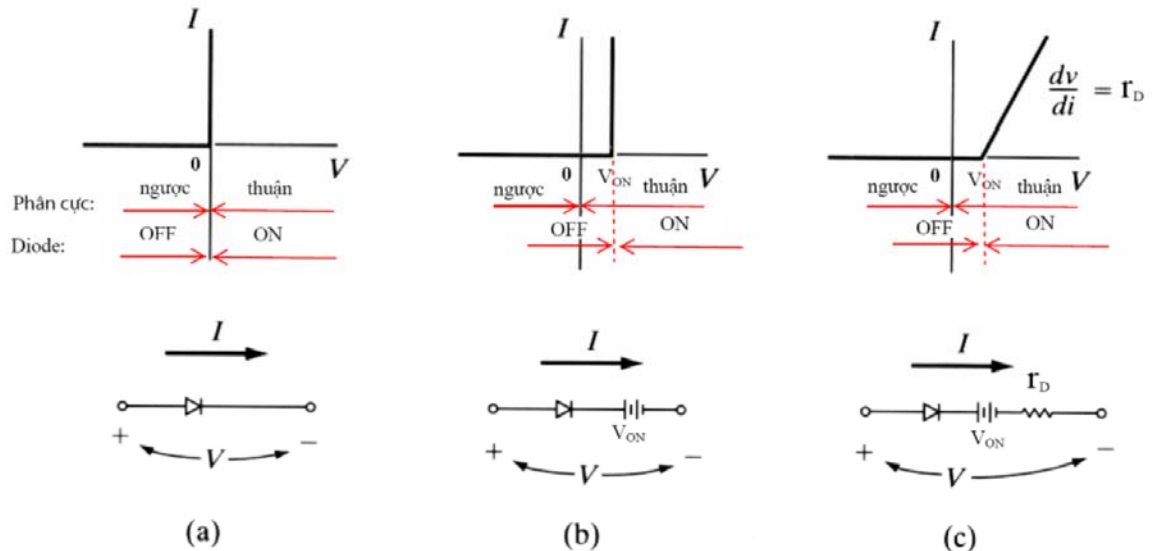
Xét chuyển tiếp PN với phân cực ngược ( $V_A = -V_R < 0$ ): hình thành điện dung miền nghèo.

Điện dung miền nghèo trên một đơn vị diện tích mặt cắt ngang  $C_{dep}$  (F/cm<sup>2</sup>) (còn gọi là  $C_j$ ):

$$C_{dep} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad \text{với } W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

khi áp ngược  $V_R$  tăng thì  $C_{dep}$  giảm và ngược lại. Người ta ứng dụng hiệu ứng này để chế tạo diode biến dung (varicap hay varactor).

- **Các mô hình diode:** (chưa kể đến vùng đánh thủng)



**Mô hình diode lý tưởng**  
(xấp xỉ bậc 1)

**Mô hình sụt áp hằng**  
(xấp xỉ bậc 2)

**Mô hình với điện trở thuận**  
(xấp xỉ bậc 3)

- $V_{ON} = 0.7V$  với Si (1 số TL khác gọi là  $V_\gamma$ )
- $r_D$  là điện trở thuận  $= dV/dI$  tại điểm Q (có  $V_{DQ} > V_{ON}$ )  $= V_T/I_{DQ}$

- **Mô hình diode tín hiệu nhỏ với tần số thấp:**

| Phân cực với     | $V_{DQ} < V_{ON}$                               | $V_{DQ} \geq V_{ON}$                   |
|------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Mạch tương đương | <br>$r_r$ điện trở ngược $> 10 \text{ M}\Omega$ | <br>với $r_d$ là điện trở AC của diode |

Chú ý: Với tần số cao thì có thêm điện dung song song.

- **Điện trở động  $r_D$  và điện trở tĩnh  $R_D$  của diode**

- o Điện trở động  $r_D$  hay  $r_d$  (còn gọi là điện trở AC)

$$r_D = \frac{dV_D}{dI_D} = \frac{V_T}{I_D} = \frac{V_T}{I_Q} = \frac{kT}{qI_Q} \quad (\text{ở } T=300^\circ\text{K thì } r_D \approx 0.025V/I_D)$$

với  $V_D$ ,  $I_D$  là áp và dòng qua diode,  $I_Q$  là  $I_D$  ở điểm làm việc Q.

- o Điện trở tĩnh  $R_D$  (còn gọi là điện trở DC):  $R_D = V_D/I_D = V_Q/I_Q$

- **Điện dung chuyển tiếp PN**

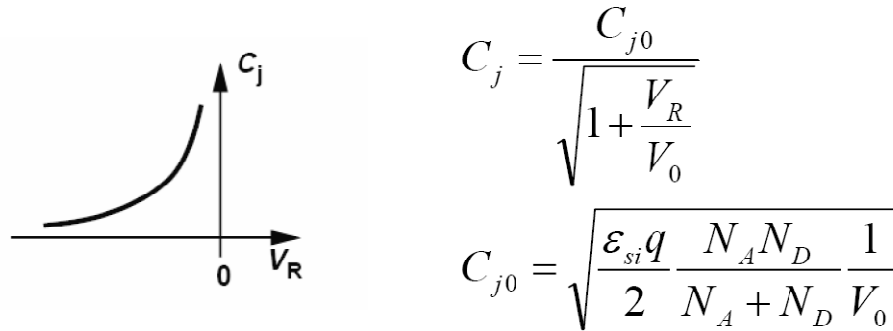
- o với phân cực ngược: có điện dung chuyển tiếp  $C_J$  [F] ( $J$ =junction=chuyển tiếp)

$$C_J = A C_{dep} = \frac{\epsilon_s A}{W}$$

với A: diện tích mặt cắt ngang;  $\epsilon_s$  hằng số điện môi bán dẫn; W: bề rộng miền nghèo.

- o với phân cực thuận: có điện dung khuếch tán  $C_D$  [F]:  $C_D \cong \frac{I_D \tau_T}{V_T}$

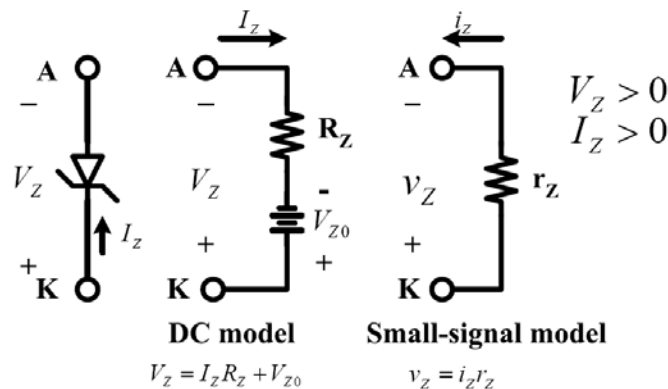
với  $\tau_T$  là thời gian đi qua diode (còn gọi là thời gian chuyển tiếp [ $T=\text{transit}$ ])



**Hình 4.6** Điện dung của diode chuyển tiếp PN với phân cực ngược  $V_A = -V_R$  (Chú ý :  $V_0 = V_{bi}$ )

#### • Các loại diode khác

- o **Diode chỉnh lưu**: diode tiếp xúc PN thông thường
  - chỉnh lưu: cho dòng điện đi qua 1 chiều (từ anode sang cathode)
  - thường thì có điện áp đánh thủng lớn.
- o **Diode ổn áp (còn gọi là diode Zener)**
  - Sử dụng hiệu ứng đánh thủng Zener và/hoặc hiệu ứng đánh thủng thác lũ.
  - Xem lại ảnh hưởng của nhiệt độ? Với điện áp đánh thủng  $V_{BR} = -V_Z$  (với  $V_Z > 0$ ) thì  $TCV_Z < 0$  với đánh thủng Zener và  $TCV_Z > 0$  với đánh thủng thác lũ.
- o **Diode biến dung (varicap hay varactor)**
  - ứng dụng điện dung tiếp xúc  $C_J = f(V_R)$ , khi  $V_R$  tăng thì  $C_J$  giảm (phân cực ngược  $V_A = -V_R < 0$ ) (xem hình 4.6).



**Hình 4.7** Mô hình diode Zener với phân cực ngược  $V_R > V_{Z0}$

- o **Diode Schottky**
  - tạo từ chuyển tiếp M-S (M=Metal=kim loại và S=Semiconductor=bán dẫn) có tính chỉnh lưu, thí dụ M là platinum và S là bán dẫn loại N hình thành diode Schottky với Anode bên M và cathode bên S.
  - Hãy kể thêm các kim loại khác ngoài Platinum?
  - có rào thế nhỏ ( $\sim$  từ 0.2V đến 0.3V)
  - hoạt động tắt/dẫn ở tốc độ chuyển mạch cao.

#### • Các ứng dụng của diode

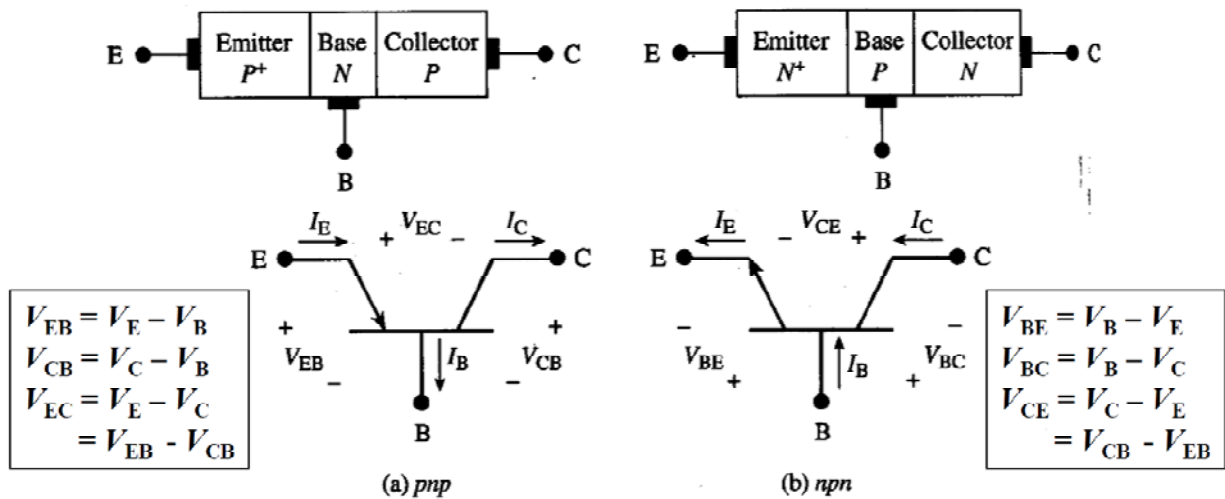
- o Mạch chỉnh lưu: bán kỳ, toàn sóng, và chỉnh lưu. Sơ đồ và các công thức
- o Mạch lọc sóng gợn bằng tụ. Cách tính tụ với các mạch chỉnh lưu đi với mạch lọc.
- o Mạch xén dùng diode thường và Zener.
- o Mạch ổn áp dùng diode Zener.
- o ...

### Chương 5. BJT (TRANSISTOR TIẾP XÚC LƯỜNG CỰC)

- Tại sao có tên gọi lưỡng cực? tiếp xúc (hay chuyển tiếp hay mối nối)?
- Cấu tạo BJT loại NPN và loại PNP. Ký hiệu  $j_E, j_C$ . Nồng độ tạp chất của các miền?

Ký hiệu:

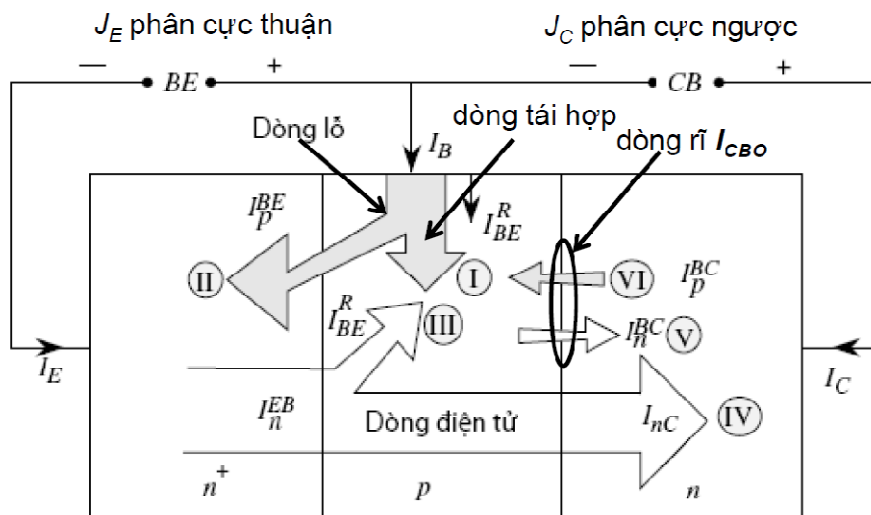
- E = Emitter = Phát, B = Base = Nền, và C = Collector = Thu
- $J_E$ : chuyển tiếp PN giữa B và E
- $J_C$ : chuyển tiếp PN giữa B và C



$$I_E = I_B + I_C$$

**Hình 5.1** Ký hiệu của hai loại BJT: (a) PNP và (b) NPN.

- Ở ký hiệu BJT thì mũi tên ở cực E có ý nghĩa gì?
- Các dòng điện trong BJT ở chế độ tích cực [thuận]:



- **Dòng điện rỉ (rò)  $I_{CBO}$**  (dòng từ C đến B với E hở mạch) và  $I_{CEO}$  (dòng từ C đến E với B hở mạch) trong BJT (nhiệt độ tăng dẫn đến dòng rỉ tăng)
  - o cấu hình CB:  $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$
  - o cấu hình CE:  $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$  với  $I_{CEO} = I_{CBO}/(1-\alpha)$
- Hệ số vận chuyển miền nền B, hiệu suất cực phát  $\gamma_E$ ? Chúng phụ thuộc như thế nào với các tham số của BJT (nồng độ tạp chất, bề rộng miền nền)?  
BJT tốt có B,  $\gamma_E$  tiến gần tới 1.
  - o **Hiệu suất cực phát  $\gamma_E$**

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

với  $p_{e0} = n_i^2/N_{DE}$ ;  $n_{b0} = n_i^2/N_{AB}$ ;  $W_B$  = bề rộng miền nền  
 $D_E$  = hệ số khuếch tán của hạt dẫn thiểu số tại E =  $D_p$   
 $D_B$  = hệ số khuếch tán của hạt dẫn thiểu số tại B =  $D_n$   
 $L_E$  = chiều dài khuếch tán của hạt dẫn thiểu số tại E =  $L_p$

Thay các biểu thức trên vào  $\gamma_e$ , ta có dạng biểu diễn khác của  $\gamma_e$  như sau:

$$\gamma_e \approx 1 - \frac{N_{AB}}{N_{DE}} \frac{D_p}{D_n} \frac{W_B}{L_p}$$

o **Hệ số vận chuyển miền nền B**

$$B \approx 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{W_{Bn}}{L_B} \right)^2$$

với  $W_{Bn}$  = bề rộng miền nền phần trung hòa  $\approx W_B$

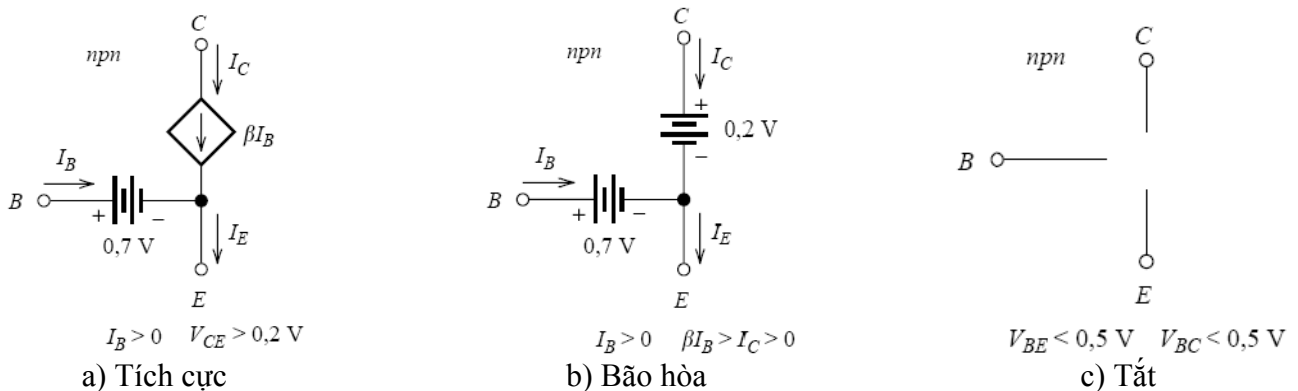
$L_B$  = chiều dài khuếch tán của hạt dẫn thiểu số tại B =  $L_n$

- độ lợi dòng điện cực nền chung  $\alpha = B \cdot \gamma_e = I_C / I_E$
- độ lợi dòng điện cực phát chung  $\beta = \alpha / (1 - \alpha) = I_C / I_B$ 
  - o  $\beta$  cao cần: tốc độ tái hợp thấp ở miền nền và thời gian chuyển tiếp (đi qua) ngắn ở miền nền
  - o  $\beta$  phụ thuộc vào  $I_C$  và nhiệt độ.
  - o  $\beta$  DC :  $\beta_{dc} = I_C / I_B$  với  $I_C, I_B$  là dòng DC
  - o  $\beta$  AC:  $\beta_{ac} = \Delta I_C / \Delta I_B$  với  $\Delta I_C, \Delta I_B$  là sự thay đổi của  $I_C, I_B$  do dòng tín hiệu AC
- **Các chế độ làm việc** (chế độ hoạt động) của BJT và đặc điểm của chúng:

| Phân cực cho |       | Chế độ hoạt động                 | Cách nhận biết với BJT NPN                                                                                                                 |
|--------------|-------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $J_E$        | $J_C$ |                                  |                                                                                                                                            |
| Thuận        | Ngược | Tích cực [thuận]<br>(khuếch đại) | $V_{BE} = V_{ON}$ và $V_{CE} > V_{CEsat}$<br>$I_C = \beta I_B$                                                                             |
| Ngược        | Ngược | Tắt (OFF)                        | $V_{BE}, V_{BC} \leq 0$ (thực tế $V_{BE}, V_{BC} < V_{ON}$ )<br>$I_C = I_B = I_E = 0$                                                      |
| Thuận        | Thuận | Bão hòa (ON)                     | $V_{BE} = V_{BEsat}$ và $V_{CE} = V_{CEsat}$<br>$I_C < \beta I_B$                                                                          |
| Ngược        | Thuận | Tích cực ngược                   | Tương tự với chế độ tích cực thuận<br>nhưng hoán đổi chức năng E và C:<br>$I_E = \beta_R I_B$ ( $\beta_R \ll \beta$ ) và $I_C = I_B + I_E$ |

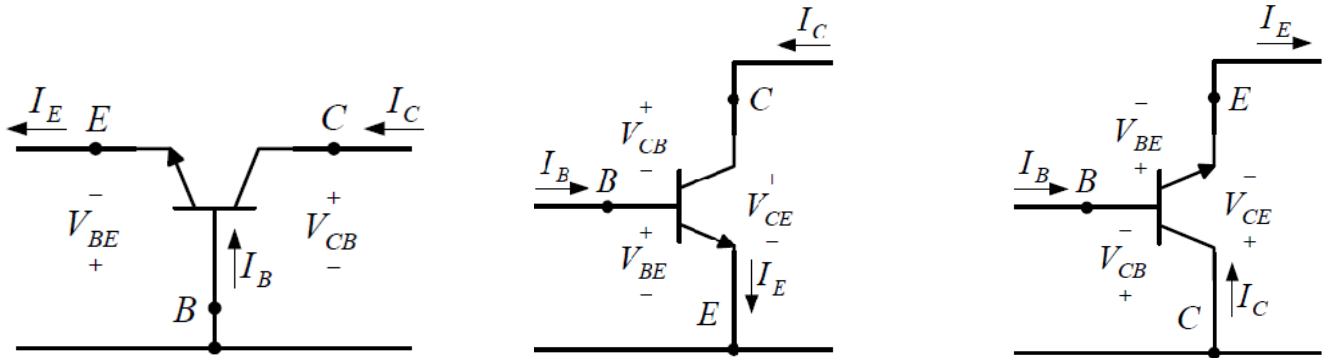
Chú ý:

- o Với BJT NPN Si thì  $V_{ON} = 0.7V$ ,  $V_{BEsat} = 0.7-0.8V$ , và  $V_{CEsat} \approx 0.2V$ .
- o  $\beta_R$  là  $\beta$  ở chế độ tích cực ngược.
- o SV tự suy ra cách nhận biết với BJT PNP.
- **Mô hình tín hiệu lớn của BJT** (TD: xét BJT Si loại NPN)



**Hình 5.2** Mô hình tín hiệu lớn của BJT SI loại NPN trong các chế độ hoạt động khác nhau

- **Các cấu hình mắc BJT:** (Như 1 mạng 4 cực với: Bên trái là mạch vào và Bên phải là mạch ra)



- a) CB = Common Base = B chung    b) CE=Common Emitter=E chung    c) CC=Common collector=C chung

**Hình 5.3** Các cách mắc BJT NPN trong mạch

Hãy nêu đặc điểm của các cách mắc với ứng dụng khóa điện tử và mạch khuếch đại?

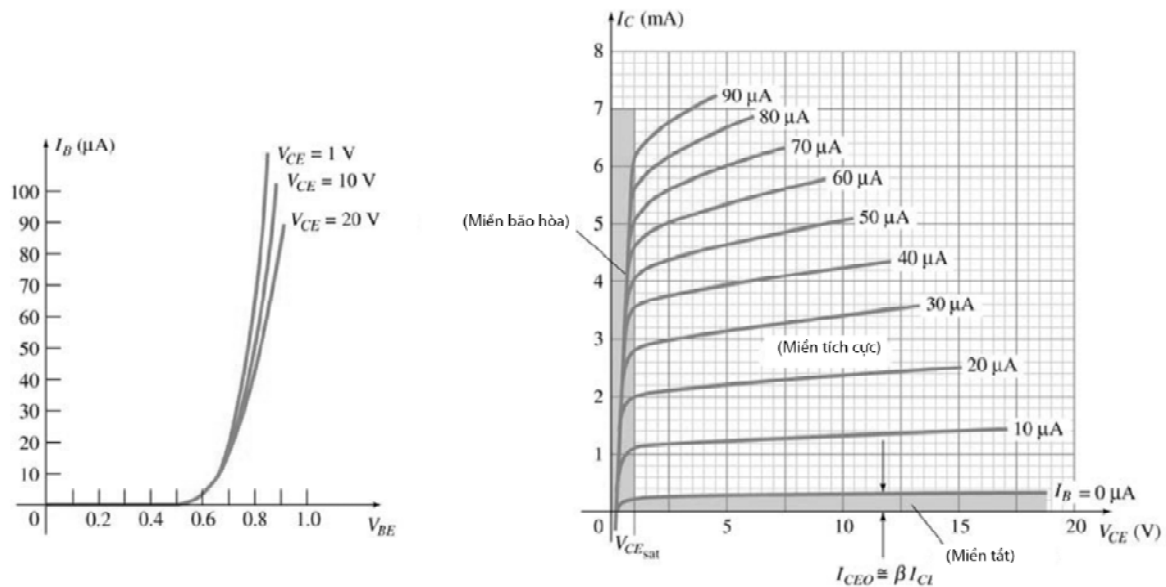
- **Phương trình các dòng điện trong BJT NPN ở chế độ tích cực thuận:**

| Dòng [điện ở cực] thu $I_C$                                                                                       | Dòng [điện ở cực] nền $I_B$                                                                  | Dòng [điện ở cực] phát $I_E$                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_C = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \beta I_B = \alpha I_E$ | $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = \frac{I_E}{\beta + 1}$ | $I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{I_S}{\alpha} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} = (\beta + 1) I_B$ |

với  $I_S$  là dòng bão hòa:  $I_S = \frac{qA_E D_n n_i^2}{N_A W_{Bn}}$

trong đó  $A_E$  là diện tích mặt cắt ngang tại miền phát,  $N_A$  là nồng độ tạp chất Acceptor tại miền nền và  $W_{Bn}$  là bề rộng phân trung hòa trong miền nền.

- **Các Đặc tuyến Volt-Ampere của BJT** (còn gọi là các đặc tuyến I-V)

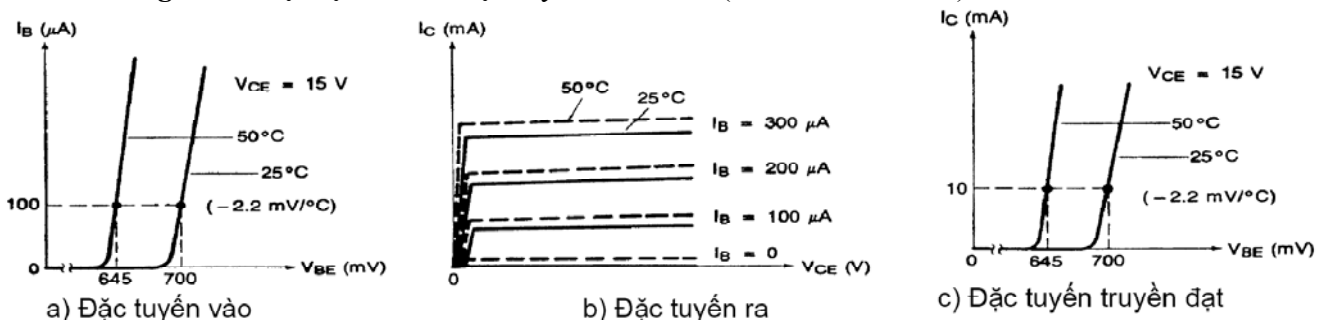


a) Đặc tuyến vào

b) Đặc tuyến ra

**Hình 5.4** Các đặc tuyến vào và ra của BJT NPN mắc CE

- **Ảnh hưởng của nhiệt độ đến các đặc tuyến của BJT** (TD với BJT NPN)



a) Đặc tuyến vào

b) Đặc tuyến ra

c) Đặc tuyến truyền đạt



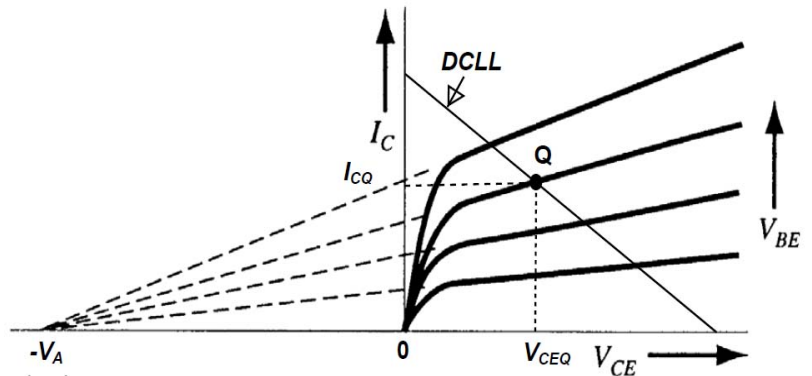
- **Điều chế miền nền:** Xét BJT NPN phân cực ở chế độ tích cực [thuận] (khuếch đại), nếu  $V_{CE}$  tăng  $\Rightarrow$  bề rộng hiệu dụng của miền nền giảm  $\Rightarrow$  dòng  $I_C$  tăng. Nghĩa là bề rộng miền nền bị thay đổi (điều chế) khi điện áp  $V_{CE}$  thay đổi.
- **Điện áp Early  $V_A$ :** giá trị điện áp tại điểm nằm trên trục hoành mà mọi đường cong  $I_C$  theo  $V_{CE}$  (ở phần khuếch đại) đều đi qua điểm này.

Độ dốc tại điểm làm việc Q:

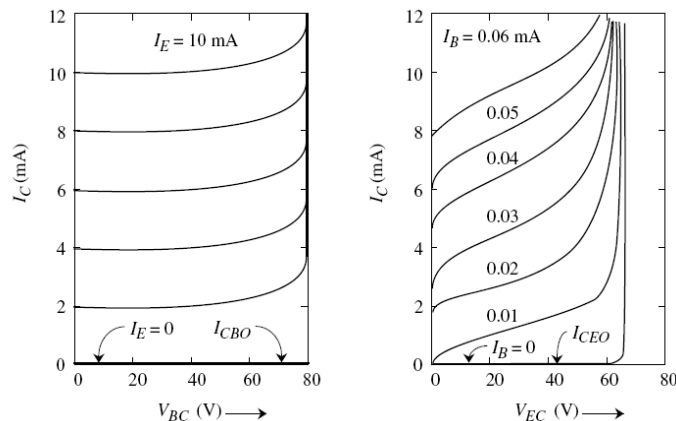
$$\frac{dI_C}{dV_{CE}} = \frac{I_{CQ}}{V_{CEQ} + V_A} \approx \frac{I_{CQ}}{V_A} \quad (\text{nếu } V_A \gg V_{CEQ})$$

Khi đó dòng  $I_C$ :

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

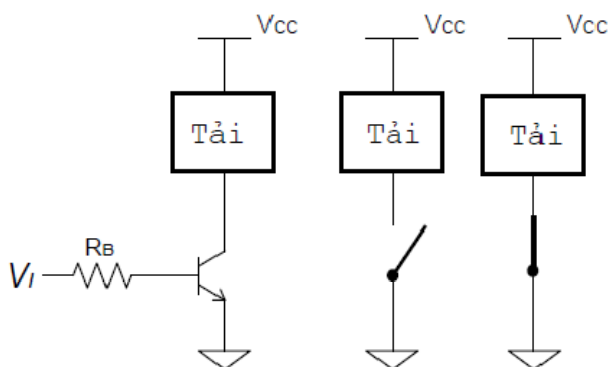


- **Điện áp đánh thủng  $BV_{CBO}$ ,  $BV_{CEO}$** 
  - o CB:  $BV_{CBO}$  (điện áp đánh thủng giữa C và B khi hở mạch E) không bị ảnh hưởng bởi  $I_E$ .
  - o CE:  $BV_{CEO}$  bị ảnh hưởng bởi  $I_B$  ( $I_B$  tăng thì  $BV_{CEO}$  giảm)

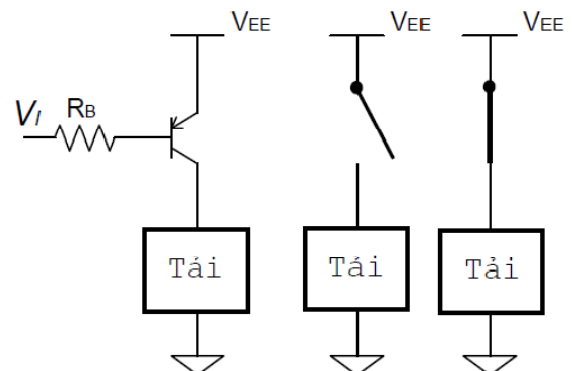


**Hình 5.5** Một thí dụ về đánh thủng ở BJT

- **Khóa điện tử dùng BJT:** Khóa mở với BJT tắt (OFF) – Khóa đóng với BJT bão hòa (ON)



a) Khóa điện tử dùng BJT NPN



b) Khóa điện tử dùng BJT PNP

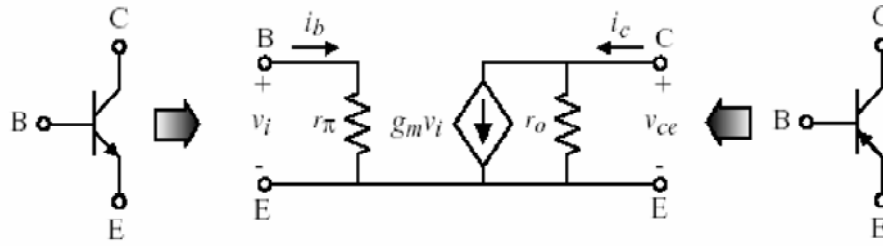
- ❖ Do điện tích chứa tại  $J_C$  khi bão hòa nên giảm tốc độ chuyển mạch của BJT khi chuyển từ bão hòa sang tắt.  $v_P$

- **Transistor Schottky:**

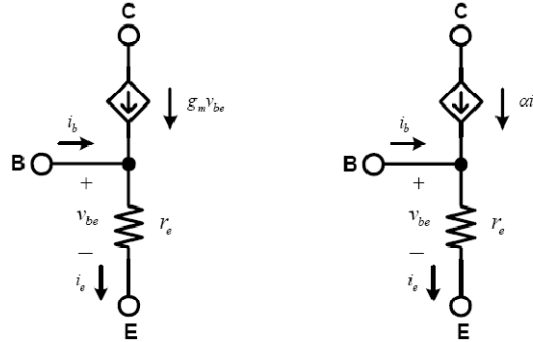
| Cấu tạo | Mạch tương đương | Ký hiệu | Đặc điểm                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                  |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Giảm điện tích chứa tại <math>J_C</math> khi BJT bão hòa vì diode Schottky có <math>V_{ON}</math> nhỏ hơn <math>V_{ON}</math> của chuyển tiếp PN.</li> <li>• Tăng tốc độ chuyển mạch</li> </ul> |



- **Mô hình tín hiệu nhỏ của BJT** (tần số trung bình)

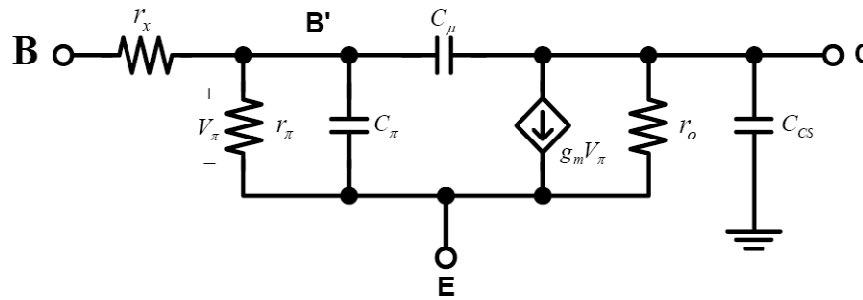


(a) Mô hình  $\pi$  (mắc CE)



(b) Mô hình T (nếu không bỏ qua  $r_o$  được thì sẽ có điện trở  $r_o$  nối từ C đến E)

- **Mô hình tần số cao của BJT ở chế độ tích cực:** ( $C_\pi = C_{be}$ ,  $C_\mu = C_{bc}$ )



**Tần số cắt  $f_T$**  (khi đó  $\beta_{ac} = 1$ )

$$f_T = f_\alpha = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} \approx \beta_0 f_\beta = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)}$$

Với  $\tau_{ec}$  là thời gian điện tử đi từ E đến C với BJT NPN mắc CB ở chế độ tích cực,  $f_\alpha$  và  $f_\beta$  là các tần số mà ở đó  $\alpha_{ac}$  và  $\beta_{ac}$  giảm đi  $\sqrt{2}$  so với trị số ở tần số thấp, và  $\beta_0 (\approx \beta_{dc} = h_{FE})$  là giá trị của  $\beta_{ac}$  ở tần số thấp.

- **Mô hình tham số h.** Các tham số h cho BJT cấu hình CE:

$$h_{ie} \equiv r_\pi \equiv r_{be} \equiv \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{V_{CE}=0} = \beta_{ac} r'_e = \beta \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx \beta \frac{V_T}{I_{CQ}}$$

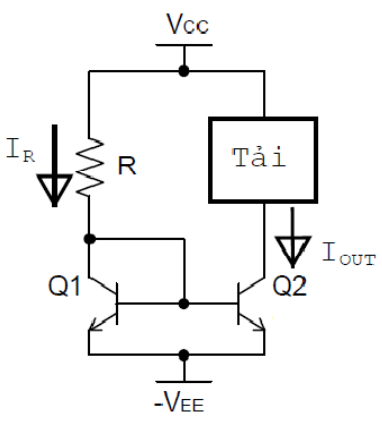
$$h_{fe} \equiv \beta_{ac} \equiv \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{V_{CE}=0} = g_m h_{ie}$$

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{1}{r'_e}$$

$$r_c \equiv r_o \equiv \frac{1}{h_{oe}} \equiv \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{I_B} = \left. \frac{v_{ce}}{i_c} \right|_{I_B=0} = \frac{V_A + V_{CEQ}}{I_{CQ}} \approx \frac{V_A}{I_{CQ}} \quad (\text{nếu } V_A \gg V_{CEQ})$$

**Chú ý:**  $\beta_{dc} = h_{FE} = I_C/I_B$  ;  $\beta_{ac} = h_{fe} = i_c/i_b$  (ở tần số thấp và trung bình:  $\beta_{ac} \approx \beta_{dc} = \beta$ )

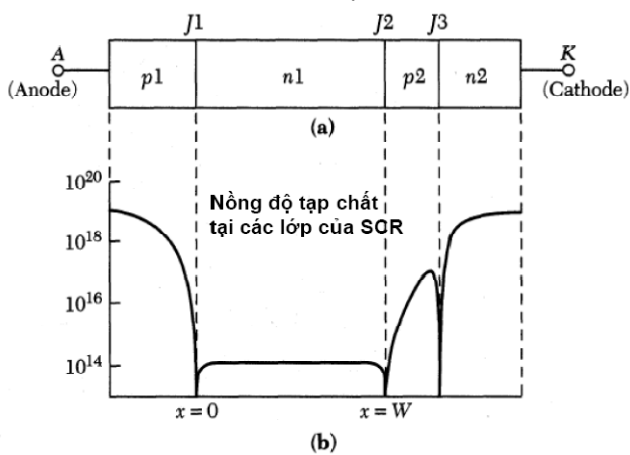
• **Gương dòng điện** (Current mirror)

| Mạch                                                                              | Điều kiện để là nguồn dòng                                                                                                                                                                                                                                                    | Phương trình                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ol style="list-style-type: none"> <li>Q1 và Q2 có đặc tính giống nhau</li> <li>Q1 (được mắc như diode) và Q2 luôn ở chế độ tích cực thuận (dẫn đến có giới hạn với điện trở tải <math>R_L</math>)</li> </ol> <p>Chú ý: <math>V_{CC}</math> và <math>V_{EE} &gt; 0</math></p> | <p>Dòng hằng qua tải:</p> $I_{OUT} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta}}$ <p>với dòng chuẩn <math>I_R</math>:</p> $I_R = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R}$ <p>Giới hạn của tải <math>R_L</math> là</p> $0 \leq R_L < \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{CE,sat}}{I_{OUT}}$ |

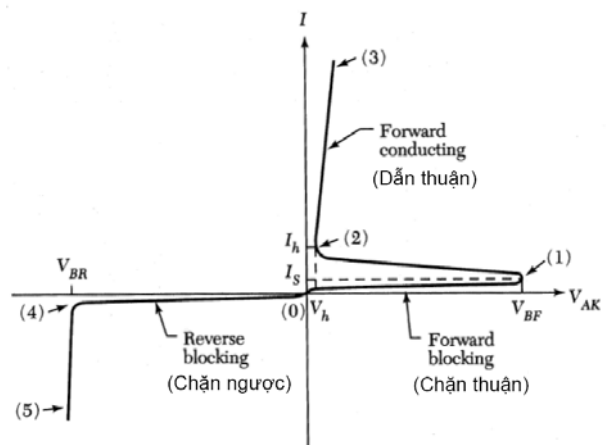
• **Thyristor**: là dụng cụ công suất quan trọng, được thiết kế để xử lý **điện áp cao và dòng điện lớn**.

o **Diode 4 lớp p-n-p-n**

Cấu tạo



Đặc tuyến dòng-áp của diode p-n-p-n

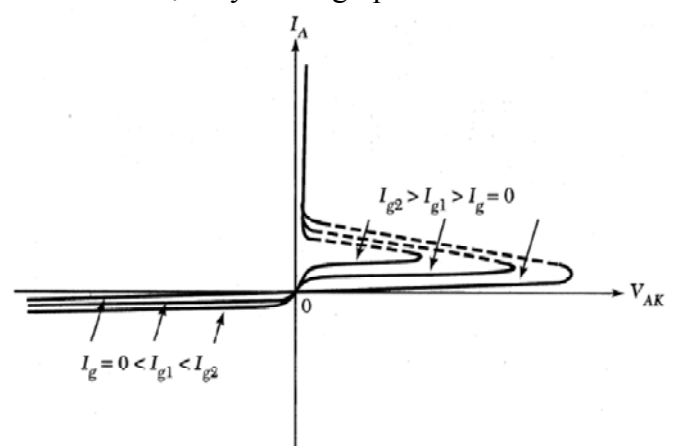
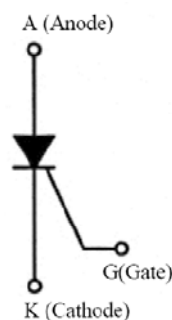
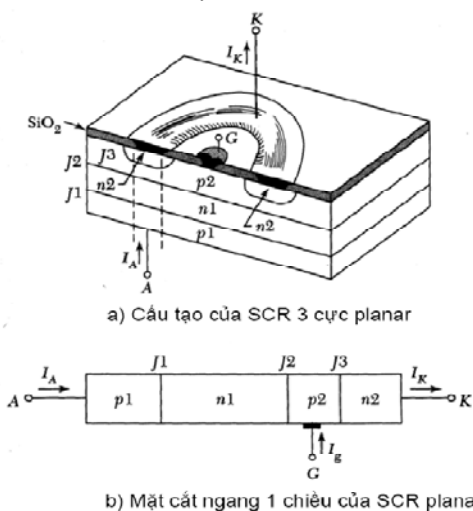


o **SCR (Silicon Controlled Rectifier)**

Cấu tạo của SCR

Ký hiệu

Đặc tuyến dòng-áp của SCR



Khi dòng cổng  $I_G$  tăng thì điện áp chuyển  $V_{BF}$  giảm

## Chương 7. MOSFET

MOSFET có cách lý giữa cổng và kênh dẫn bằng lớp cách điện, thành phần cơ bản là kim loại (M=Metal), lớp cách điện SiO<sub>2</sub> (O=Oxide), và bán dẫn (S=semiconductor).

Các tên gọi khác của MOSFET là MISFET (Metal-Insulator-Semiconductor), IGFET (Insulated Gate FET). Nguyên tắc hoạt động của FET là dòng hạt dẫn từ nguồn điện máng được điều khiển bằng điện áp cổng hay điện trường cổng. Điện trường này làm cảm ứng điện tích trong bán dẫn ở giao tiếp bán dẫn-oxide.

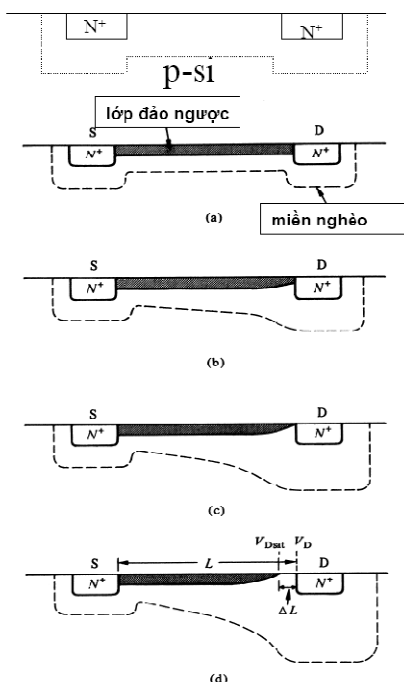
### • Cấu trúc của MOSFET

| MOSFET loại giàu<br>(còn gọi là MOSFET kênh dẫn chưa lấp sẵn)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | MOSFET loại nghèo<br>(còn gọi là MOSFET kênh dẫn lấp sẵn)                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div data-bbox="124 465 375 616"> </div> <div data-bbox="100 672 438 840"> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kênh điện tử (loại N) được cảm ứng trong bán dẫn P do các điện tích dương ở cổng.</li> <li>Gọi tắt là N-EMOS (MOSFET loại giàu kênh N)</li> </ul> </div> <div data-bbox="507 454 774 616"> </div> <div data-bbox="459 672 798 840"> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kênh lỗ (loại P) được cảm ứng trong bán dẫn N do các điện tích âm ở cổng.</li> <li>Gọi tắt là P-EMOS (MOSFET loại giàu kênh P)</li> </ul> </div> | <div data-bbox="885 465 1220 716"> <p>N-DMOS</p> </div> <div data-bbox="1300 526 1436 716"> <p>N-DMOS</p> </div> <div data-bbox="885 750 1220 996"> <p>P-DMOS</p> </div> <div data-bbox="1316 806 1460 996"> <p>P-DMOS</p> </div> |

Ký hiệu của EMOS:

| N-EMOS                                | P-EMOS                                |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <p>n ← p<br/>IEEE standard symbol</p> | <p>n ← p<br/>IEEE standard symbol</p> |

### • Mô tả định tính hoạt động của N-EMOS



$0 < V_G < V_{TN}$ ;  $V_{DS}$  nhỏ hoặc lớn  
không có kênh dẫn, không dòng điện  
( $V_{TN}$  = điện áp ngưỡng MOS kênh N)

$V_G > V_{TN}$ ;  $V_{DS} \approx 0$   
 $I_D$  tăng theo  $V_{DS}$

$V_G > V_{TN}$ ;  $V_{DS}$  nhỏ,  $> 0$   
 $I_D$  tăng theo  $V_{DS}$ , nhưng tốc độ tăng bị giảm

$V_G > V_{TN}$ ;  $V_{DS} \approx$  nghẹt (pinch-off)  
 $I_D$  đạt đến giá trị bão hòa,  $I_{D,sat}$   
Giá trị  $V_{DS}$  được gọi là  $V_{DS,sat}$

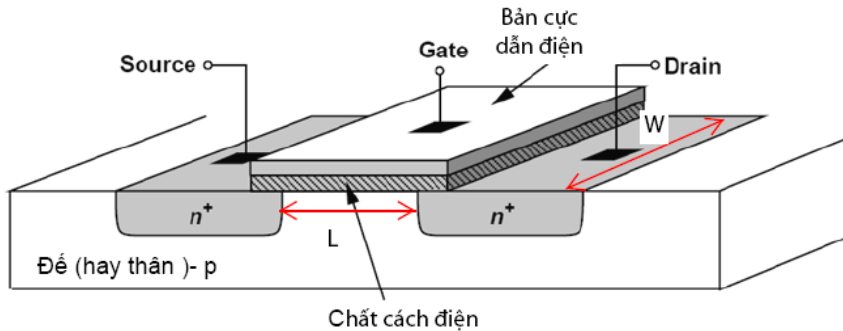
$V_G > V_{TN}$ ;  $V_{DS} > V_{DS,sat}$   
 $I_D$  không tăng nữa, miền bão hòa.

- **Các chế độ phân cực cho tụ MOS trong N-EMOS**

Có 3 chế độ phân cực quan trọng cho tụ MOS:

- o **Tích lũy lỗ** (Hole Accumulation): khi phân cực âm giữa kim loại và bán dẫn ( $V_{GS} < V_{FB} < 0$ ,  $V_{FB}$  là điện áp dải phẳng), tại giao tiếp giữa bán dẫn và cách điện sẽ có tích lũy lỗ.
- o **Nghèo** (Depletion): khi phân cực dương giữa kim loại và bán dẫn ( $V_{FB} < V_{GS} < V_{TN}$ ,  $V_{TN} > 0$ ), tại giao tiếp giữa bán dẫn và cách điện sẽ các lỗ bị đẩy xuống dưới hình thành miền nghèo.
- o **Đảo ngược** (Inversion): khi phân cực dương giá trị đủ lớn giữa kim loại và bán dẫn ( $V_{GS} > V_{TN}$ ), các điện tử được hút vào miền gần giao tiếp giữa bán dẫn và chất cách điện, do đó hình thành nên kênh dẫn điện tử (kênh N) trong bán dẫn P.

- **Cấu trúc N-EMOS**



**Ký hiệu mạch**



Vật liệu dùng cho bản cực dẫn điện thường dùng Silicon đa tinh thể được pha tạp chất rất nhiều (còn được gọi là polysilicon hay polySi hay poly). Vật liệu cách điện thông thường là  $\text{SiO}_2$ . Để tối thiểu hóa dòng điện giữa miền thân và miền S(source)/D(drain) người ta thường nối miền thân với cực nguồn.

- **Sự tạo thành kênh dẫn trong N-EMOS**

| Sự tạo thành kênh dẫn N | Sự ảnh hưởng của chiều dài kênh dẫn L và chiều rộng kênh dẫn W                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MOSFET được gọi là MOSFET kênh ngắn khi <math>L &lt; 1\mu\text{m}</math>, trong IC người ta thường dùng MOSFET kênh ngắn.</li> <li>• MOSFET được gọi là MOSFET kênh dài khi <math>L &gt; 1\mu\text{m}</math></li> </ul> |

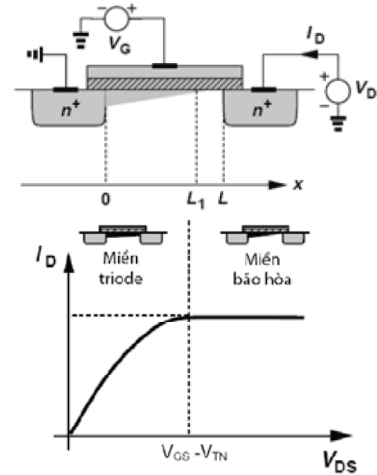
- **Các miền hoạt động của N-EMOS với  $V_{GS} > V_{TN}$**

| Miền tuyến tính (miền Ohm hay miền triode)<br>( $V_{DS} < V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TN}$ ) | Miền bão hòa (hay miền tích cực)<br>( $V_{DS} \geq V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TN}$ )                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ở cạnh miền bão hòa <math>V_{DS} = V_{DS,sat}</math></li> </ul> |

Khi  $V_{DS}$  nhỏ (có thể hoán đổi D và S) thì có thể xem như điện trở được điều khiển bằng áp ( $V_{GS3} > V_{GS2} > V_{GS1} > V_{TN}$ )

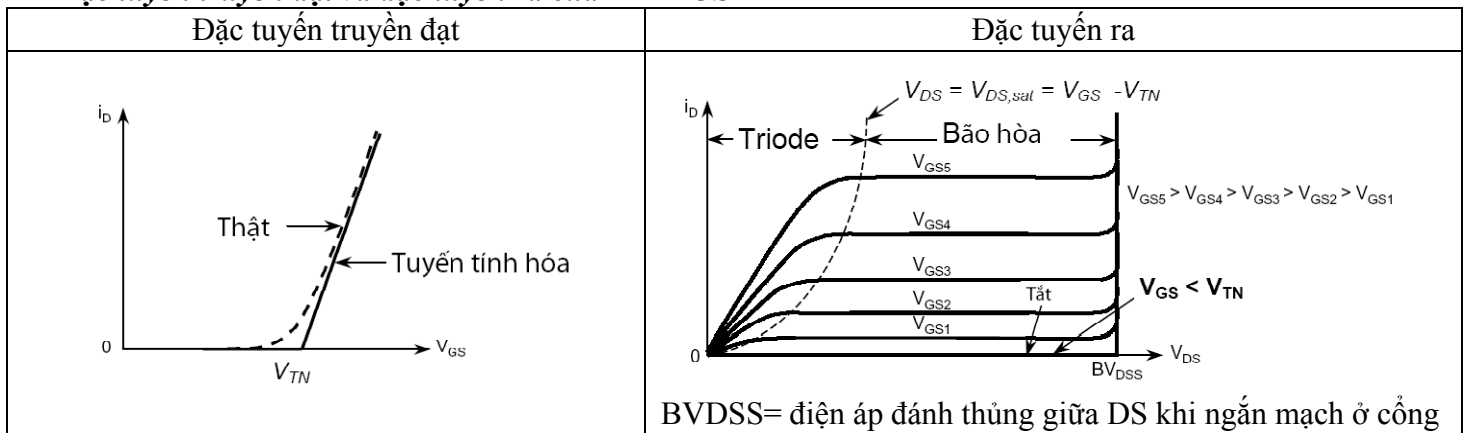
$$R_{ON} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})}$$

- Ở miền bão hòa  $V_{DS} \geq V_{DS,sat}$



Khi  $V_{DS}$  tăng, điểm nghẹt di chuyển về phía cực nguồn

### • Đặc tuyến truyền đạt và đặc tuyến ra của N-EMOS



### Các phương trình dòng điện máng $I_D$ trong N-EMOS

- $V_{GS} \leq V_{TN}$ : miền tắt  $\Rightarrow I_D = 0$
- $V_{GS} > V_{TN}$ : ( $V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TN}$ )
  - $0 < V_{DS} < V_{DS,sat}$ : miền tuyến tính (còn gọi là miền Ohm, miền điện trở hay miền triode)

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_{TN}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

với  $\mu_n$  là độ linh động điện tử và  $C_{ox}$  là điện dung lớp cách điện trên 1 đơn vị diện tích.  
 Nếu  $|V_{DS}| \ll 2(V_{GS} - V_{TN})$  thì  $I_D$  là hàm tuyến tính theo  $V_{DS}$ : (có thể hoán đổi D và S)

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN}) V_{DS}$$

Khi đó MOSFET tương đương với điện trở  $R_{DS}$  ( $R_{ON}$  hay  $R_{DS,ON}$ ):  $R_{DS} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})}$

- $V_{DS} \geq V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TN}$ : miền bão hòa (còn gọi là miền tích cực) với  $I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})^2$

Người ta thường ứng dụng miền tắt và tuyến tính cho MOSFET làm khóa điện tử, và miền bão hòa cho MOSFET làm phần tử khuếch đại tín hiệu hoặc làm nguồn dòng.

### • Một số đặc tính không lý tưởng của MOSFET (Xét N-EMOS ở miền bão hòa)

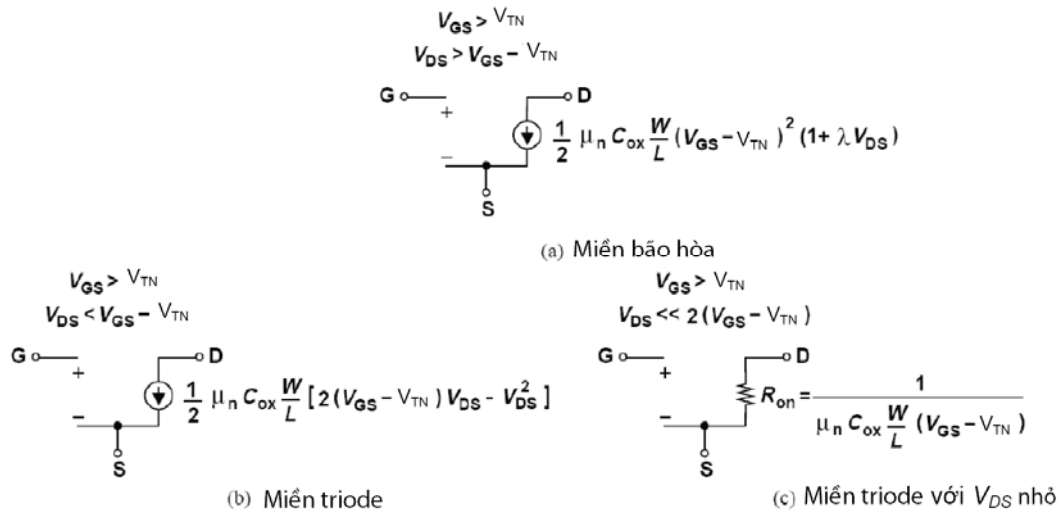
- Điều chế chiều dài kênh dẫn: tương tự hiệu ứng Early trong BJT, khi tăng  $V_{DS}$  thì điểm nghẹt dịch chuyển về miền nguồn, dẫn đến chiều dài kênh dẫn hiệu dụng nhỏ hơn hay dòng  $I_D$  tăng lên. Khi đó phương trình dòng điện máng có dạng

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \text{ với } \lambda = \frac{1}{V_A} \text{ và } V_A \text{ là điện áp Early}$$

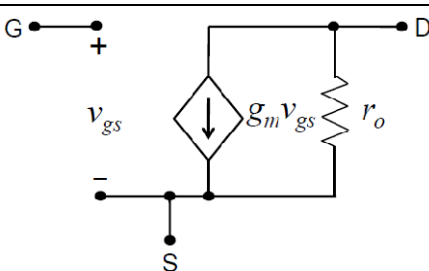
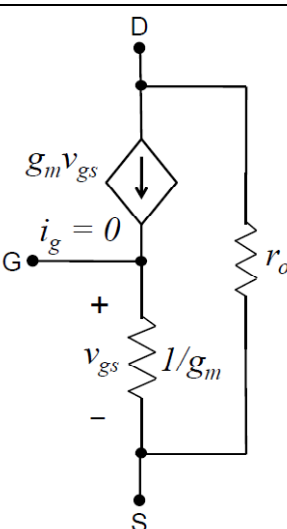
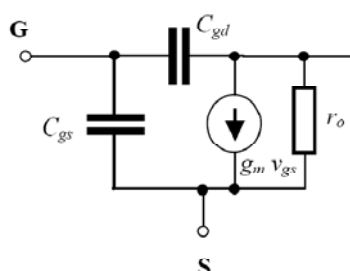
- Hiệu ứng thân: khi tăng  $V_{SB}$  làm điện áp ngưỡng  $V_{TN}$  tăng  $\Rightarrow$  ảnh hưởng đặc tuyến I-V.

- o Ảnh hưởng của nhiệt độ: khi T tăng  $\Rightarrow V_{TN}$  và độ linh động giảm  $\Rightarrow$  dòng  $I_D$  giảm
- o Sự bão hòa vận tốc: khi kích thước transistor giảm, độ dày lớp oxide mỏng hơn  $\Rightarrow$  vận tốc điện tử bão hòa và lúc phương trình dòng  $I_D$ :  $I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})^\alpha$  với  $\alpha=1 \rightarrow 2$ , tùy theo công nghệ.

• **Mô hình tín hiệu lớn của N-EMOS** (dùng để phân tích tổng quát hay tính điểm tĩnh)



• **Mô hình tín hiệu nhỏ của N-EMOS** (khi N-EMOS làm việc ở miền bão hòa và  $|v_{gs}| < 0.2(V_{GS} - V_{TN})$ )

| Mô hình $\pi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Mô hình T                                                                          | Tần số cao                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Hỗ dẫn <math>g_m</math>:</p> $g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right _Q = \frac{i_d}{v_{gs}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TN})$ <p>Điện trở ra <math>r_o</math>:</p> $r_o = \left. \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \right _Q = \frac{v_{ds}}{i_d} = \frac{V_A + V_{DSQ}}{I_{DQ}} \approx \frac{V_A}{I_{DQ}}$ |  |  <p>Tần số cắt <math>f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}</math></p> |

- o Các cách mắc MOSFET: CS, CD và CG.
- o Các ứng dụng tiêu biểu của MOSFET là khóa analog, điện trở được điều khiển bằng áp, nguồn dòng và phân tử khuếch đại tín hiệu trong mạch khuếch đại.

• **Tóm tắt quan hệ dòng-áp của MOSFET**

| NMOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | PMOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Miền tắt</b> (<math>V_{GS} \leq V_{TN}</math>): <math>I_D = 0</math></p> <p><b>Miền triode</b> (<math>V_{GS} &gt; V_{TN}</math> và <math>0 \leq V_{DS} &lt; V_{DS,sat}</math>)</p> $I_D = K_n \left[ (V_{GS} - V_{TN}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \text{ với } K_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$ <p><b>Miền bão hòa</b> (<math>V_{GS} &gt; V_{TN}</math> và <math>V_{DS} \geq V_{DS,sat}</math>)</p> $I_D = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2$ $g_m = K_n (V_{GSQ} - V_{TN}) = \sqrt{2K_n I_{DQ}}$ <p>Điểm chuyển tiếp <math>V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TN}</math></p> <p>Loại giàu: <math>V_{TN} &gt; 0</math></p> <p>Loại nghèo: <math>V_{TN} &lt; 0</math></p> | <p><b>Miền tắt</b> (<math>V_{GS} \geq V_{TP}</math>): <math>I_D = 0</math></p> <p><b>Miền triode</b> (<math>V_{GS} &lt; V_{TP}</math> và <math>0 \geq V_{DS} &gt; V_{DS,sat}</math>)</p> $I_D = K_p \left[ (V_{GS} - V_{TP}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \text{ với } K_p = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L}$ <p><b>Miền bão hòa</b> (<math>V_{GS} &lt; V_{TP}</math> và <math>V_{DS} \leq V_{DS,sat}</math>)</p> $I_D = \frac{K_p}{2} (V_{GS} - V_{TP})^2$ $g_m = -K_p (V_{GSQ} - V_{TP}) = \sqrt{2K_p I_{DQ}}$ <p>Điểm chuyển tiếp <math>V_{DS,sat} = V_{GS} - V_{TP}</math></p> <p>Loại giàu: <math>V_{TP} &lt; 0</math></p> <p>Loại nghèo: <math>V_{TP} &gt; 0</math></p> |