

# **CHƯƠNG 1**

## **NỘI PN**

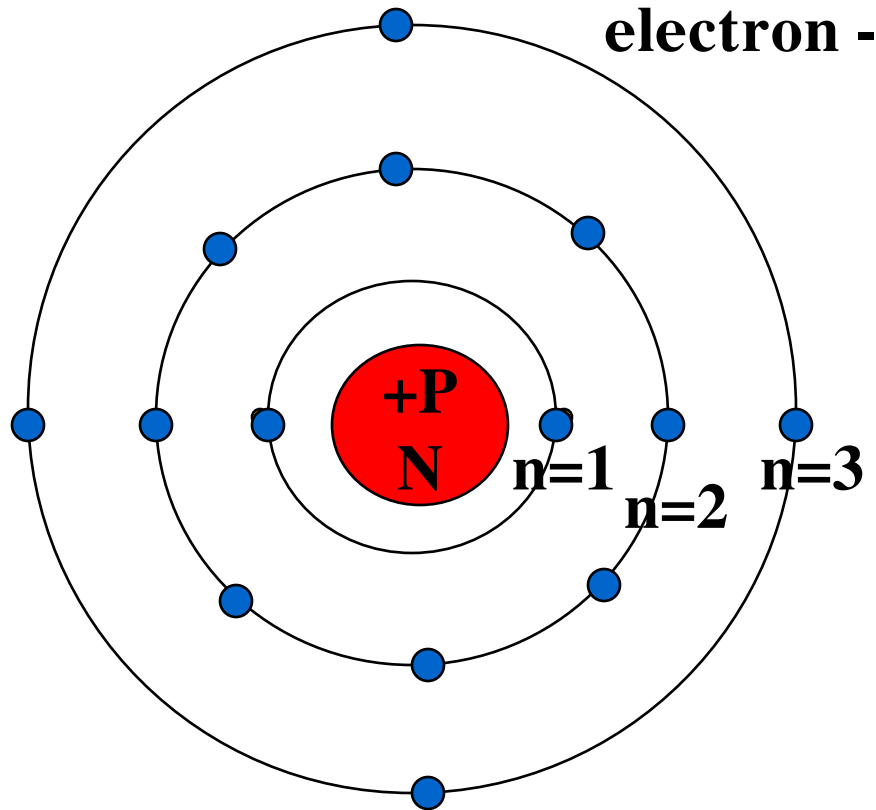
# Chương 1. Nối pn

## I. Chất bán dẫn

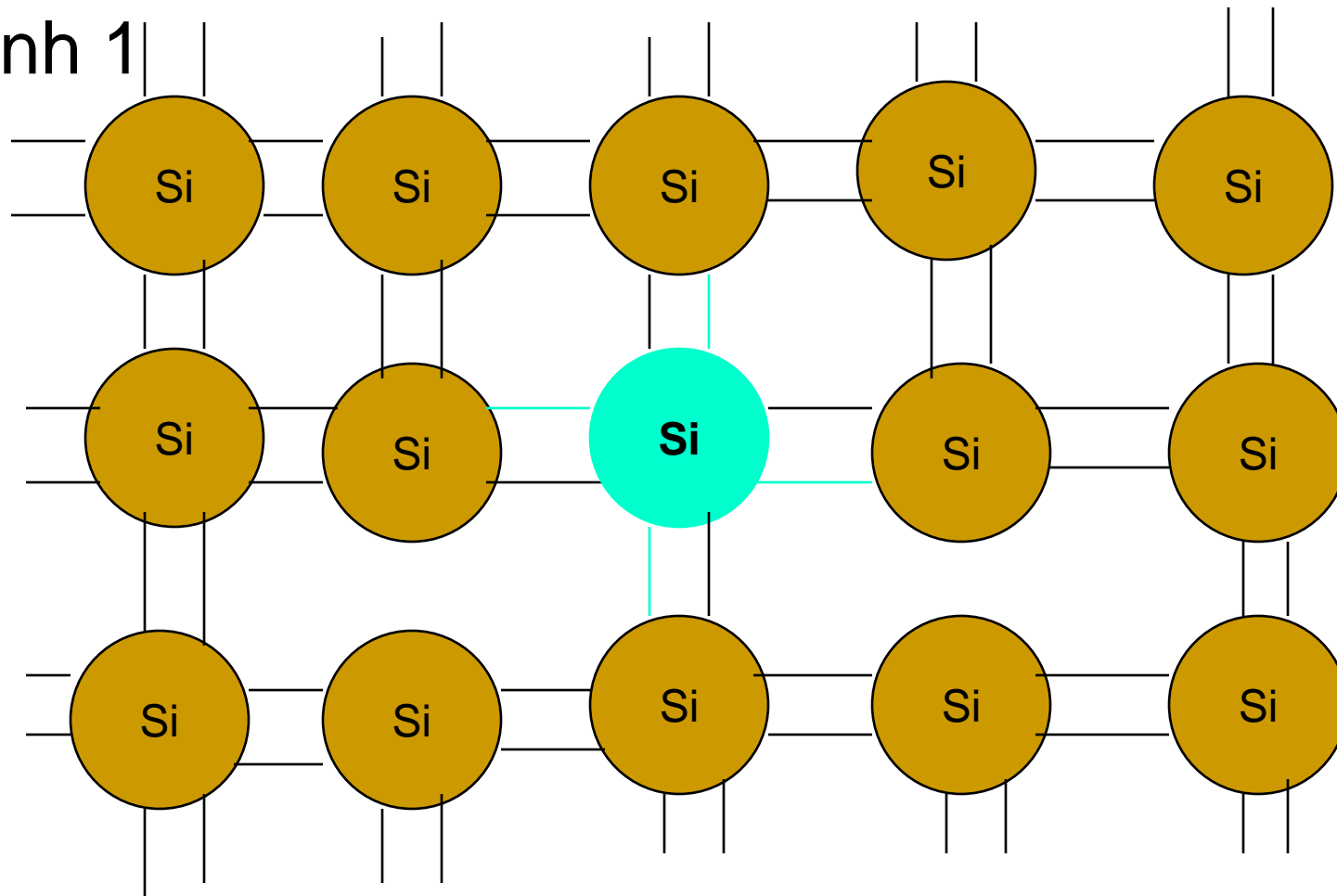
### 1.2. Chất bán dẫn thuần

- Xem chất bán dẫn no với số điện tử vòng ngoài cùng  $2n^2$  .
- Các nguyên tử Si(14), Ge (32) có 4 điện tử vòng ngoài cùng, nên tương đối bền.
- Tinh thể Si ( hoặc Ge) do các nguyên tử gần nhau có liên kết cộng hoá trị, nên mỗi nguyên tử Si xem như có 8 điện tử vòng ngoài cùng nên khá bền, không có trao đổi điện tử với chung quanh, nên xem như không dẫn điện.

# Mẫu nguyên tử $\text{Si}_{14}$ (theo BOHR)



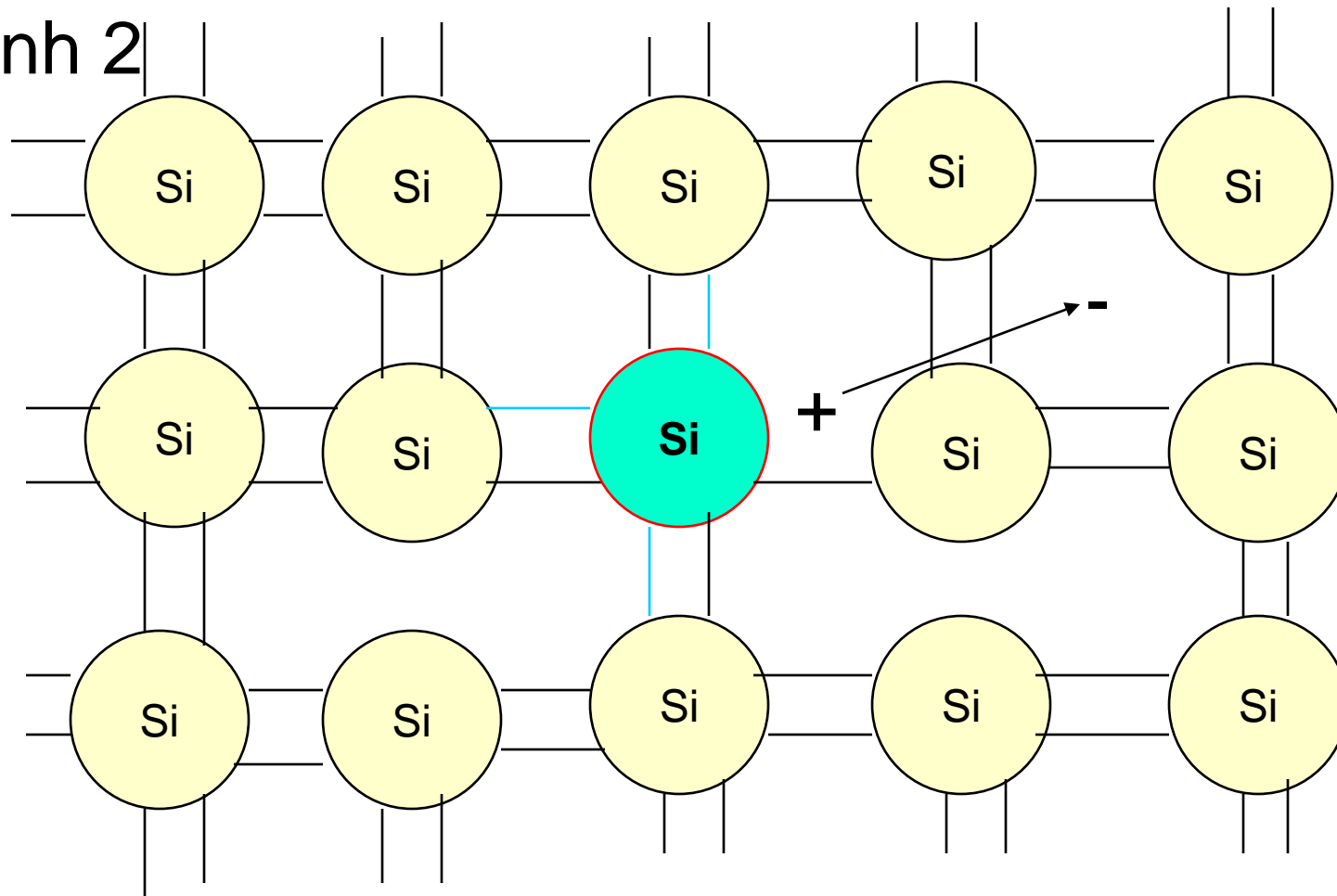
Hình 1



Có cấu tạo bền

- Tuy nhiên, dưới tác dụng nhiệt (hoặc ánh sáng, điện trường...), một số điện tử nhận được năng lượng đủ lớn hơn năng lượng liên kết cộng hoá trị ( năng lượng ion hoá 1.12 eV đối với Si và 0,6 eV đối với Ge) nên có thể bứt khỏi sự ràng buộc nói trên để trở thành điện tử tự do và dễ dàng di chuyển trong mạng tinh thể → Si trở nên dẫn điện.
- Khi có 1 điện tử rời khỏi vị trí sẽ để lại tại đó một lỗ trống mang điện tích dương → các lỗ trống di chuyển **ngược chiều** với điện tử tự do.
- Hiện tượng trên được gọi là hiện tượng sinh tạo nhiệt cặp **điện tử tự do – lỗ trống**.

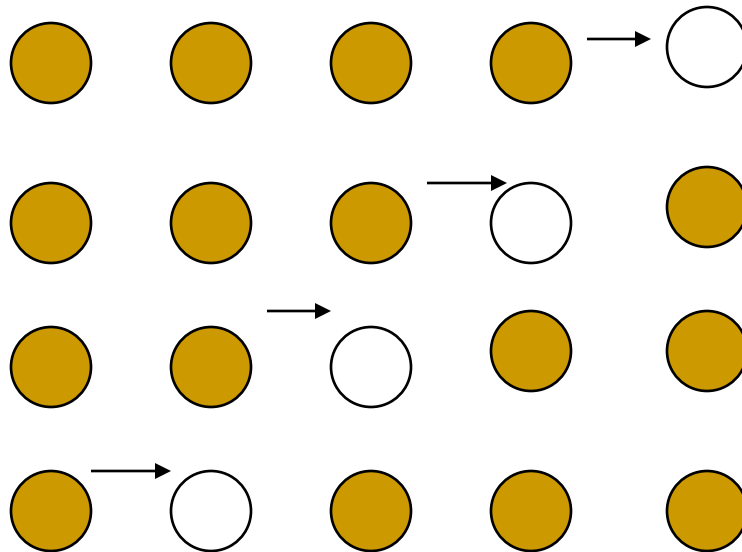
Hình 2



- Sinh tạo cặp điện tử tự do - lỗ trống

# ■ Hình vẽ sau đây diễn tả hình ảnh nói trên

chiều di chuyển của điện tử tự do



←  
chiều di chuyển của lỗ trống

- Khi có 1 điện tử đến chiếm chỗ lỗ trống làm trung hoà về điện tích và tái tạo lại nối liên kết cộng hoá trị được gọi là **hiện tượng tái hợp** cặp điện tử tự do – lỗ trống.
- Ở nhiệt độ cố định ta có sự cân bằng giữa hiện tượng sinh tạo và tái hợp cặp điện tử tự do -lỗ trống, hay:

$$n_i = p_i \quad \text{và} \quad n_i p_i = n_i^2$$

với:

$n_i$  mật độ điện tử tự do trong chất bán dẫn thuần  
 $p_i$  mật độ lỗ trống trong chất bán dẫn thuần.



■ Lý thuyết bán dẫn cho :

$$n_i^2 = A T^3 \exp(-q E_g / kT)$$

trong đó:

A là hằng số tùy thuộc chất bán dẫn

T nhiệt độ tuyệt đối (Kelvin) °K bằng t°C + 273°C

E<sub>g</sub> năng lượng cần thiết để bẻ gãy nối cộng hoá trị

eV = 1,6. 10<sup>-19</sup> J

k hằng số Boltzman = 1,38.10<sup>-23</sup>J/°K=8,8510<sup>-5</sup>eV/°K

q=1,6.10<sup>-19</sup>C, điện tích của điện tử .

**Ở 300°K,       $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3$  ( Si)  
                      $= 2,5 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3$  ( Ge)**

**nhưng rất nhỏ so với mật độ nguyên tử trong mạng tinh thể = 5.10<sup>22</sup>/cm<sup>3</sup>, nên chất bán dẫn thuần dẫn điện rất yếu.**

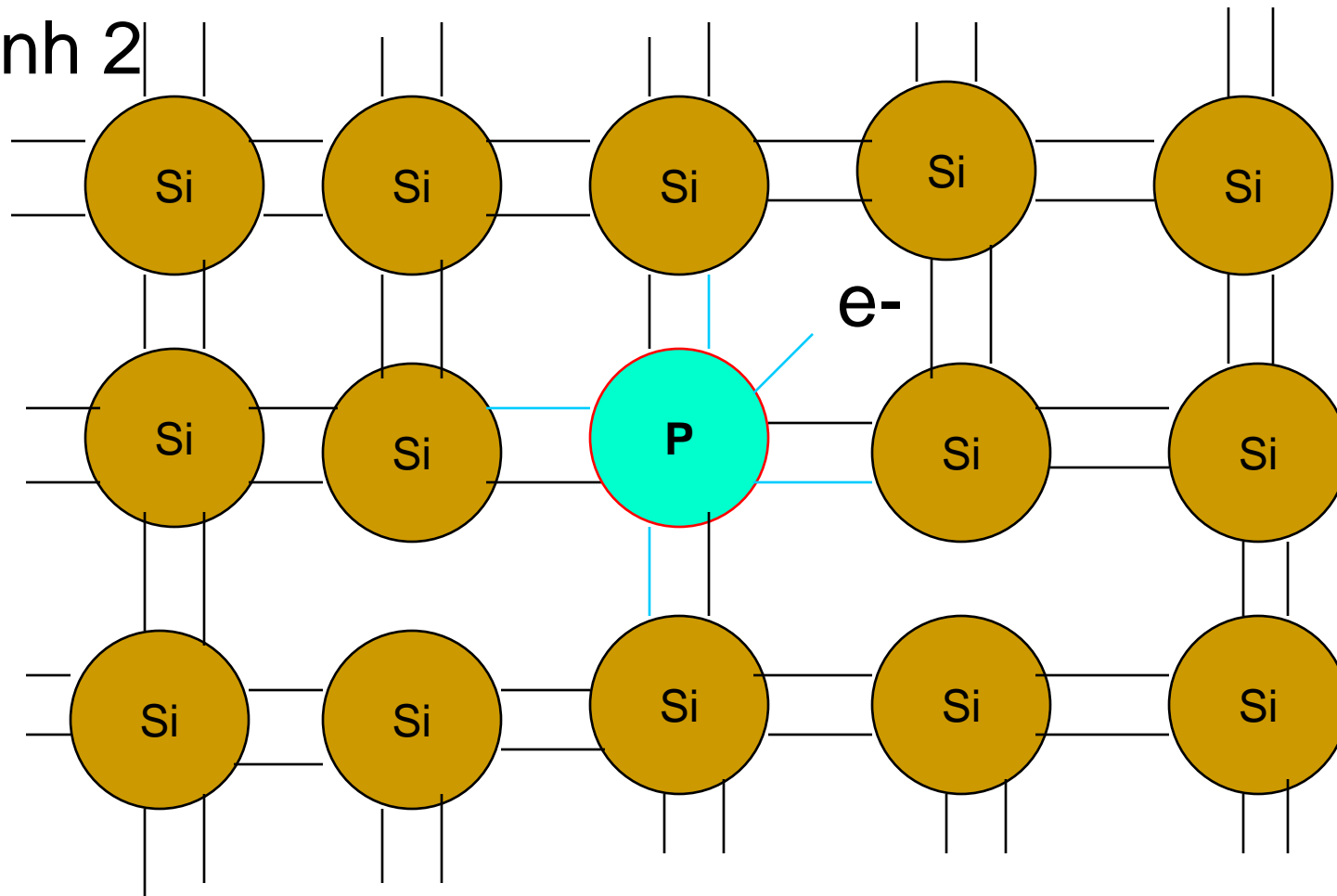
# Chất bán dẫn pha (dope)

## ■ 1. Chất bán dẫn loại n

Pha nguyên tử hoá trị 5 (  $P_{15}$  ) vào tinh thể Si:

- P sẽ dùng 4 điện tử vòng ngoài cùng để liên kết cộng hoá trị với 4 điện tử của 4 nguyên tử kế cận
- Còn lại 1 điện tử thứ 5 vì không liên kết nên dễ dàng di chuyển trong mạng tinh thể → điện tử tự do → dẫn điện.
- 1 nguyên tử P cho 1 điện tử tự do, Pha nhiều nguyên tử P cho nhiều điện tử tự do hơn → dòng điện càng mạnh .

Hình 2



■ Chất bán dẫn loại n

Ngoài ra, trong điều kiện nhiệt độ trong phòng, còn có sinh tạo nhiệt cặp điện tử – lỗ trống nhưng với nồng độ rất bé.

**Kết luận :** Chất bán dẫn loại n có:

Điện tử tự do là hạt tải đa số mật độ  $n_n$ ,

Lỗ trống là hạt tải thiểu số, mật độ  $p_n$ ,

Nguyên tử P là nguyên tử cho, mật độ  $N_D$ ,

Trong **điều kiện cân bằng nhiệt động** cho:

$$n_n = N_D + p_n = N_D.$$

Và:  $n_n \cdot p_n = n_i^2$

mật độ lỗ trống thiểu số trong chất bán dẫn loại n cho bởi:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D}$$

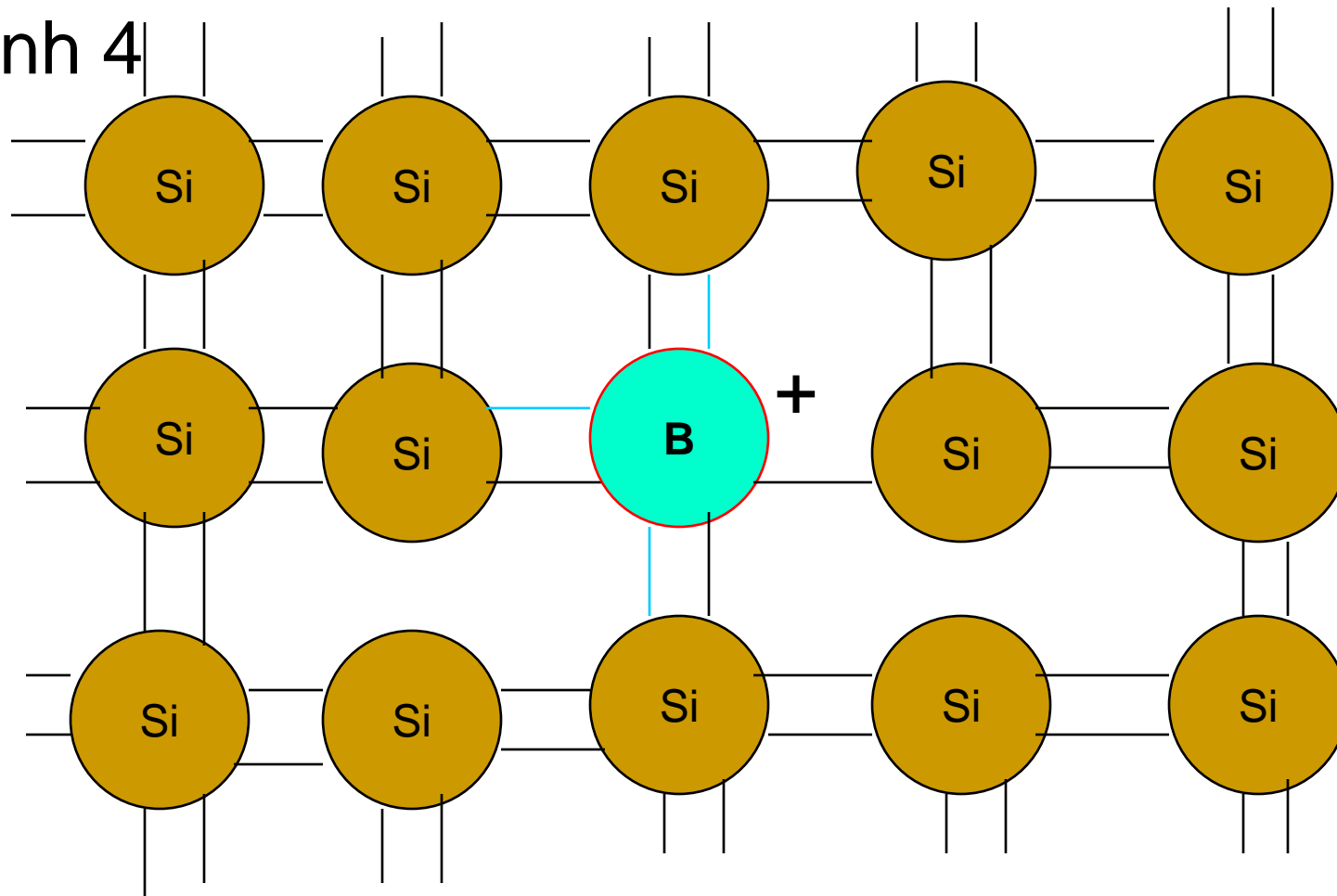
# Chất bán dẫn pha

## ■ 1. Chất bán dẫn loại p

Pha nguyên tử hoá trị 3(  $B_5$  )vào tinh thể Si:

- B sẽ dùng hết 3 điện tử vòng ngoài cùng để liên kết cộng hoá trị với 3 điện tử của 3 nguyên tử kế cận
- Còn lại 1 vị trí thiếu vì điện tử nên xem như có điện tích dương và các điện tử lân cận dễ đến tái kết với lỗ trống của B và để lại ở vị trí đó lỗ trống mới và hiện tượng trên cứ tiếp diễn → dẫn điện bằng lỗ trống.
- 1 nguyên tử B cho 1 lỗ trống, Pha nhiều nguyên tử B cho nhiều lỗ trống hơn → dòng điện càng mạnh .

Hình 4



■ Chất bán dẫn loại p

Ngoài ra, trong điều kiện nhiệt độ trong phòng, còn có sinh tạo nhiệt cặp điện tử – lỗ trống nhưng với nồng độ rất bé.

**Kết luận :** Chất bán dẫn loại p có:

Điện tử tự do là hạt tải thiểu số mật độ  $n_p$ ,

Lỗ trống là hạt tải đa số, mật độ  $p_p$ ,

Nguyên tử P là nguyên tử nhận, mật độ  $N_A$ ,

Trong điều kiện cân bằng nhiệt động cho:

$$p_p = N_A + n_p \approx N_A.$$

Và:

$$p_p \cdot n_p = n_i^2$$

mật độ điện tử tự do thiểu số trong chất bán dẫn loại p cho bởi:

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

## 4. Sự dẫn điện của chất bán dẫn

### ■ a. Dòng trôi

Dòng điện do các hạt tải chịu tác động của điện trường được gọi là dòng trôi.

Cường độ dòng điện là tổng số hạt tải điện di chuyển ngang qua tiết diện A với vận tốc  $v$ .

Mật độ dòng điện trong đơn vị thể tích cho bởi:

$$\mathbf{J} = Q\mathbf{v}$$

trong đó  $Q_n = nq$  (điện tử tự do)

$$Q_p = pq \text{ (lỗ trống)}$$

$$v_n = \mu_n \mathcal{E}$$

$$v_p = \mu_p \mathcal{E}$$



■ Mật độ dòng điện tổng cộng:

$$\begin{aligned} J &= J_n + J_p = q n \mu_n \xi + q p \mu_p \xi = \\ &= q (n \mu_n + p \mu_p) \xi \end{aligned}$$

■ Theo định luật Ohm ta còn có:

$$J = \sigma \xi$$

■ Suy ra điện dẫn suất:

$$\sigma = q (n \mu_n + p \mu_p)$$

và điện trở suất:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q (n \mu_n + p \mu_p)}$$

## b. Dòng khuếch tán

- Dòng khuếch tán là dòng do các hạt tải di chuyển từ nơi có mật độ cao sang nơi có mật độ thấp.
- Mật độ dòng khuếch tán cho bởi:

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{A/cm}^2) \quad (\text{lỗ trống})$$

$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{A/cm}^2) \quad (\text{điện tử})$$

Với  $D_p$  và  $D_n$  lần lượt là hệ số khuếch tán của lỗ trống và điện tử tự do cho bởi hệ thức Einstein:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = V_T$$

■ Và các hệ thức khác:

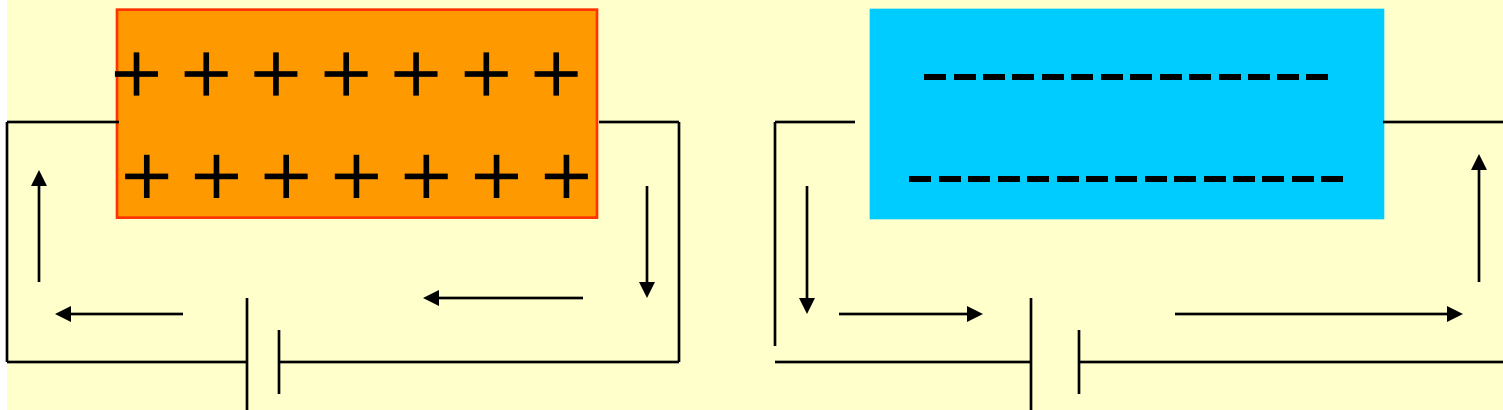
$$D_p \tau_p = L_p^2$$

$$D_n \tau_n = L_n^2$$

$L_p$  và  $L_n$  lần lượt là khoảng đường tự do trung bình của lỗ trống và điện tử tự do

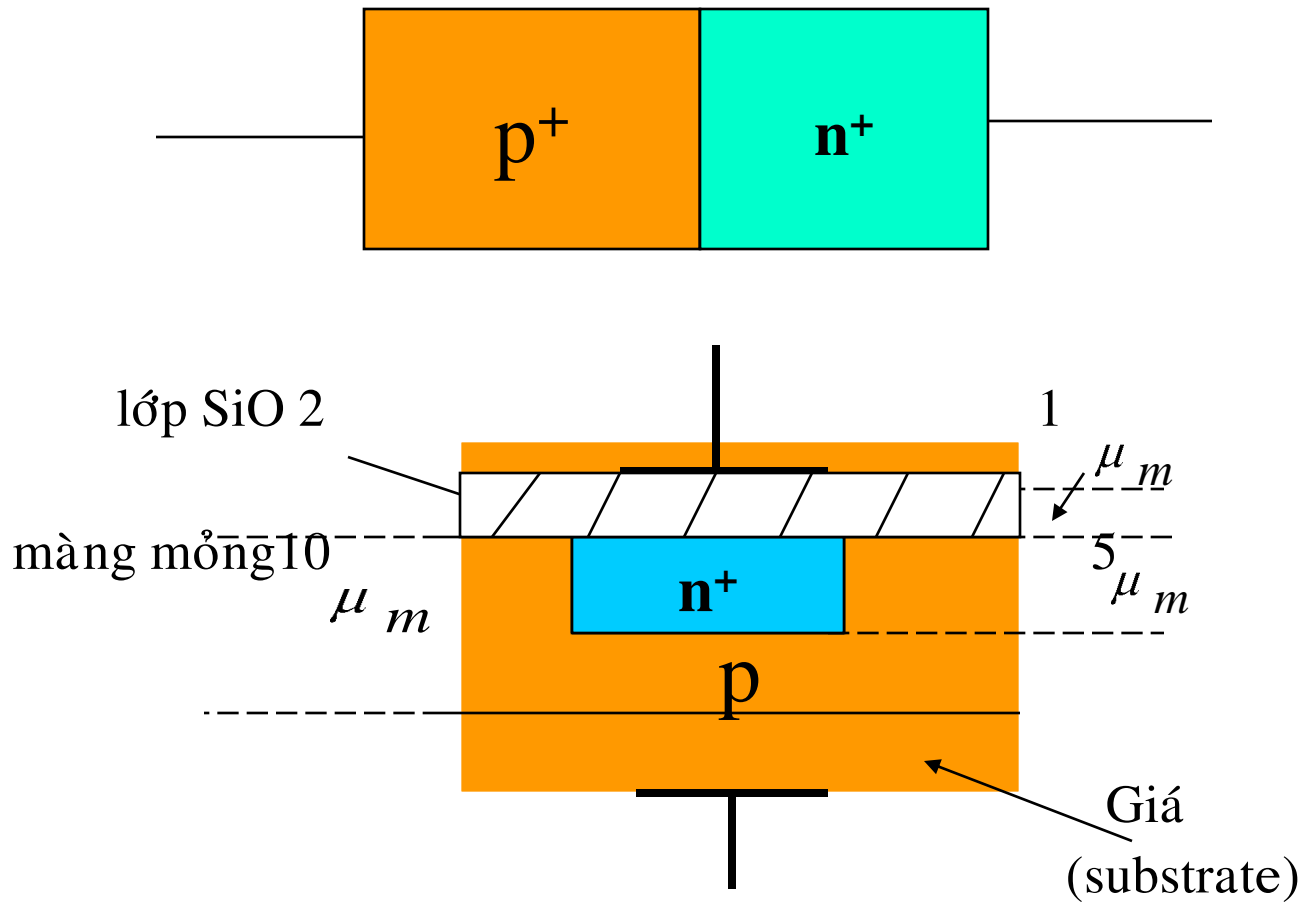
**Dòng điện tổng cộng** trong thanh bán dẫn là:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{tr} + \mathbf{J}_{kt}$$



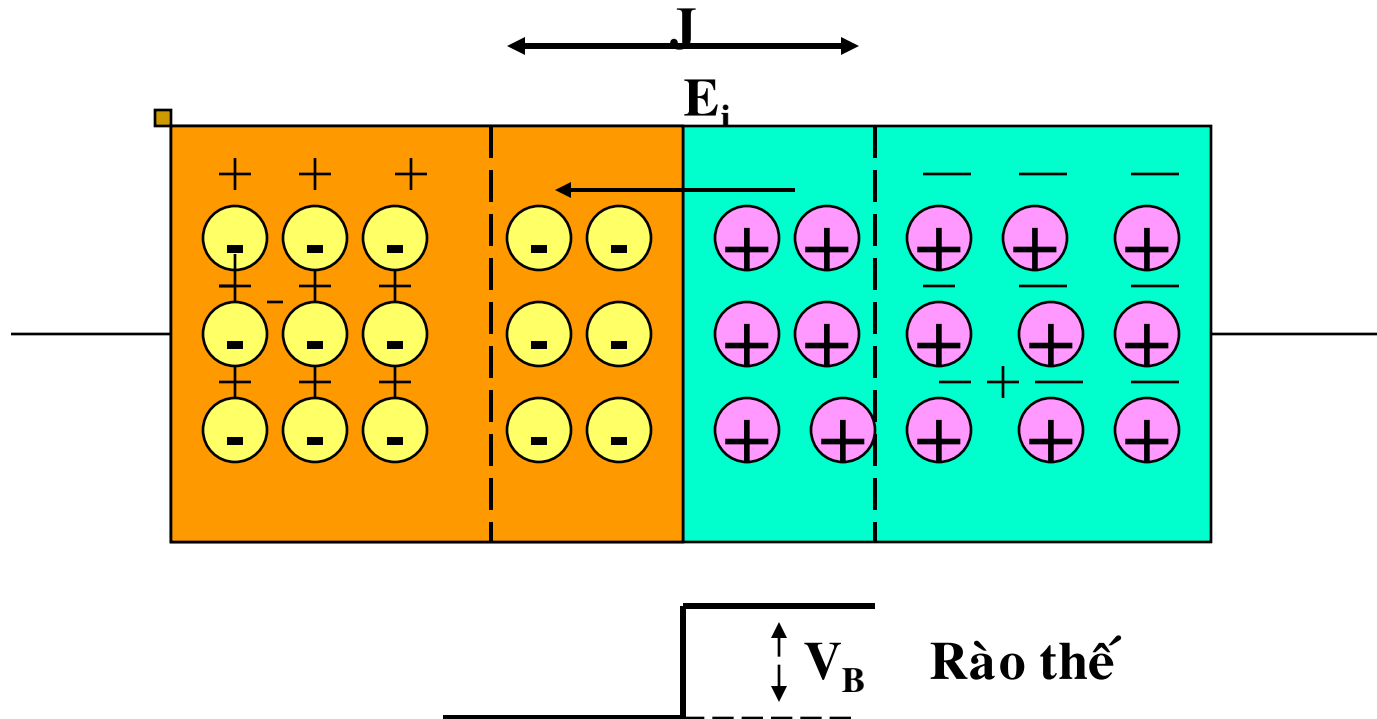
## II. Nối pn

### 1. Cấu tạo



## 2. Cân bằng nhiệt động

- Do các hạt tải khuếch tán và tái kết trong vùng gần nối  $\rightarrow$  **vùng hiếm** (vùng khiếm khuyết) hai bên nối ( vùng không còn hạt tải di động mà chỉ còn các ion cố định ). *Vùng hiếm*



- Khi  $J = J_r + J_{kt} = 0 \rightarrow$  cân bằng nhiệt động  $\rightarrow$
- **Điện trường nội** đạt trị nhất định  $E_i$  và **rào điện thế** cho bởi:

$$V_B = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

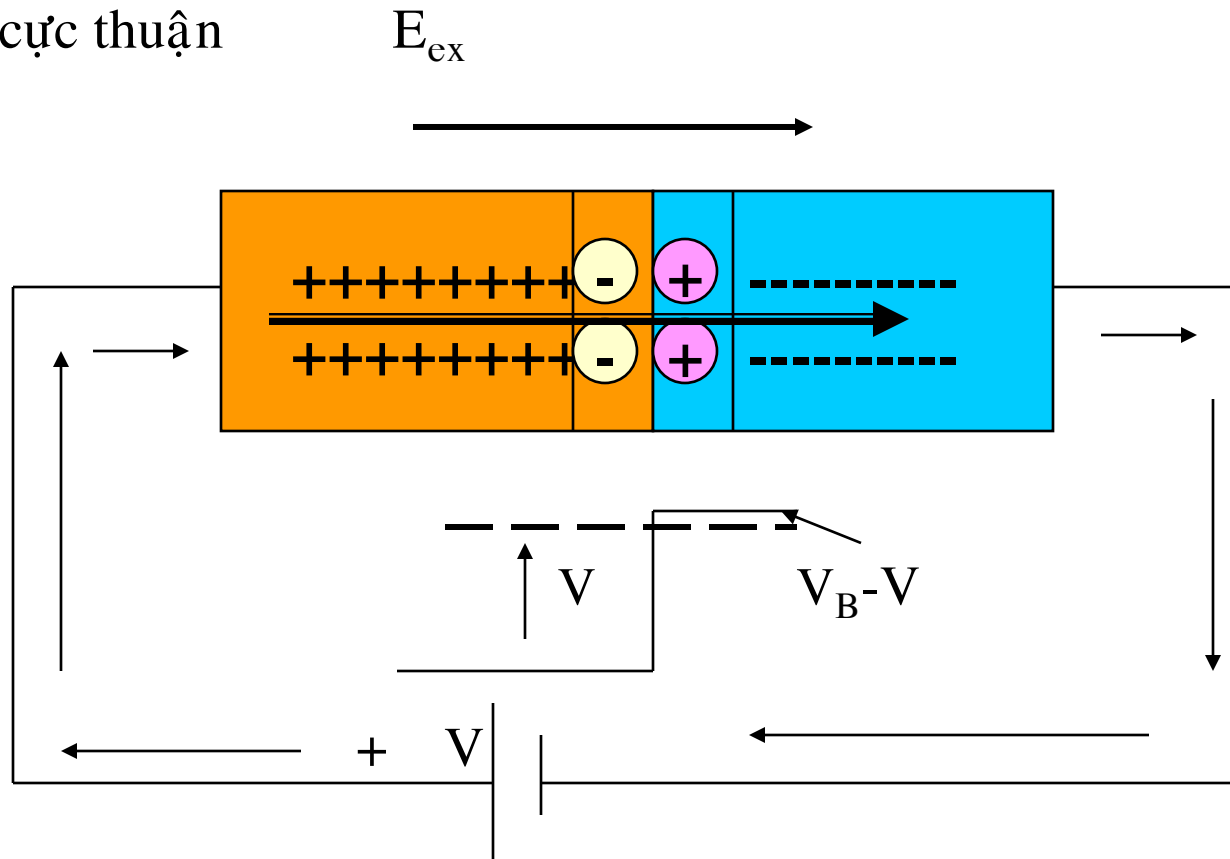
- Ở 300°K ,  $V_B = 0,7 \text{ V}$  (Si)  
 $= 0,3 \text{ V}$  (Ge)

Vậy nối pn không dẫn điện ( $I = 0$ ) khi chưa được cấp điện (phân cực)

- Muốn nối pn dẫn điện phải phân cực bằng nguồn cấp điện DC để làm giảm rào điện thế hay làm hẹp vùng hiếm.

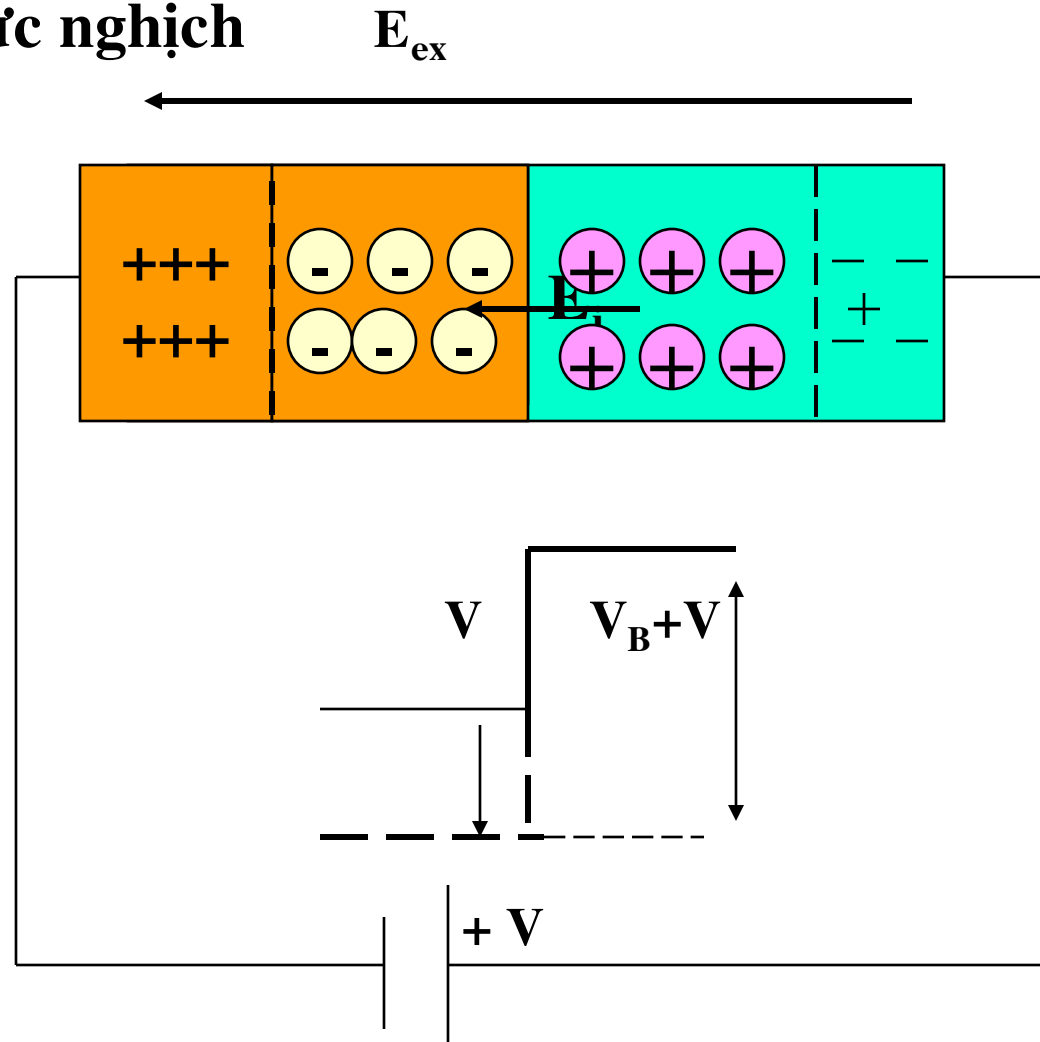
### 3. Phân cực nối pn

a. Phân cực thuận



Do tác động của điện trường ngoài, rào điện thế giảm ( $V_B - V$ ) rất bé, vùng hiếm giảm hoặc triệt tiêu  $\rightarrow$  nối pn dẫn điện với **dòng thuận  $I_F$**  khá lớn.

## b. Phân cực nghịch



Rào thế gia tăng ( $V_B + V$ ), vùng hiếm nở rộng  $\rightarrow$  gần như không có hạt tải di chuyển qua nối, nối pn ngưng dẫn ( $I = 0$ ).



- Thực ra, khi phân cực nghịch, có dòng hạt tải thiểu số dưới tác động của điện trường ngoài di chuyển qua nối → **dòng nghịch  $I_R$  rất bé** ( vài uA với Ge và vài nA với Si ).
- Dòng nghịch này còn gọi là **dòng rỉ** hay **dòng bảo hoà ngược  $I_s$**  ( vì các hạt tải thiểu số quá ít nên nhanh chóng di chuyển hết qua nối và đạt ngay trị số không đổi – bảo hoà ).

$$I_s = A q \left( \frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right) = A q \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) n_i^2$$

## c. Hiện tượng huỷ thác

- Tuy nhiên, khi phân cực nghịch với điện trường quá lớn, các nguyên tử trong vùng hiếm bị phá vỡ liên kết cộng hoá trị và do đó sẽ di chuyển ào ạt qua nối  $\rightarrow$  dòng nghịch quá lớn, trong khi điện thế không đổi (do điện trở quá bé) sẽ làm hư hỏng nối pn ( **huỷ thác** hay sụp đổ).
- **Huỷ thác Zener** : Khi  $V < 6$  v chỉ có sự phá vỡ liên kết cộng hoá trị .
- **Huỷ thác tuyết đổ**: Khi  $V > 6$  v ngoài sự phá vỡ liên kết cộng hoá trị còn có sự bức các điện tử ra khỏi cấu trúc của nó do sự **va chạm** giữa hạt tải có động năng lớn với các điện tử của nguyên tử.

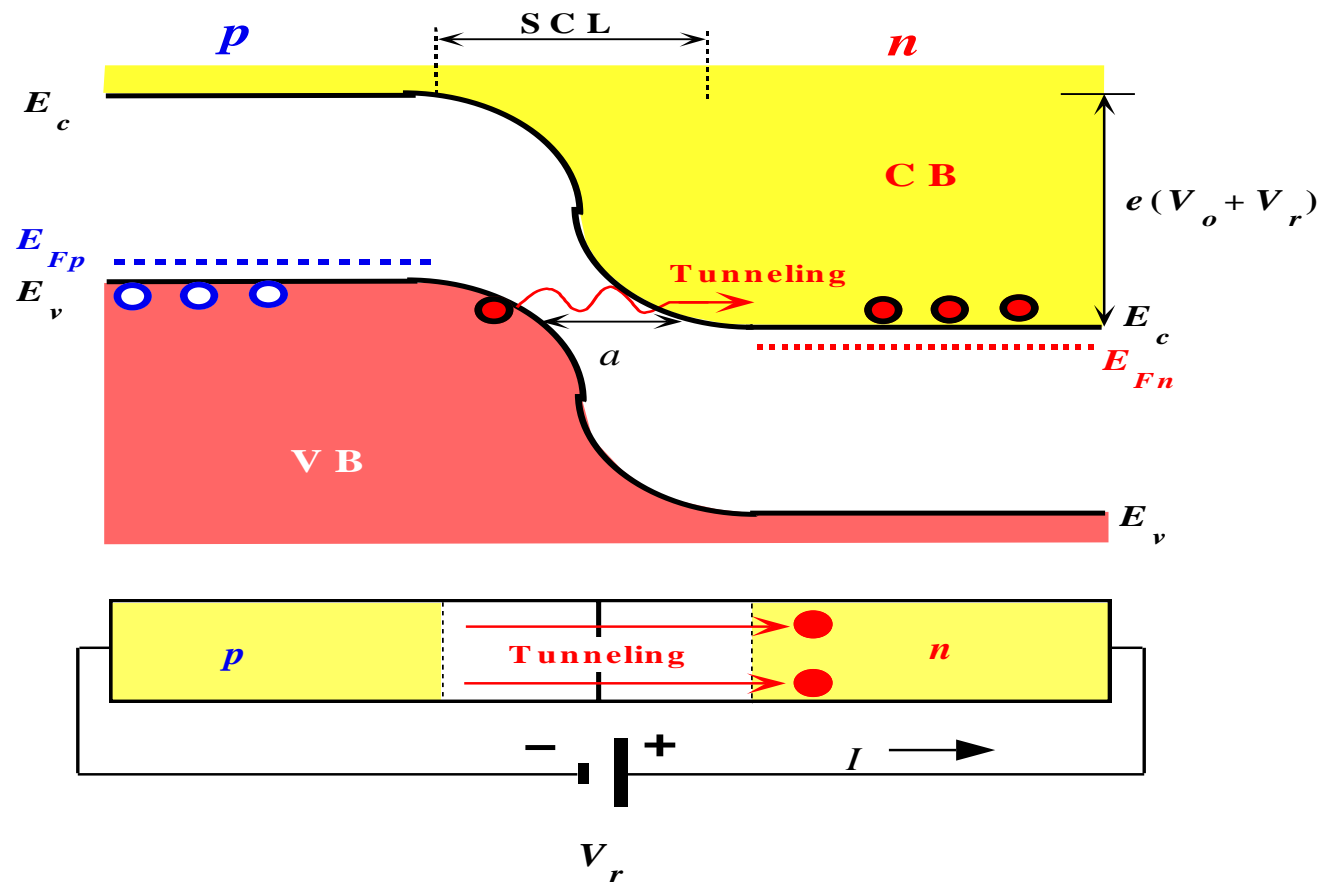


Fig. 6.18: Zener breakdown involves electrons tunneling from the VB of  $p$  side to the CB of  $n$ -side when the reverse bias reduces  $E_c$  to line up with  $E_v$ .

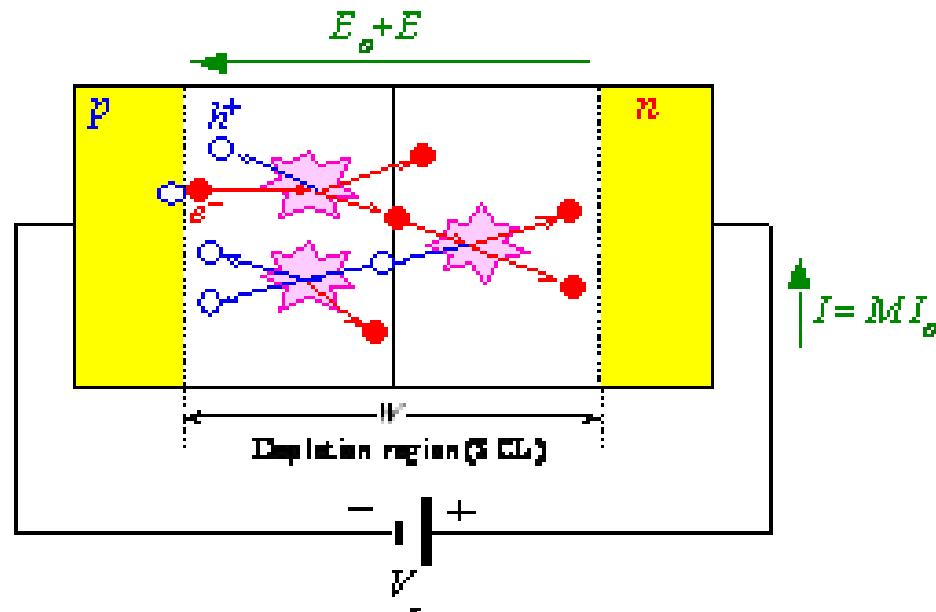


Fig.6.16: Avalanche breakdown by impact ionization.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, B.G. Kasper (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://www.mhhe.com/engbook>

# III. Đặc tính nối pn

## 1. Biểu thức dòng điện nối pn

Lý thuyết và thực nghiệm cho:

$$I_D = I_S \left[ \exp V / \eta V_T - 1 \right]$$

trong đó dòng bão hoà ngược cho bởi:

$$\begin{aligned} I_S &= A q \left\{ \frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n} \right\} = \\ &= A q \left\{ \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right\} n_i^2 \end{aligned}$$

Thường trong điều kiện dẫn điện lớn ta có:  $\eta = 1$

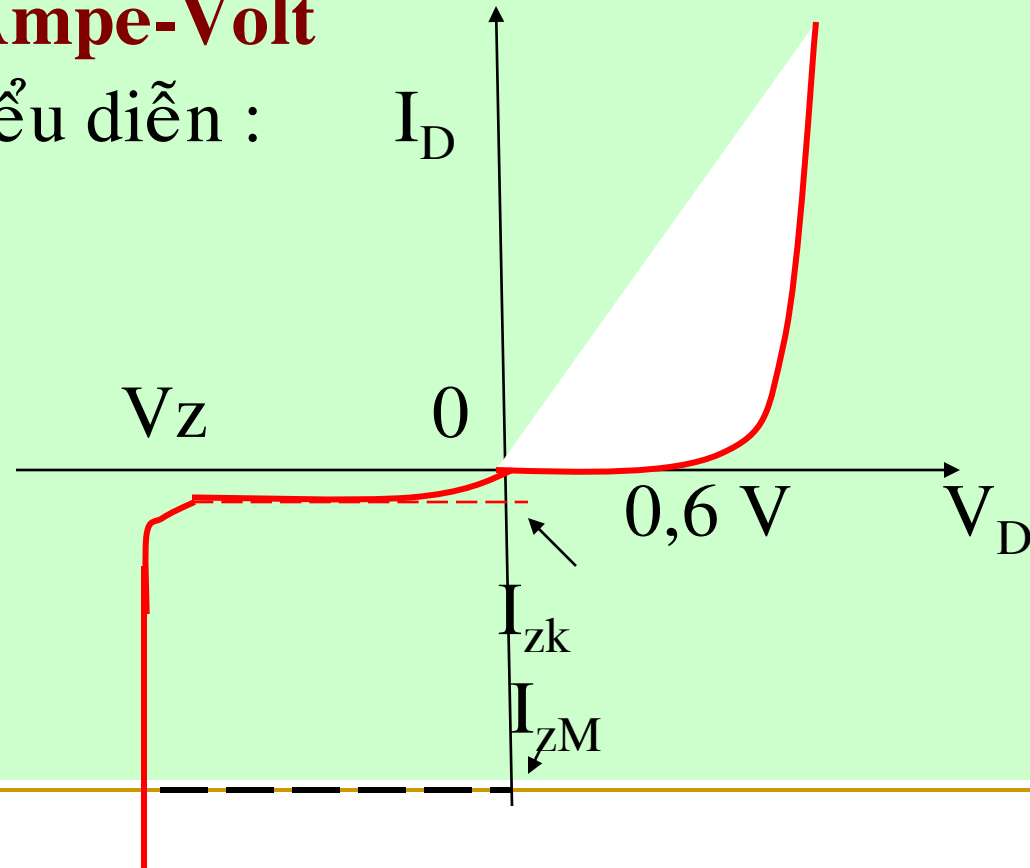
- Khi phân cực thuận :  $V > 4V_T \rightarrow \exp(V/V_T) \gg 1$  :  

$$I_D = I_F = I_s \exp(V/V_T) \quad \text{lớn}$$
- Khi phân cực nghịch:  $|V| \ll |4V_T| \rightarrow \exp(-V/V_T) \ll 1$ :  

$$I_D = I_R = -I_s$$

## 2. Đặc tuyến Ampe-Volt

Ta có đường biểu diễn :



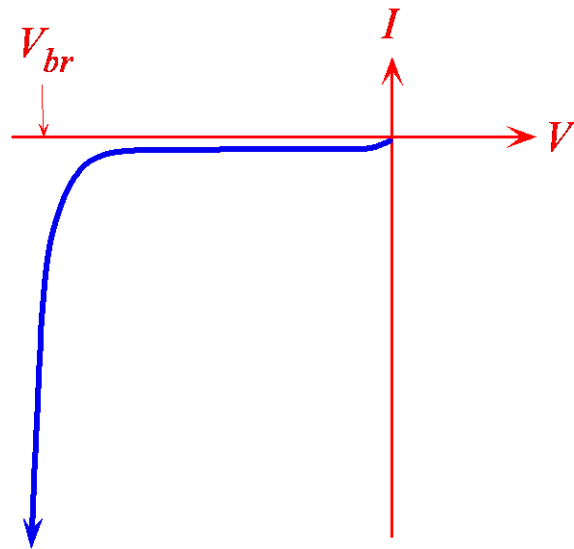
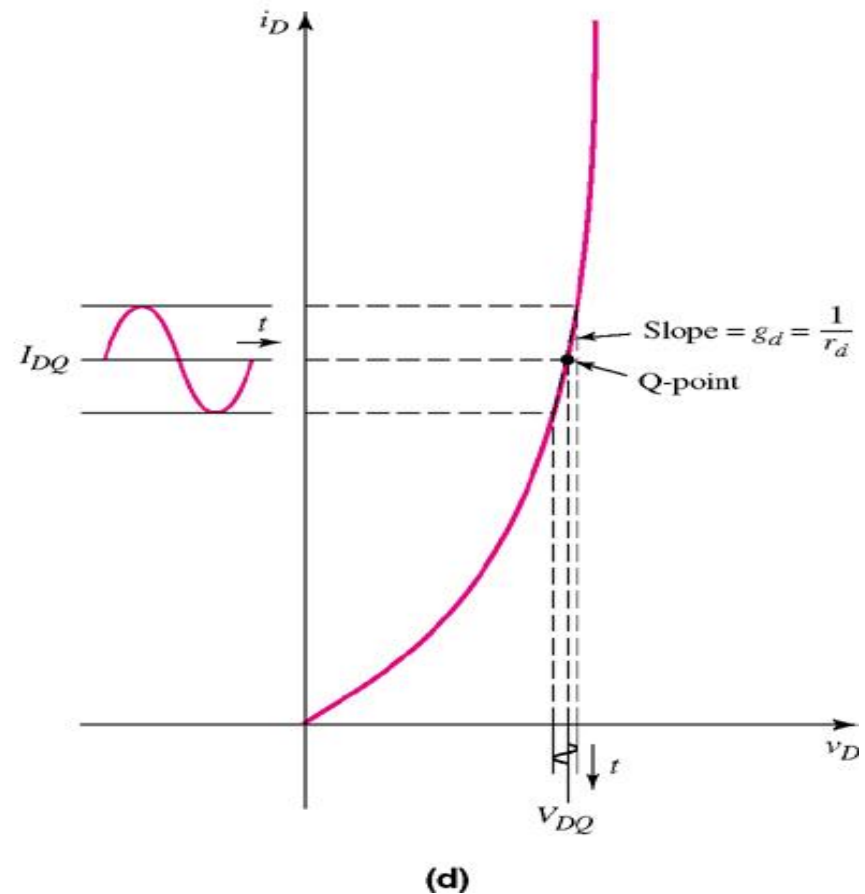
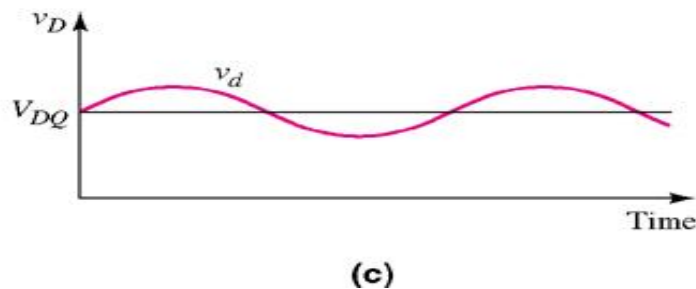
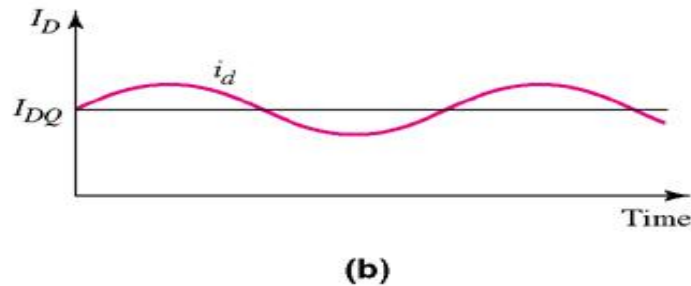
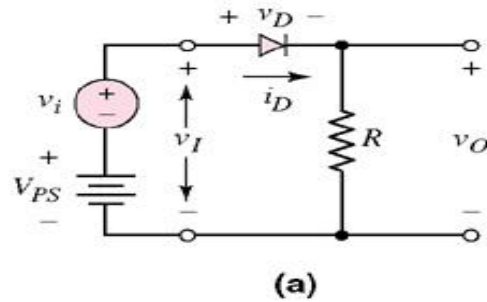


Fig.6.15: Reverse  $I$ - $V$  characteristics of a  $pn$  junction.

# Figure 1.51

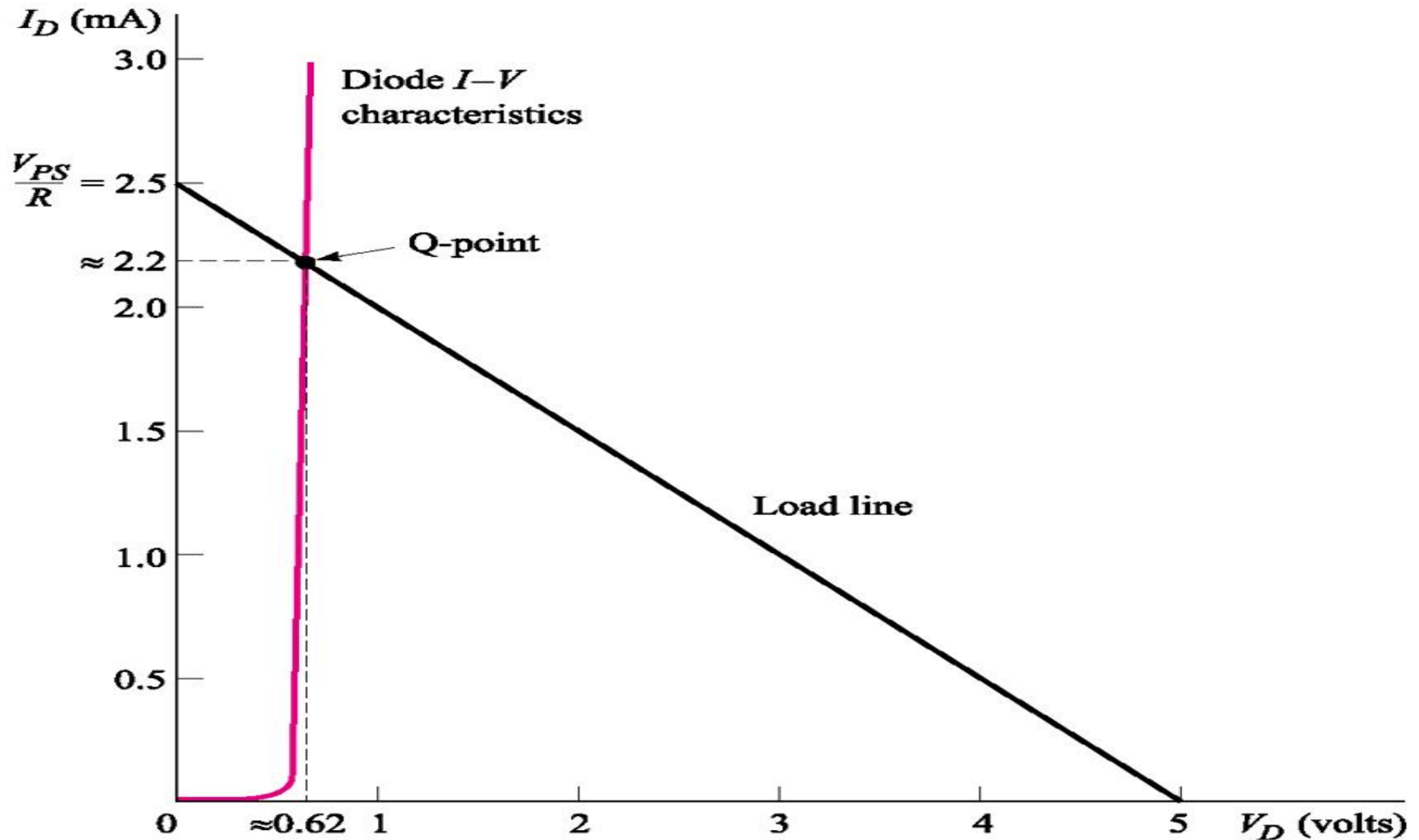
AC circuit analysis: (a) circuit with combined dc and sinusoidal input voltages, (b) sinusoidal diode current superimposed on the quiescent current, (c) sinusoidal diode voltage superimposed on the quiescent value, and (d) forward-biased diode  $I$ - $V$  characteristics with a sinusoidal current and voltage superimposed on the quiescent values





## Figure 1.23

The diode and load line characteristics for the circuit shown in  
Figure 1.24



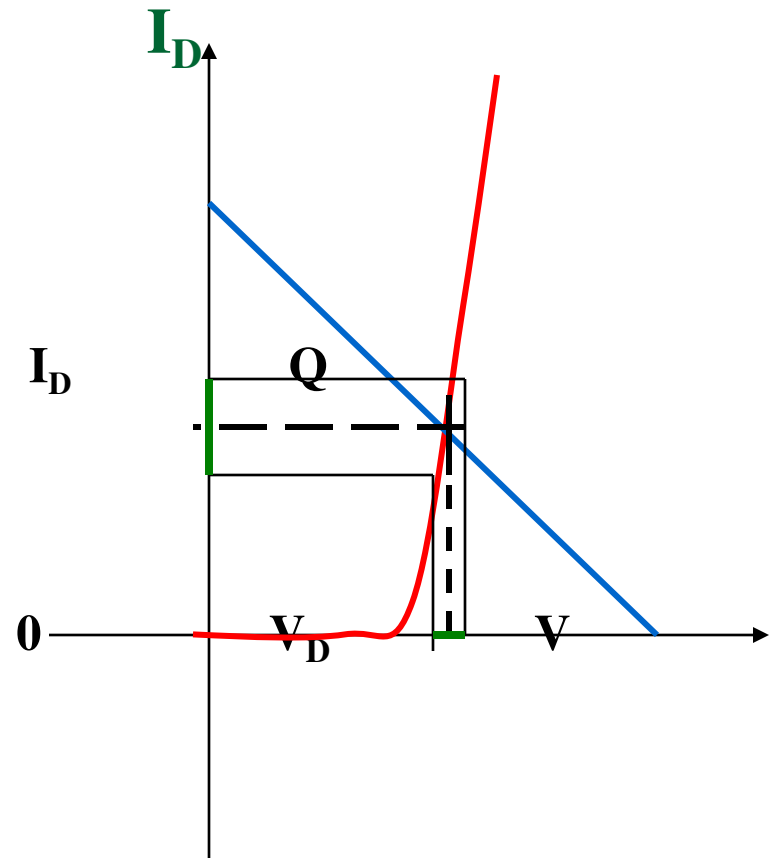
### 3. Điện trở nối pn

#### a. Điện trở tĩnh

$$R_D = \left. \frac{V_D}{I_D} \right|_Q$$

#### b. Điện trở động:

$$r_d = \left. \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \right|_Q = \left. \frac{dV_D}{dI_D} \right|_Q$$



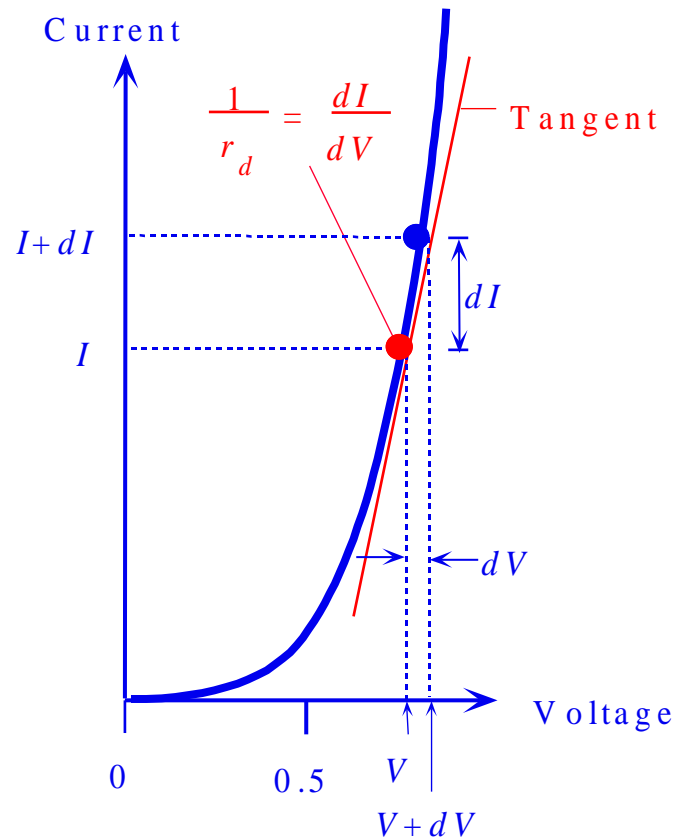


Fig. 6.14: The dynamic resistance of the diode is defined as  $dV/dI$  which is the inverse of the tangent at  $I$ .

- Thường thì do sự thay đổi nhỏ nên ta có:

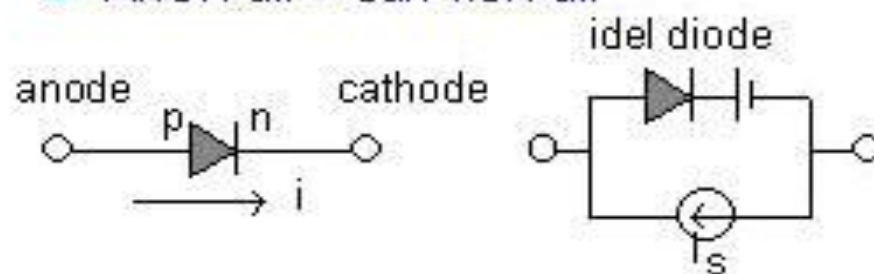
$$\begin{aligned}
 g_d &= \frac{1}{r_d} = \left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_Q = \frac{d}{dV_D} \left[ I_S \exp V_D / V_T - 1 \right] = \\
 &= \frac{1}{V_T} I_S \exp V_D / V_T = \left. \frac{I_D}{V_T} \right|_Q \Rightarrow \\
 r_d &= \left. \frac{V_T}{I_D} \right|_Q
 \end{aligned}$$

- Có trị thường rất bé ( vài Ohm – vài chục Ohm )  
xem như không đáng kể.

# Junction diode

## ■ Diode

- Symbol & Model
- Current flow in only one direction
- Arrow dir = curr flow dir



## ■ Rectifier

- Requires small rev-bias current & power loss at for-bias
- Band gap
  - Operation temperature &  $n_i$  (leakage current, BD voltage)
  - Contact potential & offset voltage  $E_o$  (turn-on voltage)

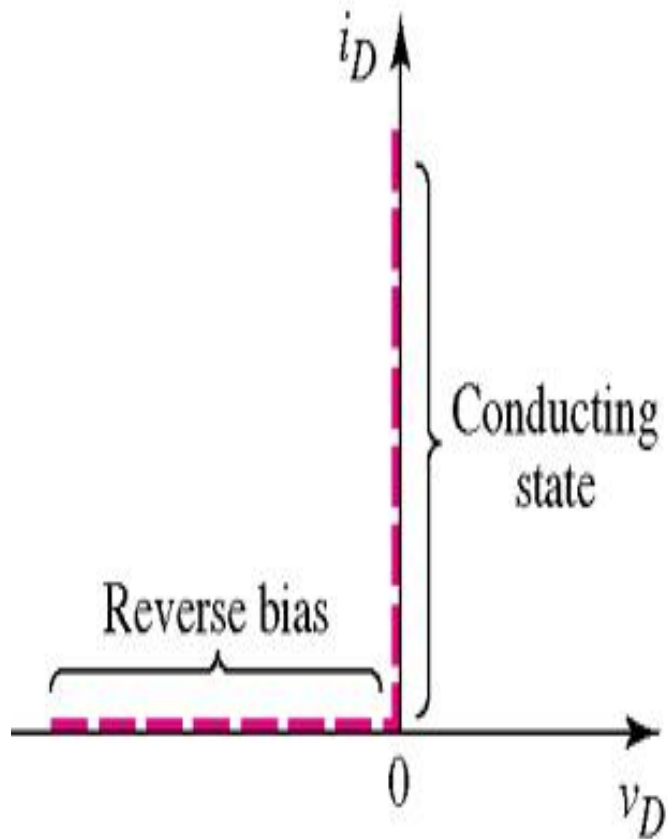
## • Doping concentration

- Avalanche BD voltage, contact potential, series resistance
- High-low junction ; lightly doped side determines the diode property
- $V_{BD}$  increase,  $R_o$  increase  $\rightarrow$  large area to reduce  $I^2R$  heating

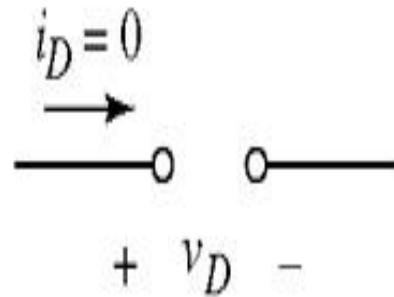
- Guard ring ; prevent edge breakdown (since higher conc, smaller breakdown voltage)
- Punch-through ; short lightly-doped region (thk smaller than BD jct width)

# Figure 1.22

**The ideal diode: (a)  $I$ - $V$  characteristics, (b) equivalent circuit under reverse bias, and (c) equivalent circuit in the conducting state**

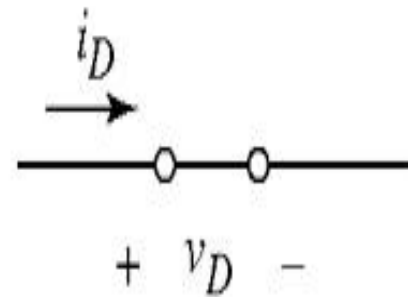


(a)



$$(v_D < 0, i_D = 0)$$

(b)

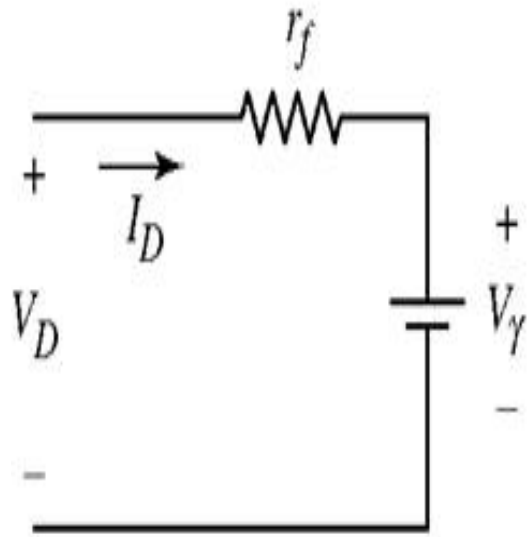


$$(i_D > 0, v_D = 0)$$

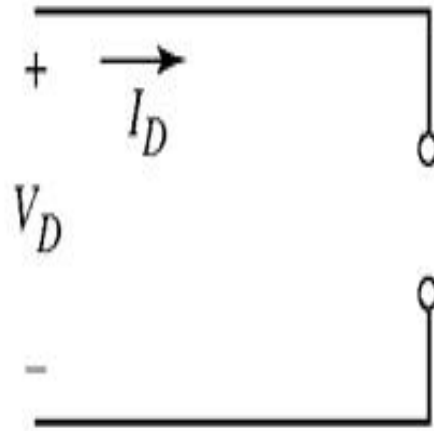
(c)

# Figure 1.27

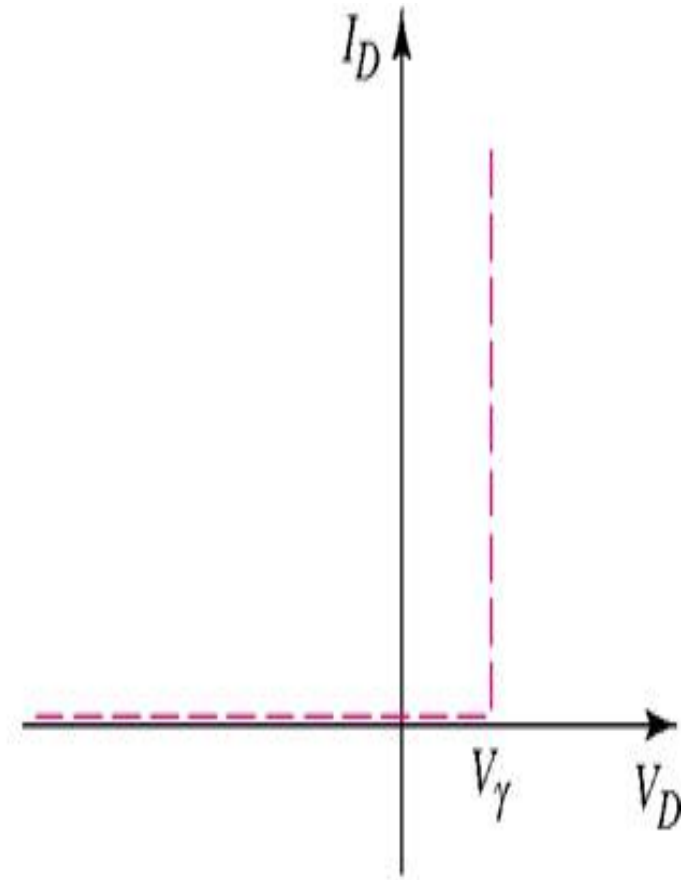
The diode equivalent circuit (a) in the “on” condition when  $V_D \geq V_\gamma$ , (b) in the “off” condition when  $V_D < V_\gamma$ , and (c) piecewise linear approximation when  $r_f = 0$



(a)



(b)



(c)

## 4. Điện dung nối pn

### a. Điện dung chuyển tiếp

Khi phân cực nghịch, vùng hiếm nở rộng và không có các hạt tải đi qua nên xem như cách điện ( **điện môi**). Trong khi đó, ở 2 vùng ngoài vùng hiếm có các hạt tải điện (**2 bản dẫn điện**) → **Tụ điện** có điện dung:

$$C_T = C_o \frac{A}{x_d} = C_o \frac{A}{W}$$

$$C_o = 11,7 \quad \epsilon_o (\text{Si})$$

$$C_o = 15,8 \quad \epsilon_o (\text{Ge})$$

$$\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$C_T$  có trị từ vài phần mười đến vài chục pF.



## b.Điện dung khuếch tán

Khi phân cực thuận do có sự khuếch tán của các hạt tải qua nối, và khi điện thế phân cực tăng lên một lượng  $dV$  thì có sự gia tăng một lượng  $dq_j \rightarrow$  Tụ điện có điện dung cho bởi:

$$C_D = \frac{dq_j}{dV}$$

$C_D$  có trị vài ngàn pF.

Ở tần số thấp  $X_C = 1/\omega C \rightarrow$  rất lớn, xem như tụ hở mạch.

Ở tần số cao  $X_C \rightarrow 0$  rất bé, xem như tụ nối tắt.

Vậy các tụ  $C_T$ ,  $C_D$  làm nối pn không hoạt động ở tần số cao.

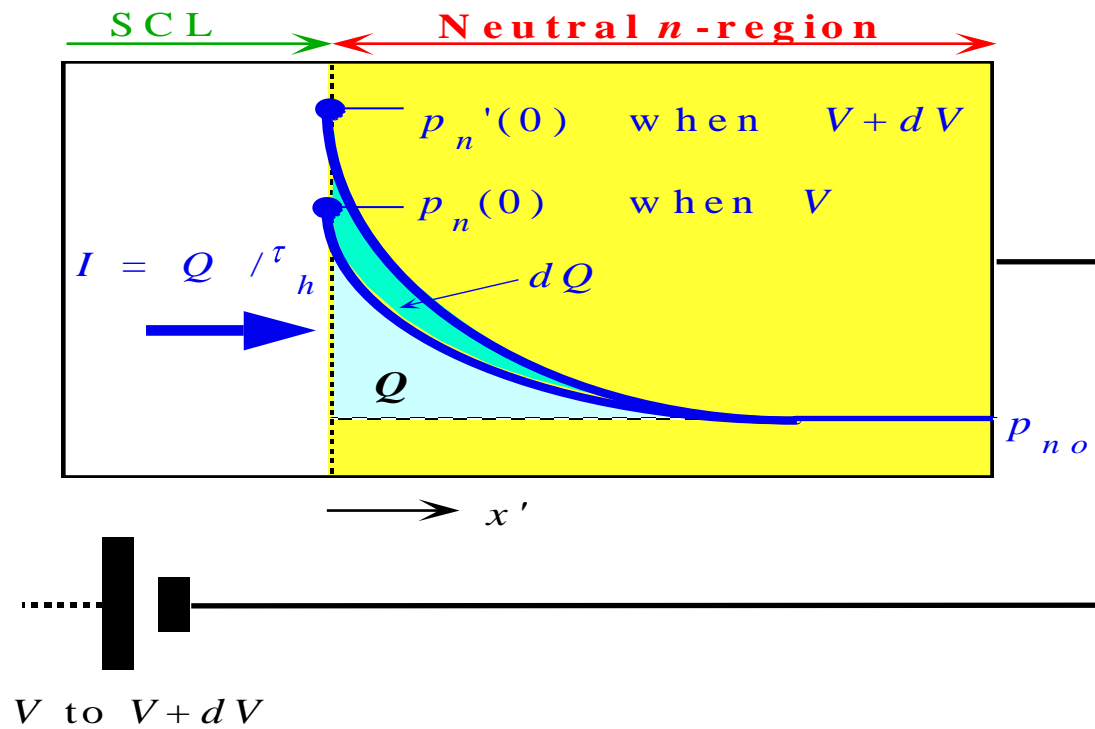
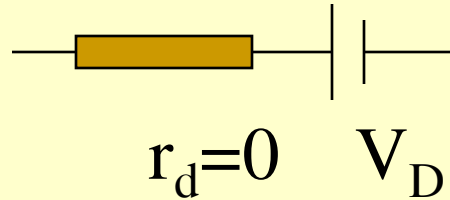


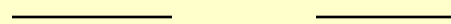
Fig. 6.13: Consider the injection of holes into the  $n$ -side during forward bias. Storage or diffusion capacitance arises because when the diode voltage increases from  $V$  to  $V + dV$  then more minority carriers are injected and more minority carrier charge is stored in the  $n$ -region.

# Mạch tương của nối pn

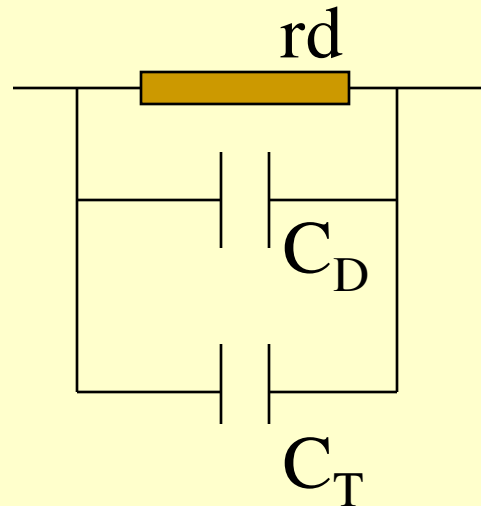
- Khi phân cực thuận



- Khi phân cực nghịch



- Mạch tương ở cao tần



# Junction Capacitance

- $n$ - $x$  plot from  $C$ - $V$  measurements
- Low frequency conductance

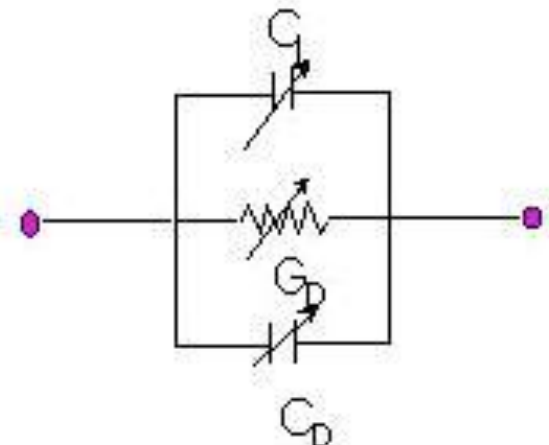
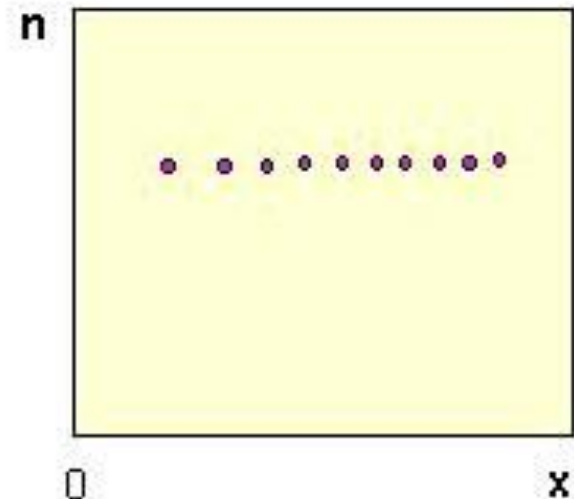
$$G_o = \frac{dI}{dV_a} = \frac{q}{kT}(I + I_o)$$

- Note that for reverse bias  $G_o \sim 0$
- The capacitance at rev bias is due to modulation of majority carriers

## ■ Forward bias :

- Built-up injected minority carriers near the junction modulate with the signal
- These *diffusion controlled carriers* respond not as rapid as the majority carriers

$$Y_D = G_D + j\omega C_D$$



# Junction Admittance

- pn junction equivalent circuit at small-signal

$$Y = G + j\omega C$$

$C$ : capacitance

$G$ : conductance

$Y$ : admittance

- Small signal : ac signal characterized by the frequency and amplitude  $v_{ac}$  with  $|v_{ac}| < kT/q$

