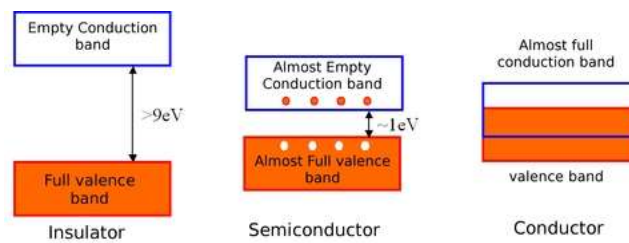


Bài 3

NỐI PN



1. Chất bán dẫn.

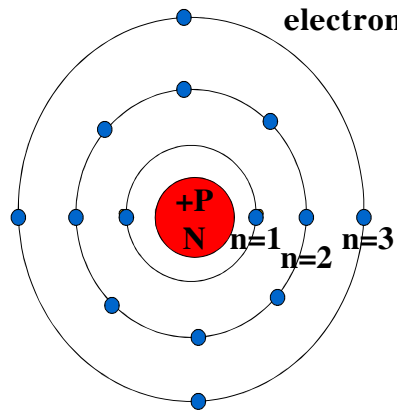
- Chất bán dẫn là nguyên liệu để sản xuất ra các loại linh kiện bán dẫn như Diode, Transistor, IC
- Chất bán dẫn là những chất có đặc điểm trung gian giữa chất dẫn điện và chất cách điện
- Về phương diện hoá học thì bán dẫn là những chất có 4 điện tử ở lớp ngoài cùng của nguyên tử. Đó là các chất Germanium (Ge) và Silicium (Si).

1. Chất bán dẫn

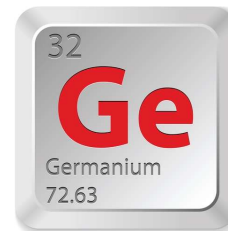
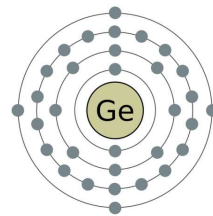
1.1. Chất bán dẫn thuần

- Xem chất bán dẫn 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.

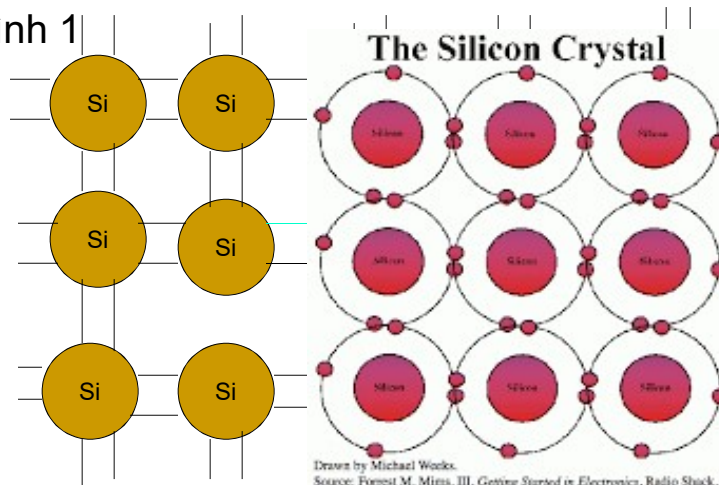
Nguyên tử Si_{14} (theo BOHR)



Nguyên tử Ge_{32}



Hình 1

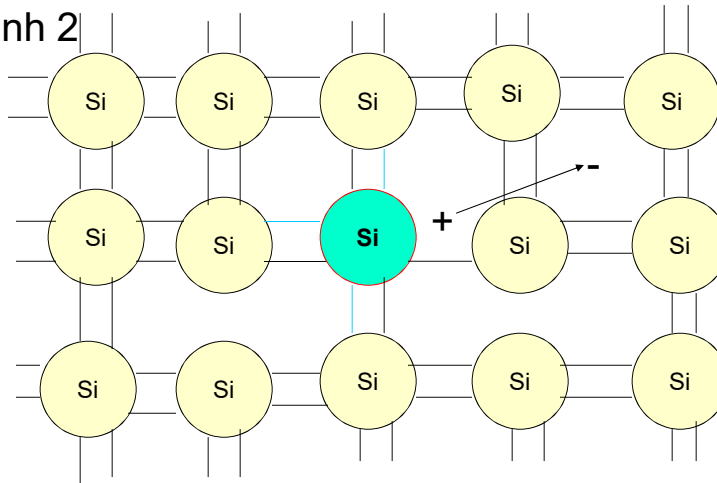


Drawn by Michael Weeks.
Source: Forrest M. Mims, III, Getting Started in Electronics, Radio Shack, 1983, p42.

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**.

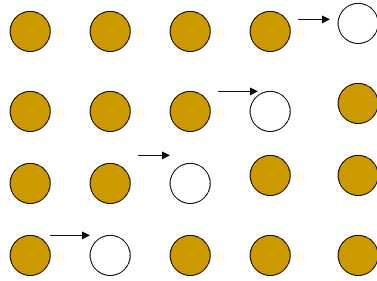
Hình 2



- 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:

$$n_i p_i = n_i^2$$

$$n_i = p_i \quad \text{và}$$

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 :

$$n_i^2 = AT^3 \exp(-qE_g / kT)$$

trong đó:

A là hằng số tùy thuộc chất bán dẫn

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

E_g năng lượng cần thiết để bẻ gãy nối cộng hoá trị

$eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

k hằng số Boltzman = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/°K} = 8,8510^{-5} \text{ eV/°K}$

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, 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 = $5 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$, nên chất bán dẫn thuần dẫn điện rất yếu. —

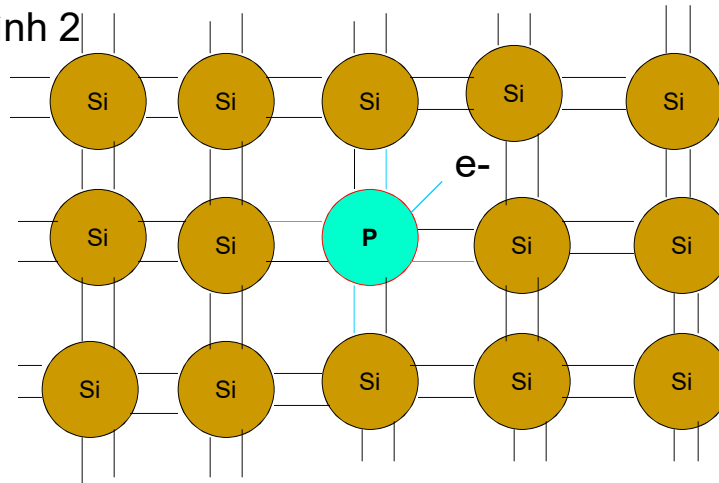
1.2. Chất bán dẫn pha

■ 1.2.1. 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 can.
- 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.

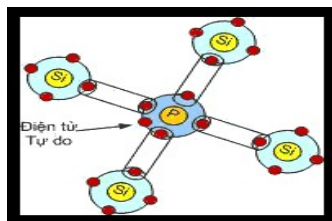
Hình 2



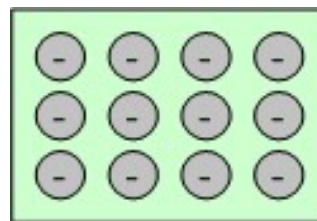
■ Chất bán dẫn loại n

1.2.1. Chất bán dẫn loại n

- Chất bán dẫn lúc này trở thành thừa điện tử (mang điện âm) và được gọi là bán dẫn N (Negative: âm).



Chất bán dẫn 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:

$$n_n = N_D + p_n \approx N_D.$$

và: $n_n \cdot p_n = n_i^2$

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

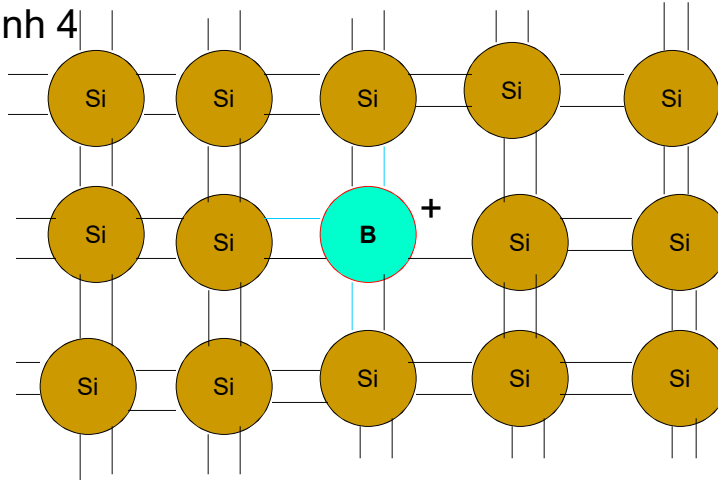
$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D}$$

■ **1.2.2. Chất bán dẫn loại p**

Pha nguyên tử hoá trị 3(B₅) vào tinh thể Si:

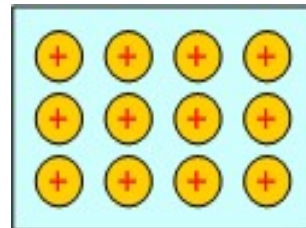
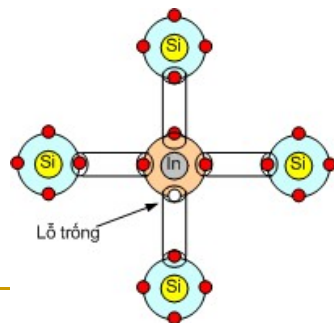
- B sẽ dùng hết 3 điện tử vòng ngoài cùng để liên kết cộng hoá trị với 3 điện tử của 3 nguyên tử kế cận
- Còn lại 1 vị trí thiếu vì điện tử nên xem như có điện tích dương và các điện tử lân cận dễ đến tái kết với lỗ trống của B và để lại ở vị trí đó lỗ trống mới và hiện tượng trên cứ tiếp diễn → dẫn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

- Khi ta pha thêm một lượng nhỏ chất có hoá trị 3 như Indium (In) vào chất bán dẫn Si thì 1 nguyên tử Indium sẽ liên kết với 4 nguyên tử Si theo liên kết cộng hoá trị và liên kết bị thiếu một điện tử => trở thành lỗ trống (mang điện dương), được gọi là chất bán dẫn 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:

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

2. 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:

$$J_{tr} = Qv$$

trong đó $Q_n = nq$ (điện tử tự do)

$$Q_p = pq \text{ (lỗ trống)}$$

$$v_n = \mu_n \xi$$

$$v_p = \mu_p \xi$$

- Mật độ dòng điện tổng cộng:

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

- 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:

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

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

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:

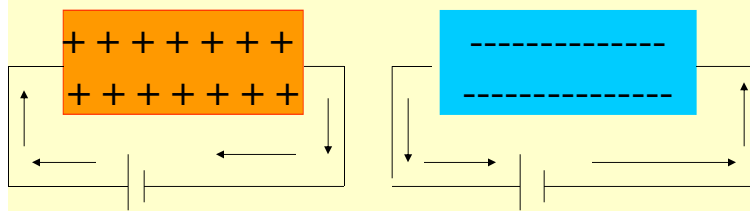
$$D_p \tau_p = L_p^2$$

$$D_n \tau_n = L_n^2$$

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

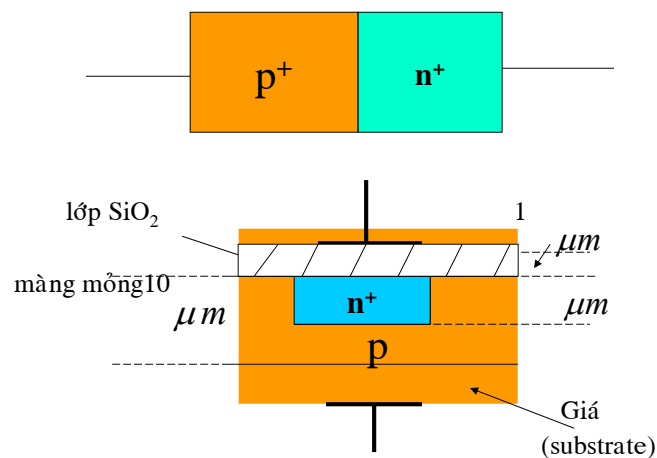
Dòng điện tổng cộng trong thanh bán dẫn là:

$$J = J_{tr} + J_{kt}$$



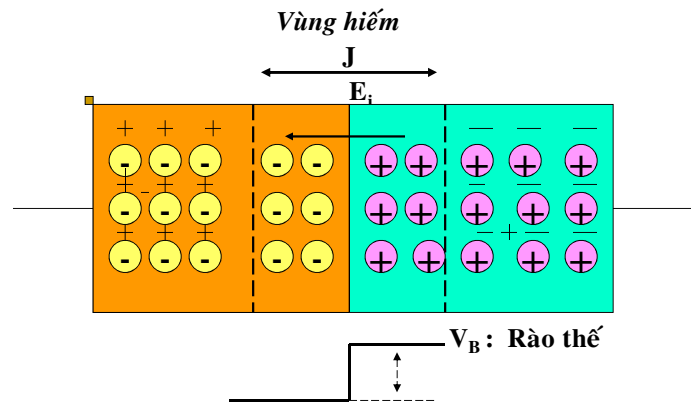
2. Nối p-n

2.1. Cấu tạo



2.2. Cân bằng nhiệt động

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



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

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

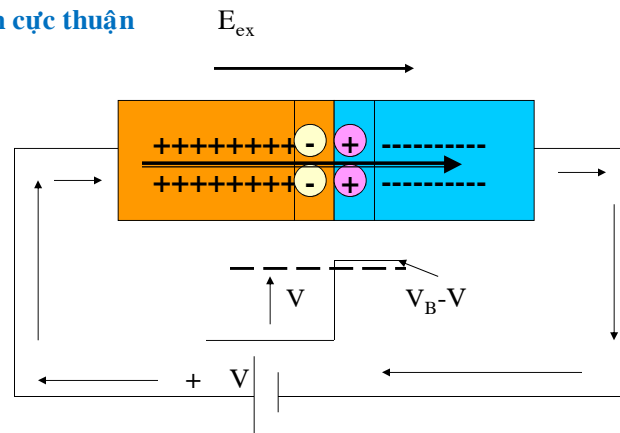
- Ở 300°K, $V_B = 0,7 \text{ V}$ (Si)
 $= 0,3 \text{ V}$ (Ge)

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

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

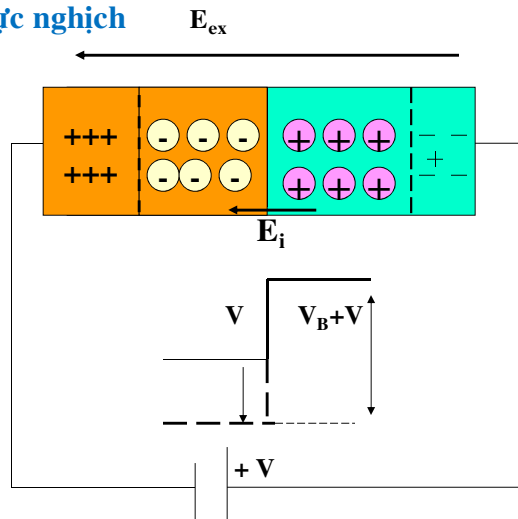
2.3. Phân cực nối p-n

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 bão 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 – bão hoà).

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

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 → dòng nghịch quá lớn, trong khi điện thế không đổi (do điện trở quá bé) sẽ làm hư hỏng nối p-n (**huỷ thác** hay sụp đổ).
- **Huỷ thác Zener** : Khi $V < 6V$ chỉ có sự phá vỡ liên kết cộng hoá trị .
- **Huỷ thác tuyết đổ**: Khi $V > 6V$ 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.

2.3. Đặc tính nối p-n

1. Biểu thức dòng điện nối p-n

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:

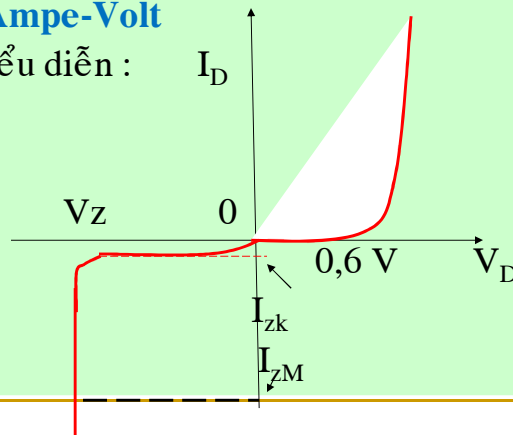
$$\begin{aligned} I_S &= A q \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) = \\ &= A q \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) n_i^2 \end{aligned}$$

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

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



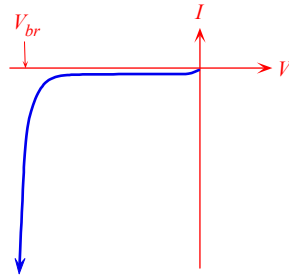
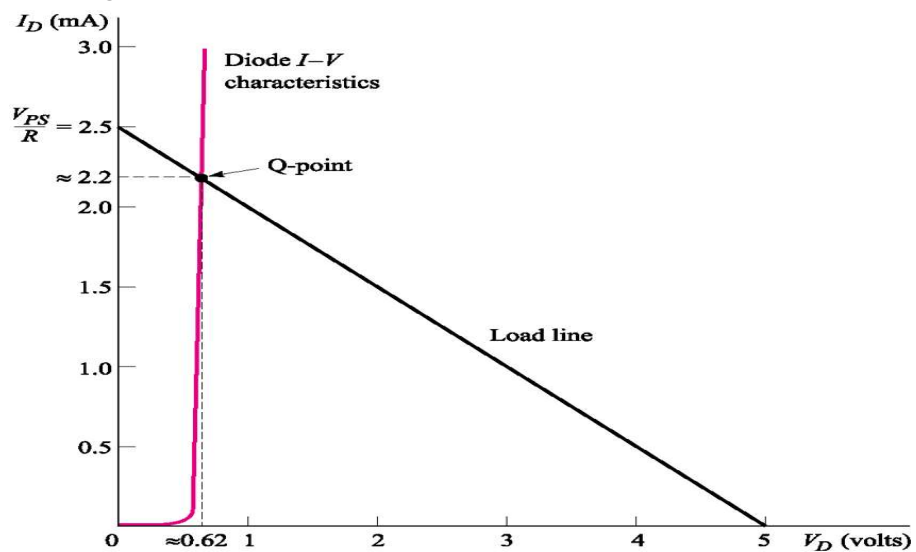


Fig.6.15: Reverse I - V characteristics of a pn junction.

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)
<http://Materials.usask.ca>

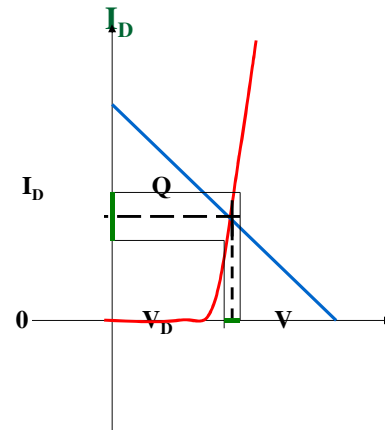
The diode and load line characteristics for the circuit shown in
 Figure 1.24



3. Điện trở nối p-n

a. Điện trở tĩnh

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} \Big|_Q$$



b. Điện trở động:

$$r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \Big|_Q = \frac{dV_D}{dI_D} \Big|_Q$$

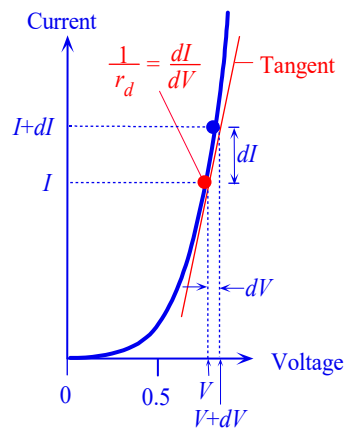


Fig. 6.14: The dynamic resistance of the diode is defined as dV/dI which is the inverse of the tangent at I .

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)
<http://Materials.USask.ca>

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

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \frac{dI_D}{dV_D} \bigg|_Q = \frac{d}{dV_D} [I_S \exp(V_D/V_T) - 1] =$$

$$= \frac{1}{V_T} I_S \exp(V_D/V_T) = \frac{I_D}{V_T} \bigg|_Q \Rightarrow$$

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} \bigg|_Q$$

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

4. Điện dung nối p-n

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:

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

$$C_o = 11,7 \mathcal{E}_o \quad (\text{Si})$$

$$C_o = 15,8 \mathcal{E}_o \quad (\text{Ge})$$

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

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.

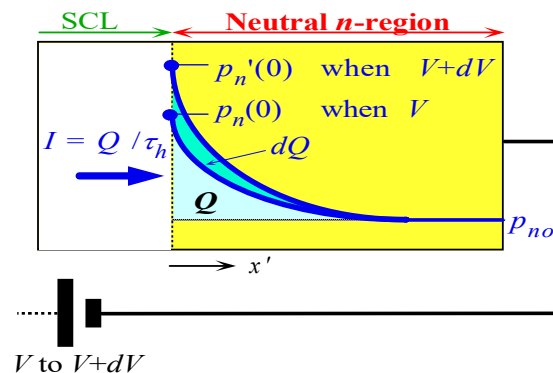
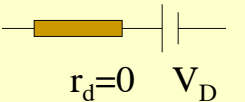
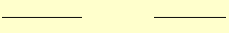


Fig. 6.13: Consider the injection of holes into the n -side during forward bias. Storage or diffusion capacitance arises because when the diode voltage increases from V to $V + dV$ then more minority carriers are injected and more minority carrier charge is stored in the n -region.

From *Principles of Electronic Materials and Devices*, Second Edition, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)
<http://Materials.USask.ca>

Mạch tương của nối p-n

- Khi phân cực thuận 
 $r_d=0$ V_D
- Khi phân cực nghịch 
- Mạch tương ở cao tần 