

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

Chương 4

Chuyển tiếp PN (PN Junction)

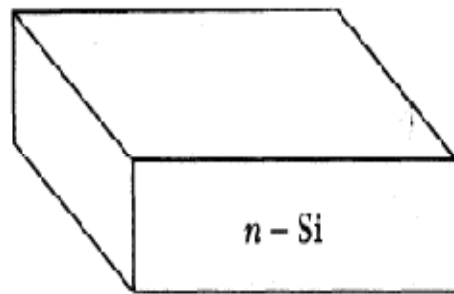
- Trong chương này, chúng ta khảo sát vật liệu bán dẫn đơn tinh thể chứa cả 2 miền loại N và P mà tạo thành **chuyển tiếp p-n** (p-n junction). Phần lớn các chuyển tiếp p-n hiện đại được làm bằng công nghệ planar (được mô tả ở phần 4.1).
- Chuyển tiếp p-n đóng 1 vai trò quan trọng trong cả các ứng dụng điện tử hiện đại và việc hiểu các dụng cụ bán dẫn khác. Nó được dùng rộng rãi trong chỉnh lưu dòng điện, chuyển mạch (mạch xung) và các hoạt động khác trong các mạch điện tử. Nó là khối xây dựng cơ bản cho BJT và thyristor, cũng như cho MOSFET. Với các điều kiện phân cực đúng hoặc khi được ánh sáng chiếu vào, chuyển tiếp p-n cũng có chức năng như dụng cụ vi-ba (microwave) hoặc dụng cụ quang điện tử.
- Chúng ta cũng xét dụng cụ liên hệ, **chuyển tiếp dị thể** (heterojunction), đây là chuyển tiếp được tạo từ 2 bán dẫn khác nhau. Chuyển tiếp dị thể là khối xây dựng quan trọng cho BJT chuyển tiếp dị thể, FET được pha tạp chất có điều chế (MODFET=modulation doped field effect transistors), dụng cụ hiệu ứng lượng tử, và dụng cụ quang điện tử.
- Và ta cũng khảo sát các loại diode bán dẫn khác và các ứng dụng của chúng.

Cụ thể ta sẽ khảo sát các chủ đề sau:

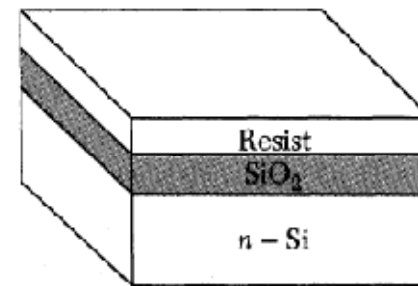
- Sự tạo thành chuyển tiếp p-n.
- Hoạt động của miền nghèo khi có phân cực điện áp.
- Dòng điện trong chuyển tiếp p-n và ảnh hưởng của các quá trình sinh và tái hợp.
- Điện tích chứa trong chuyển tiếp p-n và ảnh hưởng của với hoạt động quá độ.
- Sự nhân đánh thủng trong chuyển tiếp p-n và tác động của nó lên điện áp ngược cực đại.
- Đặc tuyến dòng-áp (I-V).
- Các mô hình của diode bán dẫn.
- Chuyển tiếp dị thể và các đặc tính cơ bản của nó.
- Các loại diode bán dẫn.
- Các ứng dụng của diode bán dẫn

4.1 Các bước chế tạo cơ bản

- Ngày nay người ta sử dụng nhiều công nghệ planar để chế tạo IC. Các hình 1 và 2 cho thấy các bước chính của quá trình planar. Các bước này (theo thứ tự) gồm có oxy hóa (oxidation), quang khắc (lithography), cấy ion (ion implanatation), và kim loại hóa (metallization).

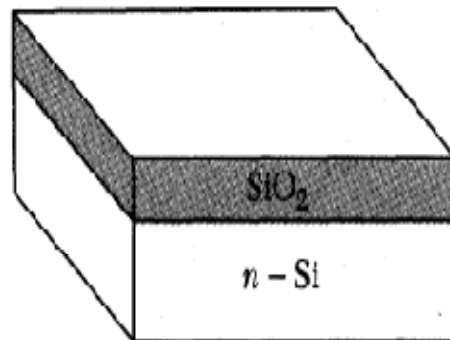


(a) Phiến bán dẫn (wafer) Si loại N.

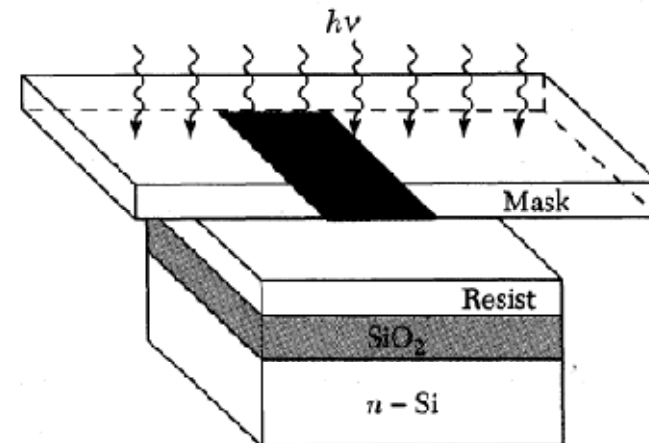


(c) Cho chất cản quang (resist) lên.

Hình 1



(b) Phiến bán dẫn Si được oxy hóa khô hay ướt.



(d) Phơi sáng chất cản quang (Resist exposure) qua mặt nạ (mask).

Hình 2 (a) Wafer sau khi được rửa xong (development).

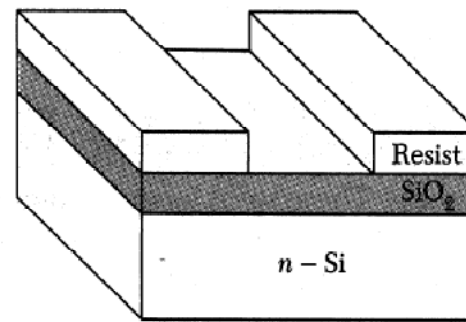
(b) Wafer sau khi lấy đi phần SiO_2 không mong muốn.

(c) Kết quả sau cùng của quá trình quang khắc.

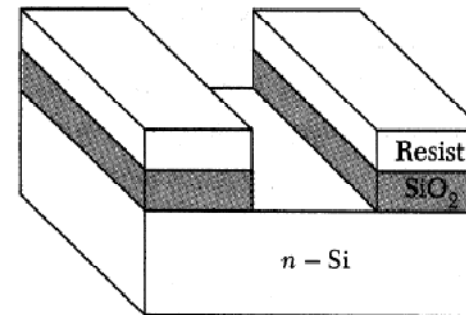
(d) Chuyển tiếp p - n được tạo ra bằng quá trình khuếch tán hoặc cấy ion.

(e) Wafer sau khi được kim loại hóa.

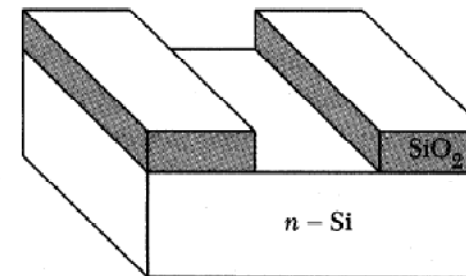
(f) Chuyển tiếp p - n sau quá trình đầy đủ.



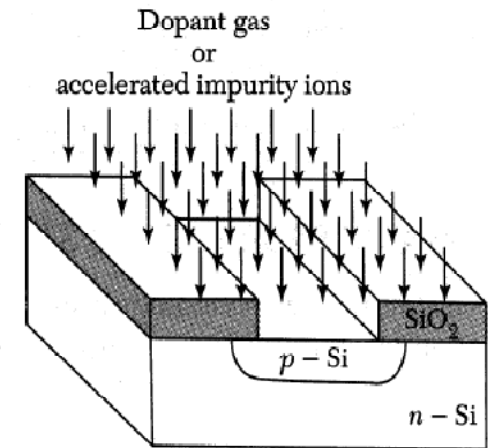
(a)



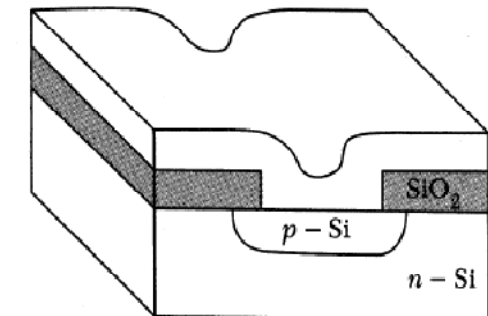
(b)



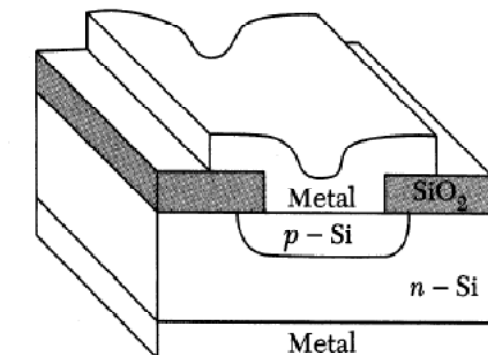
(c)



(d)



(e)



(f)

4.1.1 Oxidation

- Oxide Silic (SiO_2) chất lượng cao được sử dụng nhiều trong chế tạo IC. Tổng quát **SiO_2** có chức năng như ***chất cách điện*** trong 1 số cấu trúc dụng cụ hoặc như ***rào chắn*** sự khuếch tán hay cấy trong chế tạo dụng cụ.
- Trong chế tạo chuyển tiếp p-n (Hình 1), màng SiO_2 dùng để định nghĩa diện tích chuyển tiếp.
- Có 2 phương pháp tăng trưởng SiO_2 : ***oxy hóa khô và ướt***, phụ thuộc vào việc sử dụng oxy khô hay hơi nước bốc hơi. Oxy hóa khô thường được dùng để tạo oxide mỏng trong cấu trúc dụng cụ do nó giao tiếp Si- SiO_2 tốt, trái lại oxy hóa ướt được dùng cho các lớp dày hơn do tốc độ tăng trưởng nhanh. Hình 1a cho 1 phần của phiến bán dẫn Si chuẩn bị cho oxy hóa. Sau quá trình oxy hóa, một lớp SiO_2 được tạo thành trên toàn bộ bề mặt wafer. Hình 1b cho thấy bề mặt phía trên của wafer bị oxy hóa.

4.1.2 Lithography (quang khắc)

- Một công nghệ khác, đgl là **quang khắc** (photolithography), được dùng để định nghĩa dạng hình học của chuyển tiếp p-n. Sau khi tạo thành lớp SiO₂, wafer được phủ bằng vật liệu nhạy với ánh sáng tia cực tím (UV) đgl chất cản quang (photoresist) mà được ép lên bề mặt wafer bằng máy quay tốc độ cao. Sau đó (hình 1c), wafer được nung ở 80-100°C để lấy dung môi ra khỏi chất cản quang và làm cứng nó để cho kết dính tốt hơn.
- Hình 1d cho thấy bước kế tiếp, phơi sáng wafer qua 1 mặt nạ có khuôn với nguồn sáng UV. Vùng được phơi sáng của wafer có phủ chất cản quang sẽ có phản ứng hóa học, tùy theo loại chất cản quang.
- Diện tích được ánh sáng chiếu vào trở nên bị polymer hóa và vùng này được giữ nguyên khi cho wafer vào máy rửa, trái lại vùng không có ánh sáng chiếu vào sẽ bị hòa tan và trôi đi. Hình 2a cho thấy wafer sau khi qua máy rửa.
- Wafer lại được nung đến 120-180°C trong 20 phút để tăng cường sự kết dính và cải thiện sự chịu đựng với quá trình khắc tiếp theo. Rồi việc khắc dùng hydrofluoric acid (HF) lấy đi bề mặt SiO₂ không có bảo vệ bởi chất cản quang (hình 2b) Sau cùng chất cản quang được loại đi bằng dung dịch hóa học hay hệ thống plasma oxy. Hình 2c cho thấy kết quả sau cùng của miền không có oxide (cửa sổ) sau quá trình quang khắc. Wafer lúc này sẵn sàng cho việc tạo chuyển tiếp p-n bằng quá trình khuếch tán hay cấy ion.

4.1.3 Khuếch tán và cấy ion

- Trong phương pháp khuếch tán, bề mặt bán dẫn không được bảo vệ bởi oxide được phơi ra cho nguồn có nồng độ cao có tạp chất ngược lại. Tạp chất đi vào tinh thể bán dẫn do khuếch tán.
- Trong phương pháp cấy ion, tạp chất được đưa vào bán dẫn bằng cách gia tốc những ion tạp chất đến mức năng lượng cao và cấy các ion vào bán dẫn. Lớp SiO_2 làm rào chắn sự khuếch tán tạp chất hay cấy ion.
- Sau quá trình khuếch tán hay cấy ion, chuyển tiếp p-n được tạo thành như ở hình 2d. Do khuếch tán tạp chất hoặc cấy ion theo chiều ngang, bề rộng của miền p hơi lớn hơn phần cửa sổ

4.1.4 Metallization (kim loại hóa)

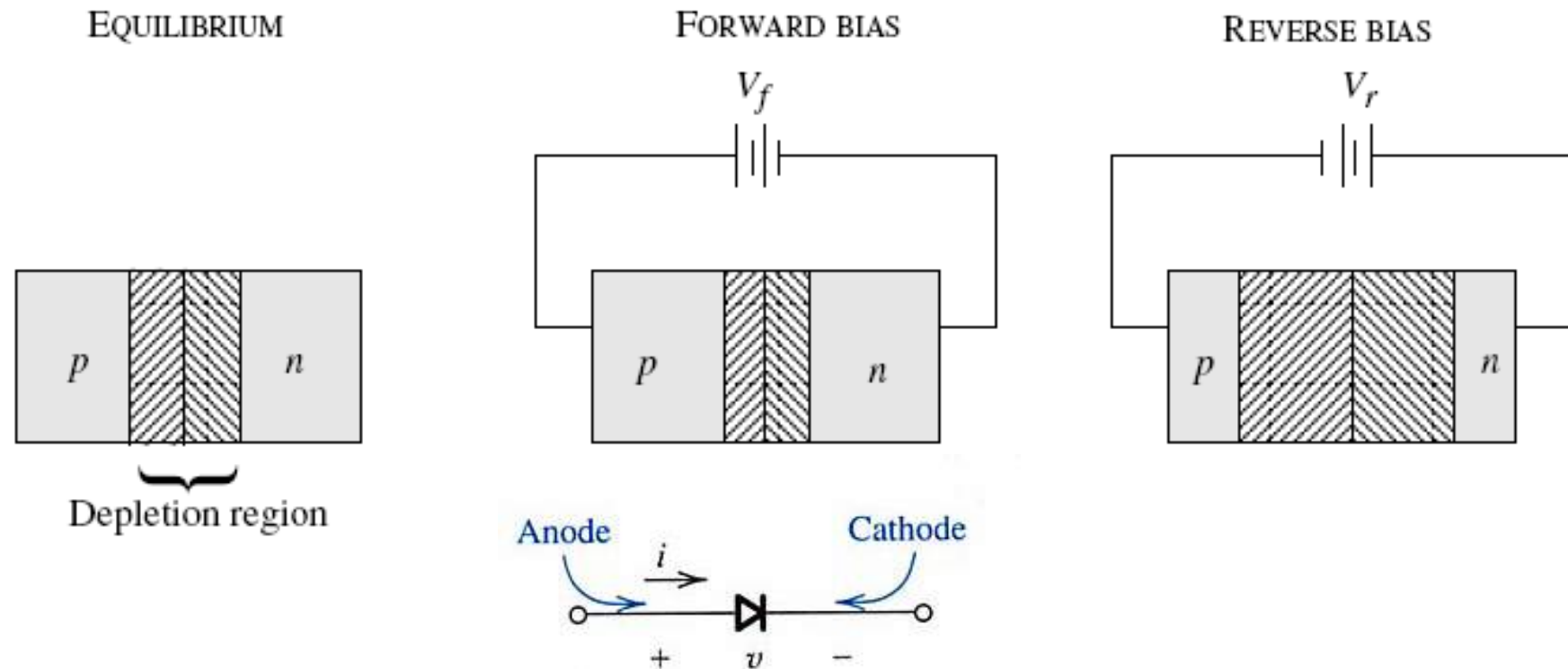
- Sau quá trình khuếch tán hay cấy ion, người ta dùng quá trình kim loại hóa để tạo nên các tiếp xúc Ohm và các kết nối (hình 2e). Các màng mỏng kim loại có thể được tạo nên bằng lắng đọng hơi vật lý và lắng đọng hơi hóa học (chemical vapor deposition=CVD).
- Một lần nữa người ta dùng quá trình quang khắc để định nghĩa tiếp xúc phía trước (hình 2f).
- Thực hiện kim loại hóa tương tự cho phần tiếp xúc phía sau không dùng quá trình quang khắc. Thông thường
- Việc nung ủ nhiệt độ thấp ($\leq 500^{\circ}\text{C}$) sẽ làm cho có tiếp xúc điện trở thấp giữa lớp kim loại và bán dẫn.
- Khi hoàn tất quá trình kim loại hóa thì ta có thể sử dụng các chuyển tiếp p-n được rồi.

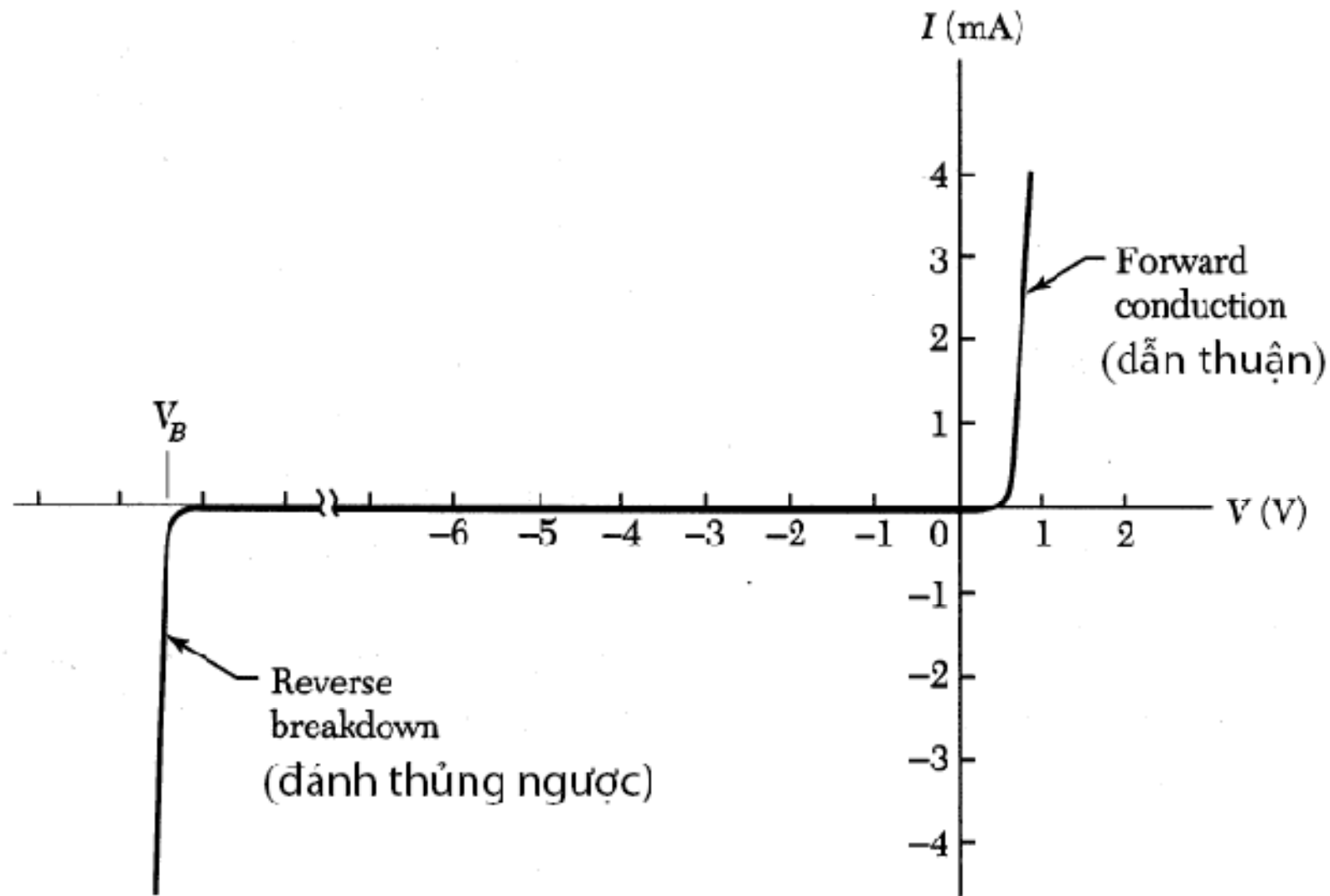
4.2 Điều kiện cân bằng nhiệt

- Đặc tính quan trọng nhất của các chuyển tiếp p-n là **chỉh lưu dòng điện**, nghĩa là chúng cho phép dòng điện chạy dễ dàng chỉ theo 1 hướng. Do đó dụng cụ đầu tiên từ chuyển tiếp p-n là **diode chỉh lưu** (rectifier diode)
- Hình 3 cho thấy đặc tuyến dòng-áp của chuyển tiếp p-n tiêu biểu với bán dẫn Si. Khi ta đưa “**phân cực thuận**” (forward bias) vào chuyển tiếp (nghĩa là điện áp dương vào bên P), dòng điện tăng nhanh khi điện áp tăng.
- Tuy nhiên, khi ta đưa “**phân cực ngược**” (reverse bias) vào, thì gần như không có dòng điện chạy qua. Khi tăng phân cực ngược thì dòng điện ở giá trị rất nhỏ cho đến khi đạt đến điện áp tới hạn, ở điểm đó dòng điện tăng đột ngột. Sự tăng đột ngột này trong dòng điện được gọi là **đánh thủng chuyển tiếp** (junction breakdown). Điện áp thuận đưa vào thường $< 1\text{ V}$, nhưng điện áp tới hạn, hoặc điện áp đánh thủng có thể thay đổi từ vài Volt đến nhiều ngàn Volt phụ thuộc vào nồng độ tạp chất và các tham số dụng cụ khác.

Cách nhận biết sự phân cực ở chuyển tiếp PN

- Dựa trên $V_P - V_N$: (V_P là thế ở đầu Anode và V_N là thế ở đầu Cathode)
 - » < 0 : phân cực ngược (REVERSE BIAS)
 - » $= 0$: không có phân cực hay cân bằng
 - » > 0 : phân cực thuận (FORWARD BIAS)



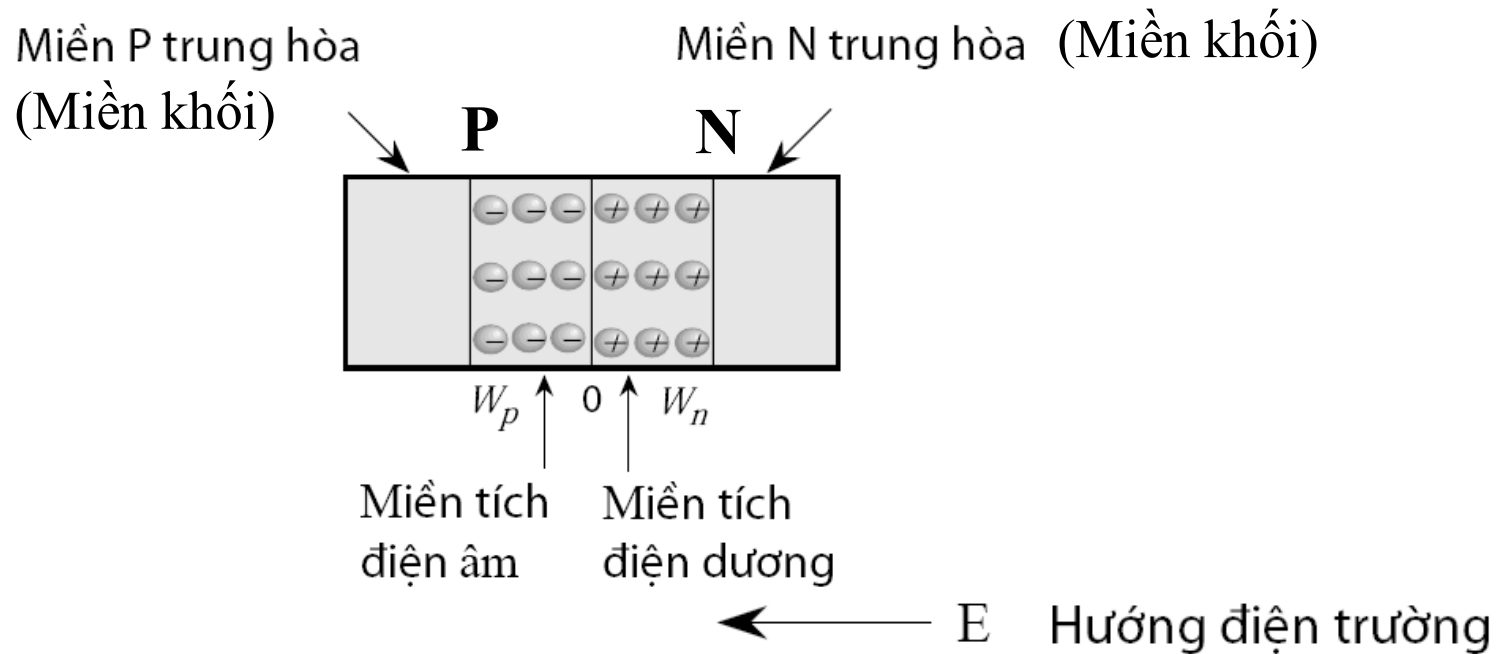


Hình 3 Đặc tuyến dòng-áp (đặc tuyến I-V) của chuyển tiếp p-n tiêu biểu với bán dẫn Si.

Giả thiết khi phân tích

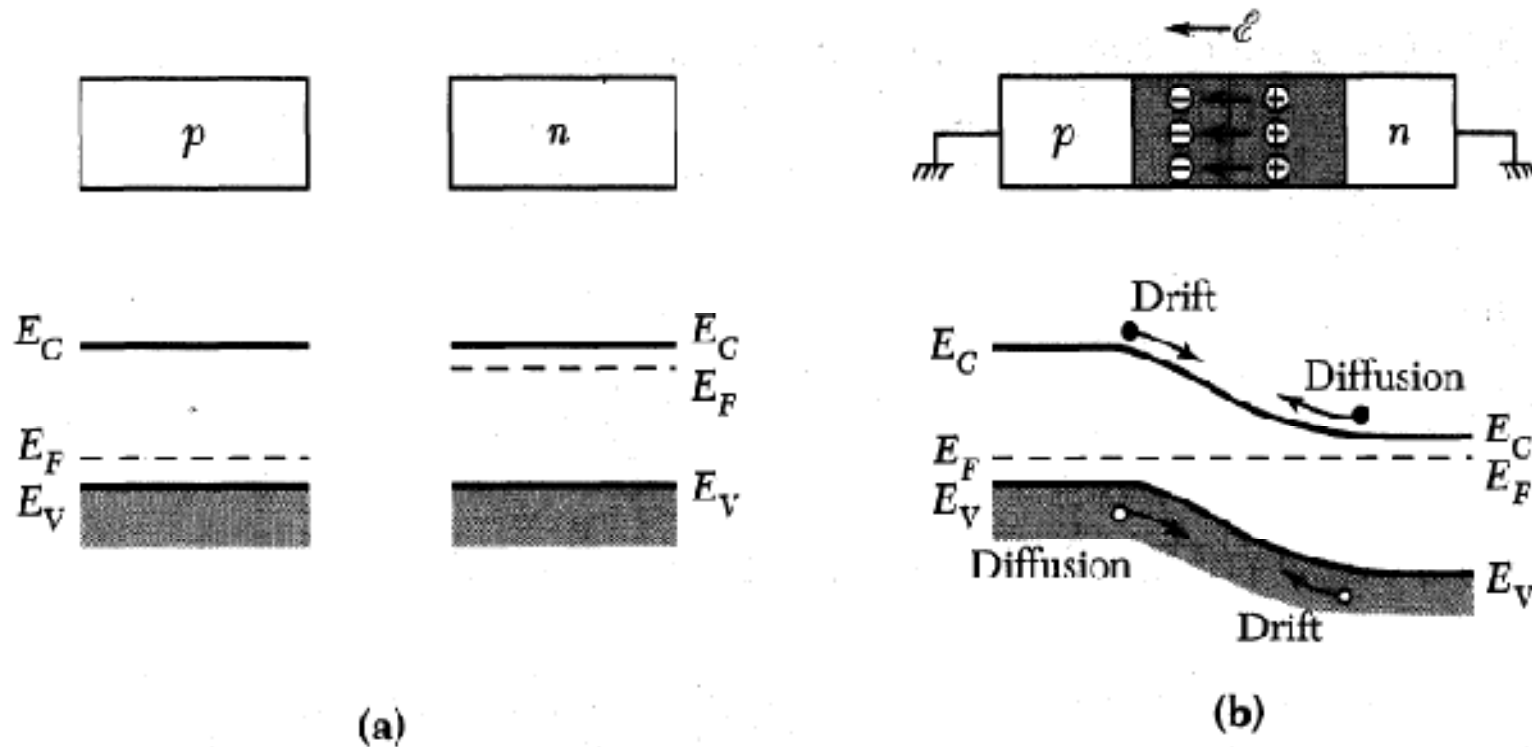
1. Chuyển tiếp PN loại bước
2. Dùng mô hình điện tích không gian bước

Mô hình điện tích không gian bước



Lỗ	{	→	Dòng hạt khuếch tán	→	Dòng điện khuếch tán
		←	Dòng hạt trôi	←	Dòng điện trôi
Điện tử	{	←	Dòng hạt khuếch tán	→	Dòng điện khuếch tán
		→	Dòng hạt trôi	←	Dòng điện trôi

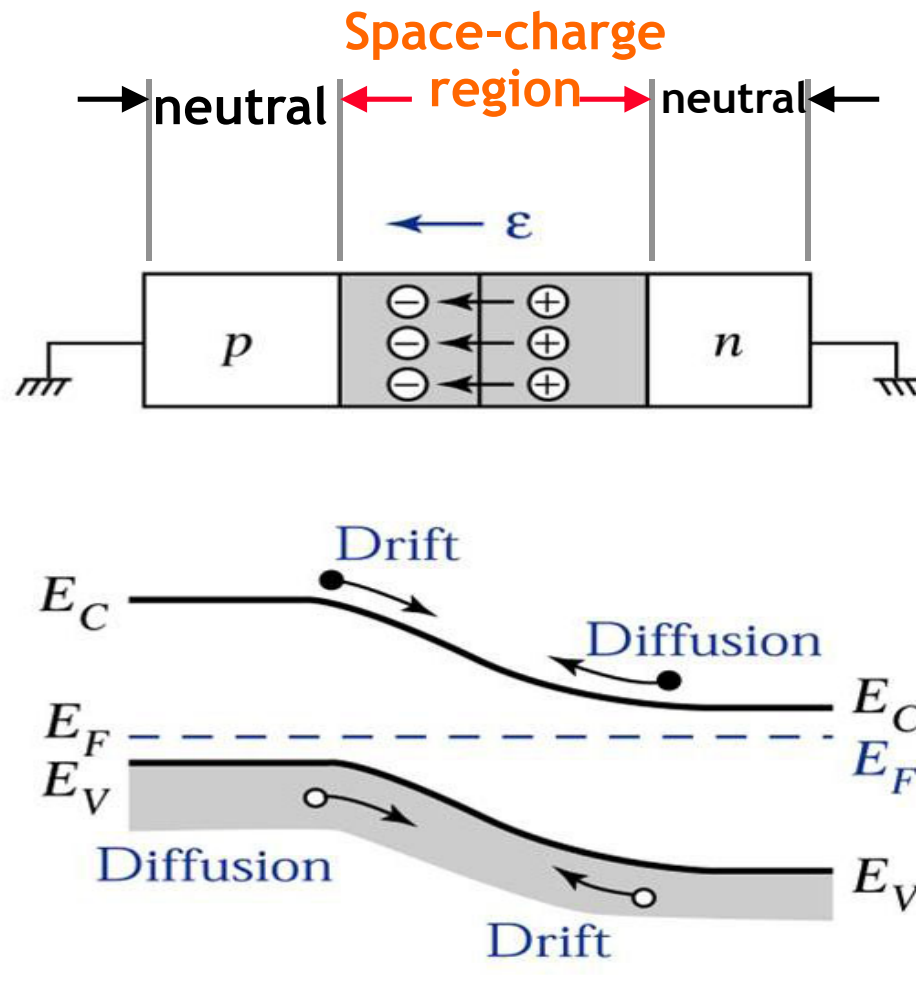
4.2.1 Giải đồ dải năng lượng



Hình 4 (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 giải đồ dải năng lượng của chuyển tiếp p-n ở điều kiện cân bằng nhiệt.

- **Mức Fermi**
 - Gắn dải dẫn (loại N)
 - Gắn dải hóa trị (loại P)
- **Gắn lại với nhau**
 - Điện tử được khuếch tán ←
 - Lỗ khuếch tán →
- **Để lại**
 - Ion donor dương (N_D^+), bên phải
 - Ion acceptor âm (N_A^-), trái
- **Tạo nên điện trường** ←
- **Tạo nên điện thế.**
- **Miền điện tích không gian**

Chuyển tiếp PN ở cân bằng nhiệt



- Có 2 miền trung hòa (**neutral**) và miền điện tích không gian SCR ("**space-charge**" region).
- Miền SCR cũng được gọi là miền nghèo ("**depletion region**") do nghèo (không có) các hạt dẫn tự do.

4.2.2 Những mức Fermi cân bằng (Equilibrium Fermi levels)

Ở cân bằng nhiệt, các dòng điện tử và lỗ chạy qua các chuyển tiếp thì đồng nhất bằng zero.

$$\begin{aligned} J_p &= J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diffusion}) \\ &= q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \\ &= q\mu_p p \left(\frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \right) - kT\mu_p \frac{dp}{dx} = 0, \end{aligned}$$

với

$$\begin{aligned} D_p &= (kT/q)\mu_p \\ p &= n_i e^{(E_i - E_F)/kT} \end{aligned}$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p}{kT} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

Thì $J_p = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} = 0$

hoặc

$$\frac{dE_F}{dx} = 0.$$

Tương tự, ta có mật độ dòng điện tử:

$$\begin{aligned} J_n &= J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diffusion}) \\ &= q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= \mu_n n \frac{dE_F}{dx} = 0. \end{aligned}$$

Như vậy, với điều kiện dòng điện tử và lỗ bằng không, **mức Fermi phải là hằng số** (nghĩa là độc lập với x) trên toàn bộ mẫu thử như được minh họa trong giản đồ Hình 4b.

Rào thế V_{bi} (*Built-in potential*)

- Mức Fermi không đổi ở cân bằng nhiệt dẫn đến sự phân bố điện tích không gian duy nhất ở chuyển tiếp. Sự phân bố điện tích không gian duy nhất và thế tĩnh điện được cho bởi phương trình Poisson:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} \equiv -\frac{d\mathcal{E}}{dx} = -\frac{\rho_s}{\epsilon_s} = -\frac{q}{\epsilon_s}(N_D - N_A + p - n). \quad (7)$$

Ở đây ta giả sử rằng tất cả các donor và acceptor đều bị ion hóa.

- Trong những miền cách xa chuyển tiếp do luyện kim, sự trung hòa điện tích được duy trì và tổng mật độ điện tích không gian là không. Đối với các miền trung hòa, ta có thể đơn giản hóa (7) thành:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = 0 \quad (8)$$

và

$$N_D - N_A + p - n = 0. \quad (9)$$

- Đối với miền trung hòa bên P, ta giả sử rằng $N_D=0$ và $p \gg n$. Thế tĩnh điện của miền trung hòa bên P so với mức Fermi, được gọi là ψ_p (xem hình 5b) và có thể tính được bằng cách đặt $N_D = n = 0$ trong (9) và bằng cách thay kết ($p = N_A$) vào (2):

$$\psi_p \equiv -\frac{1}{q}(E_i - E_F) \Big|_{x \leq -x_p} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right). \quad (10)$$

- Tương tự ta cũng có thể tính điện ψ_n của miền trung hòa bên N so với mức Fermi

$$\psi_n \equiv -\frac{1}{q}(E_i - E_F) \Big|_{x \geq x_n} = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right). \quad (11)$$

- Chú ý: Phương trình (2): $p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$ (2)

Rào thế V_{bi} (Built-in potential)

- Hiệu điện thế tĩnh điện giữa miền trung hòa bên P và bên N ở cân bằng nhiệt được gọi là **điện thế nội** (built-in potential) hay **rào thế V_{bi}**

$$V_{bi} = \psi_n - \psi_p = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right). \quad (12)$$

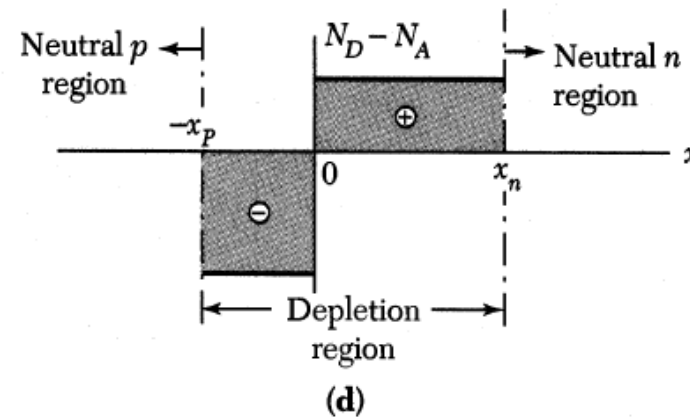
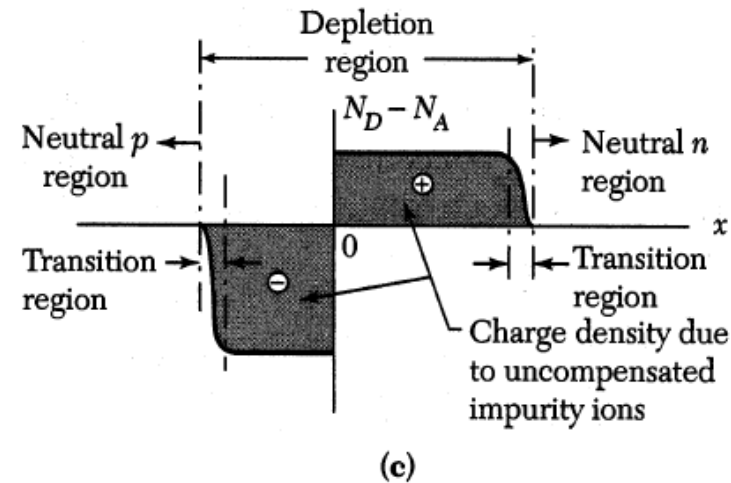
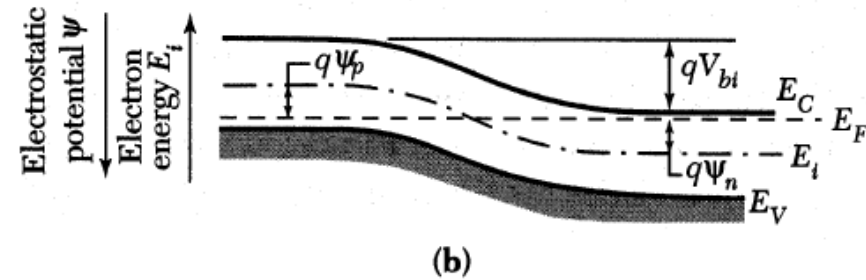
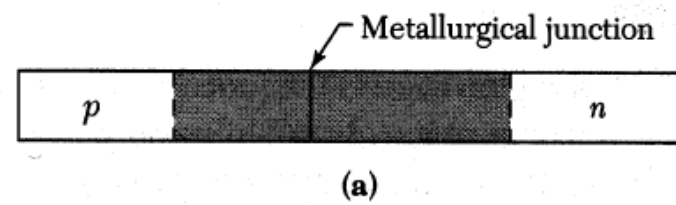
- Chú ý:**

- Người ta còn gọi V_{bi} với các tên khác là **thế chuyển tiếp**, **thế tiếp xúc**, hoặc **điện áp khuếch tán** (diffusion voltage)
- Một số TLTK khác sử dụng ký hiệu ϕ_j (j=junction) thay cho V_{bi}
- Hệ quả: **Quan hệ giữa hạt dẫn đa số - thiểu số:**

$$p_{n0} = p_{p0} \exp[-V_{bi} / V_T]$$

$$n_{p0} = n_{n0} \exp[-V_{bi} / V_T]$$

với p_{n0} là nồng độ lỗ của bán dẫn N ở cân bằng nhiệt



Hình 5

(a) Chuyển tiếp p-n với sự pha tạp chất thay đổi đột ngột tại chuyển tiếp luyện kim.

(b) Giải đồ dải năng lượng của chuyển tiếp bước ở cân bằng nhiệt.

(c) Sự phân bố điện tích không gian.

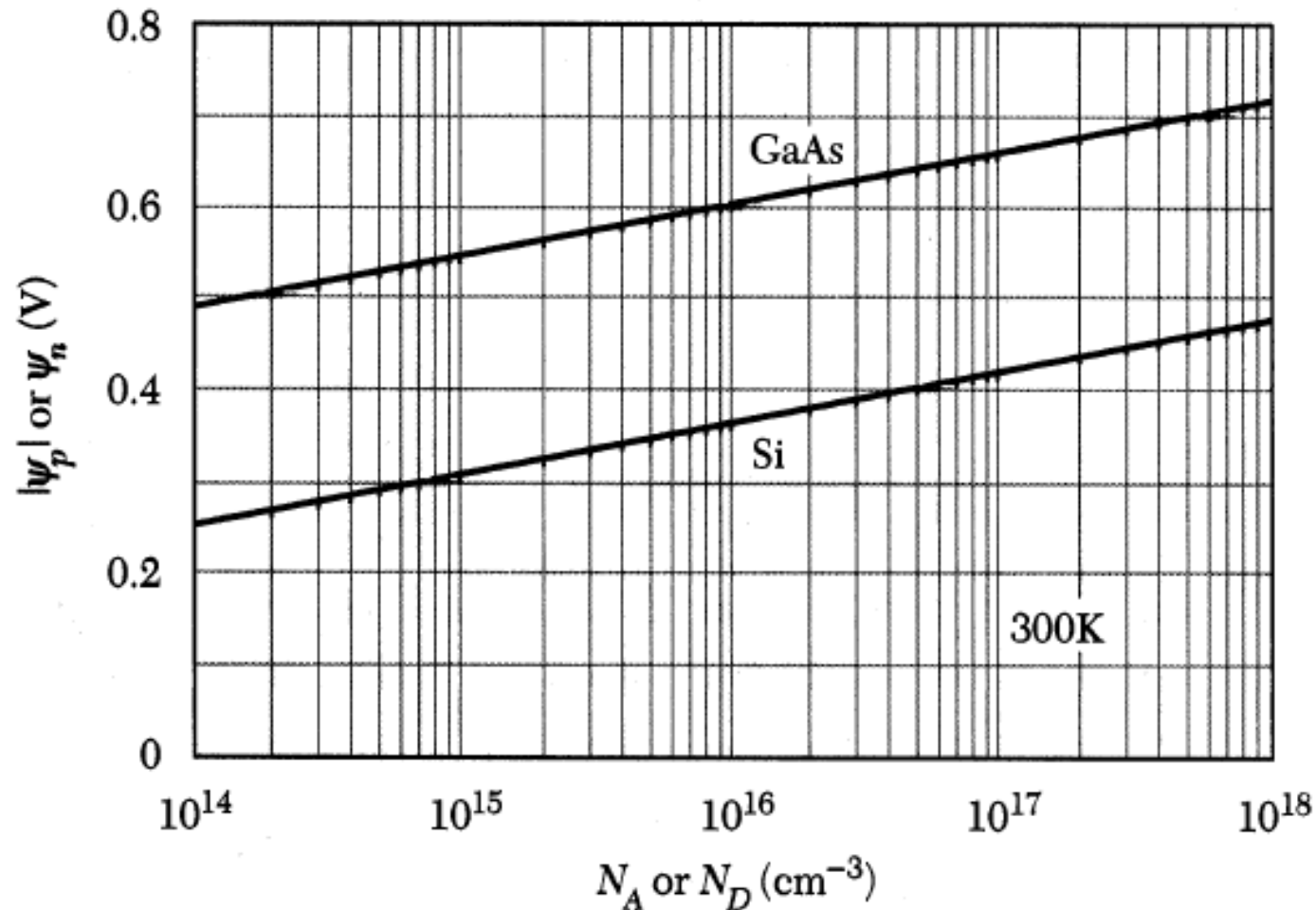
(d) Xấp xỉ hình chữ nhật cho sự phân bố điện tích không gian

4.2.3 Điện tích không gian

- Đi từ miền trung hòa tới chuyển tiếp, ta gặp 1 miền quá độ hẹp như ở hình 5c. Ở đây điện tích không gian của các ion tạp chất được bổ chính 1 phần bởi các hạt dẫn tự do. Vượt qua miền quá độ ta đi vào miền hoàn toàn nghèo (hạt dẫn tự do) ở đó mật độ hạt dẫn tự do là không. Đây được gọi là **miền nghèo** (còn được gọi là **miền điện tích không gian**). Với các chuyển tiếp p-n tiêu biểu trong Si và GaAs, bề rộng của mỗi miền quá độ nhỏ hơn nhiều bề rộng của miền nghèo. Do đó, ta có thể bỏ qua miền quá độ và biểu diễn miền nghèo bằng phân bố hình chữ nhật như trong hình 5d, với x_p và x_n chỉ bề rộng miền nghèo bên P và bên N (hoặc W_P và W_N) với miền nghèo hoàn toàn có $p = n = 0$. Phương trình 7 trở thành

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D). \quad (13)$$

Độ lớn của Ψ_p và Ψ_n theo (10) và (11) được vẽ trong hình 6 như hàm của nồng độ pha tạp vào Si và GaAs. Với nồng độ tạp chất cho trước, thế tĩnh điện của GaAs thì cao hơn của Si vì nó có nồng độ hạt dẫn nội tại n_i nhỏ hơn.



Hình 6 Các điện thế nội bên P và bên N của chuyển tiếp bước trong Si và GaAs là hàm của nồng độ tạp chất.

Thí dụ 1: Tính rào thế V_{bi} với chuyển tiếp p-n Si có $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ và $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ở 300 K.

Bài giải. Từ phương trình 12, ta có

$$V_{bi} = (0.0259) \ln \left[\frac{10^{18} \times 10^{15}}{(9.65 \times 10^9)^2} \right] = 0.774 \text{ V.}$$

cũng từ hình 6

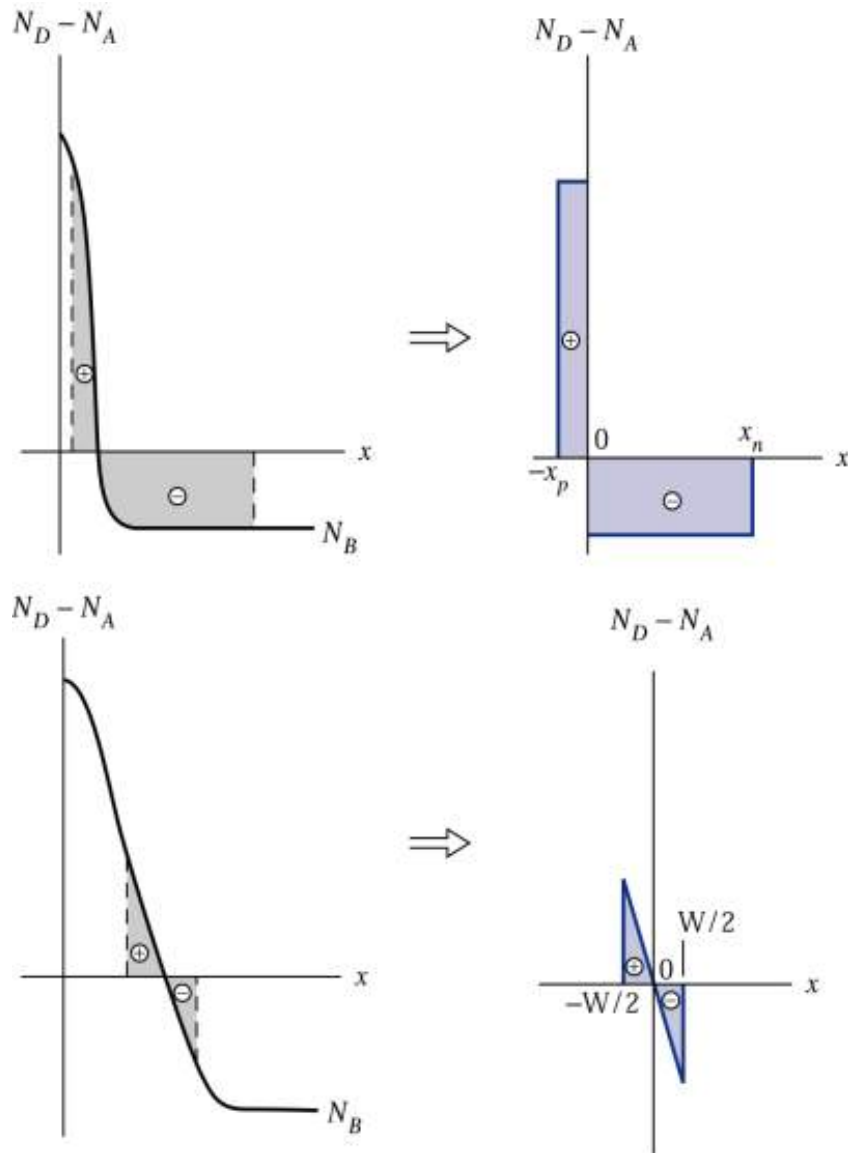
$$V_{bi} = \psi_n + |\psi_p| = 0.30 \text{ V} + 0.47 \text{ V} = 0.77 \text{ V.}$$

4.3 Miền nghèo (depletion region)

- Để giải phương trình Poisson (13), ta phải biết sự phân bố tạp chất. Trong phần này ta xét 2 trường hợp quan trọng – ***chuyển tiếp bước***(abrupt junction) và ***chuyển tiếp biến đổi tuyến tính***(linearly graded junction).
- Hình 7a cho thấy chuyển tiếp bước là chuyển tiếp được tạo bởi khuếch tán cạn hay cấy ion năng lượng thấp. Sự phân bố tạp chất của chuyển tiếp có thể xem xấp xỉ là thay đổi đột ngột của nồng độ tạp chất giữa các miền N và P.
- Hình 7b cho thấy chuyển tiếp biến đổi tuyến tính. Khi cho khuếch tán sâu hay cấy ion năng lượng cao, profile tạp chất có thể xấp xỉ bằng chuyển tiếp biến đổi đều tuyến tính, nghĩa là sự phân bố tạp chất thay đổi tuyến tính qua chỗ chuyển tiếp. Ta xét miền nghèo của cả 2 loại chuyển tiếp này.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D). \quad (13)$$

Hình 7 Miền nghèo



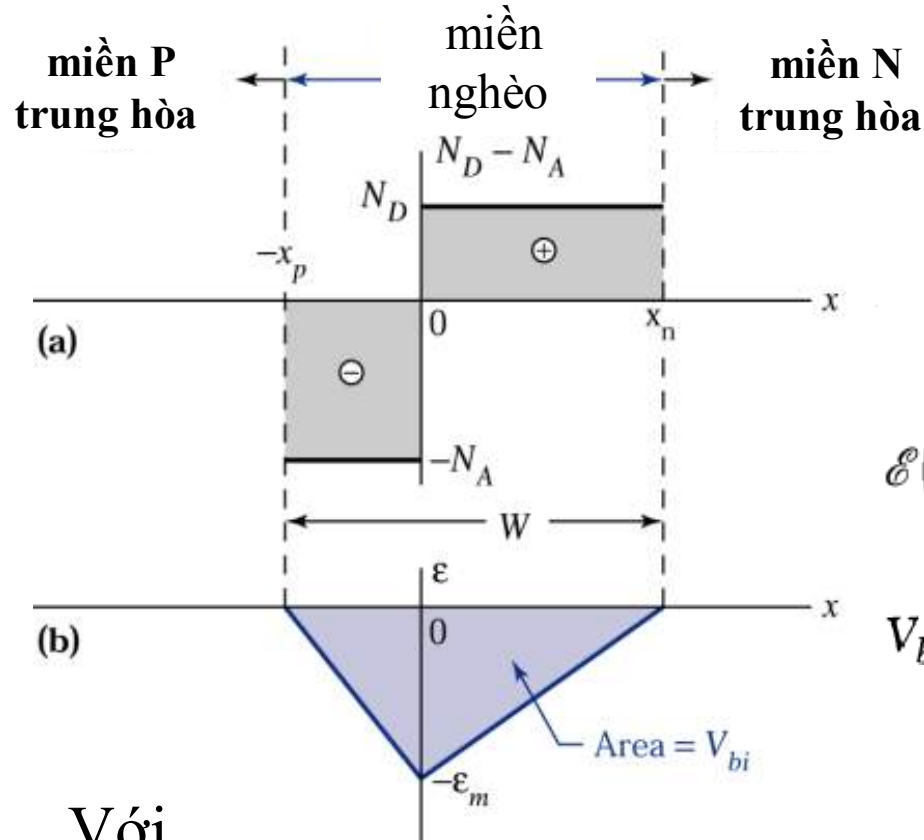
- **Chuyển tiếp bước (Abrupt junction)**

- Chuyển tiếp PN được tạo thành bằng khuếch tán cạn hoặc cấy ion năng lượng thấp.
- Sự phân bố tạp chất
 - » Xấp xỉ bằng sự chuyển đột ngột nồng độ pha tạp giữa miền N và P.

- ***Chuyển tiếp biến đổi đều tuyến tính***

- Khuếch tán sâu hoặc cấy ion năng lượng cao.
- Sự phân bố tạp chất thay đổi tuyến tính ở chỗ chuyển tiếp PN.

Chuyển tiếp bước (Abrupt junction)



Với

$$\mathcal{E}_m = \frac{qN_D x_n}{\epsilon_s} = \frac{qN_A x_p}{\epsilon_s}.$$

Điện trường cực đại E_m

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \quad \text{với} \quad 0 < x \leq x_n.$$

$$N_A x_p = N_D x_n. \quad W = x_p + x_n.$$

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{d\psi}{dx} = -\frac{qN_A(x + x_p)}{\epsilon_s} \quad \text{với} \quad -x_p \leq x < 0$$

$$\mathcal{E}(x) = -\mathcal{E}_m + \frac{qN_D x}{\epsilon_s} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}(x - x_n) \quad \text{với} \quad 0 < x \leq x_n,$$

$$\begin{aligned} V_{bi} &= -\int_{-x_p}^{x_n} \mathcal{E}(x) dx = -\int_{-x_p}^0 \mathcal{E}(x) dx \Big|_{p\text{-side}} - \int_0^{x_n} \mathcal{E}(x) dx \Big|_{n\text{-side}} \\ &= \frac{qN_A x_p^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_D x_n^2}{2\epsilon_s} = \frac{1}{2} \mathcal{E}_m W. \end{aligned}$$

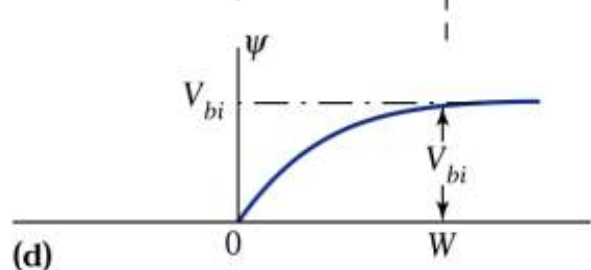
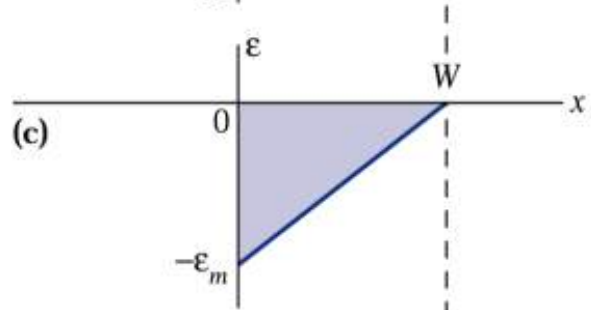
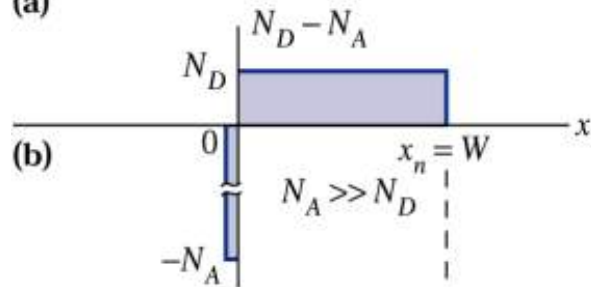
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}}$$

Bề rộng miền nghèo W

Chuyển tiếp bước 1 bên (One-sided abrupt junction)



(a)



(d)

$N_A \gg N_D \rightarrow$ nghĩa là $x_p \ll x_n$

$$W \equiv x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_D}} \quad \mathcal{E}(x) = -\mathcal{E}_m + \frac{qN_B x}{\epsilon_s}$$

Trường giảm xuống zero tại $x=W$, do đó

$$\mathcal{E}_m = \frac{qN_B W}{\epsilon_s}$$

$$\mathcal{E}(x) = \frac{qN_B}{\epsilon_s} (-W + x) = -\mathcal{E}_m \left(1 - \frac{x}{W} \right)$$

$$\psi(x) = -\int_0^x \mathcal{E} dx = \mathcal{E}_m \left(x - \frac{x^2}{2W} \right) + \text{constant}$$

$$\psi(x) = \frac{V_{bi} x}{W} \left(2 - \frac{x}{W} \right)$$

Với N_B là nồng độ khối được pha tạp chất ít (nghĩa là N_D với chuyển tiếp p+-n)

► EXAMPLE 2

For a silicon one-sided abrupt junction with $N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, calculate the depletion layer width and the maximum field at zero bias ($T = 300 \text{ K}$).

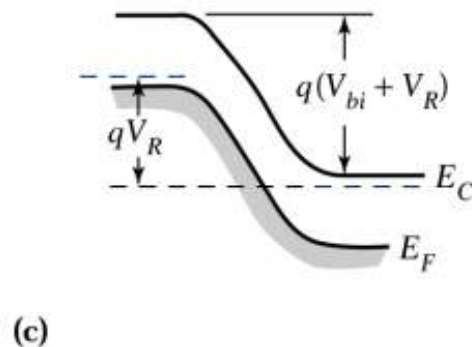
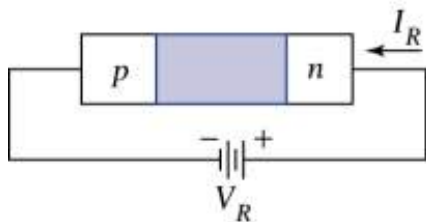
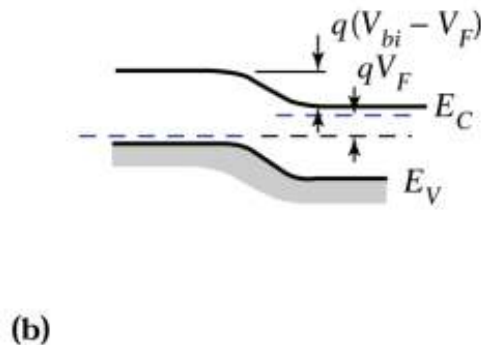
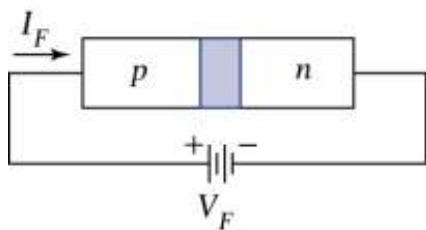
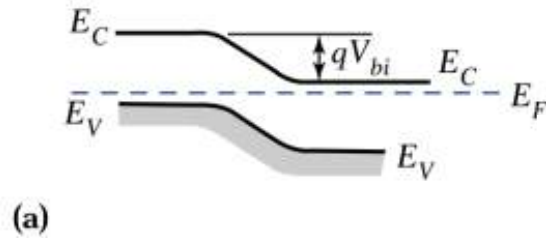
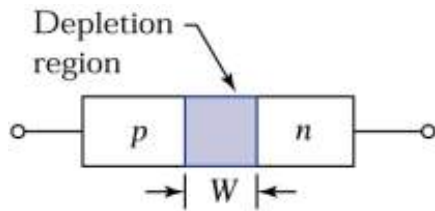
SOLUTION From Eqs. 12, 21, and 23, we obtain

$$V_{bi} = 0.0259 \ln \left[\frac{10^{19} \times 10^{16}}{(9.65 \times 10^9)^2} \right] = 0.895 \text{ V},$$

$$W \cong \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_D}} = 3.41 \times 10^{-5} = 0.343 \text{ } \mu\text{m},$$

$$\mathcal{E}_m = \frac{qN_D W}{\epsilon_s} = 0.52 \times 10^4 \text{ V/cm.}$$

Miền nghèo với phân cực



- Phân cực thuận (Forward bias)

$$- V_{bi} - V_F$$

– Bề rộng miền nghèo $W \downarrow$

- Phân cực ngược (Reverse bias)

$$- V_{bi} + V_R$$

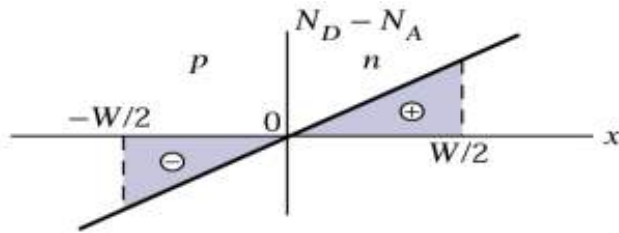
– Bề rộng miền nghèo $W \uparrow$

Với V là điện áp đặt vào diode:

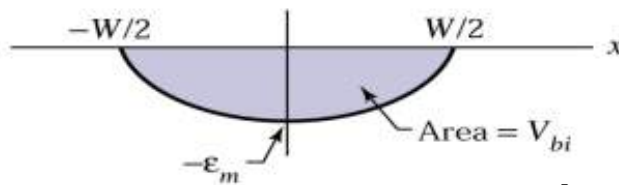
- phân cực thuận $V = V_F > 0$
- phân cực ngược $V = -V_R < 0$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{qN_B}}$$

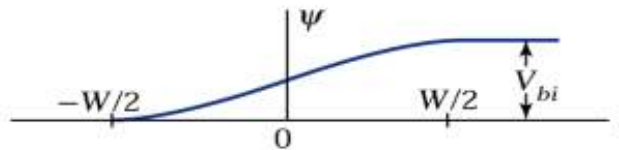
Chuyển tiếp biến đổi đều tuyến tính



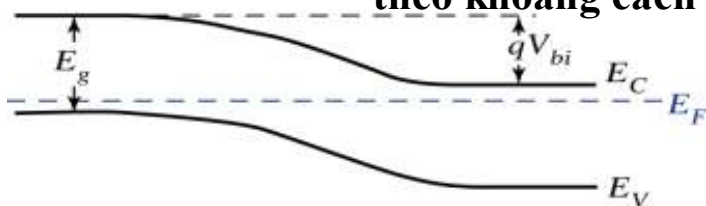
(a) Sự phân bố tạp chất



(b) Sự phân bố điện trường



(c) Sự phân bố điện thế
theo khoảng cách



(d) Giải đồ dải năng lượng

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-d\mathcal{E}}{dx} = \frac{-\rho_s}{\epsilon_s} = \frac{-q}{\epsilon_s} ax \quad -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2},$$

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{qa}{\epsilon_s} \left[\frac{(W/2)^2 - x^2}{2} \right]$$

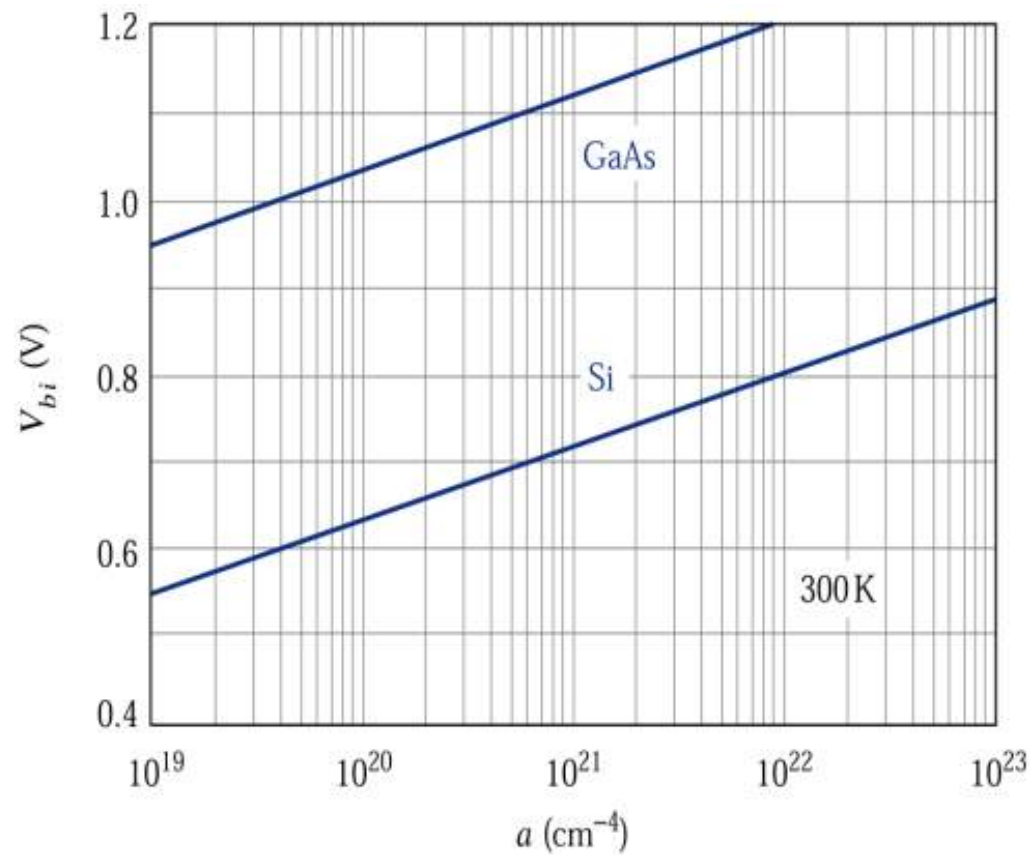
$$\mathcal{E}_m = \frac{qaW^2}{8\epsilon_s}$$

$$V_{bi} = \frac{qaW^3}{12\epsilon_s}$$

$$W = \left(\frac{12\epsilon_s V_{bi}}{qa} \right)^{1/3}$$

Với a là nồng độ tạp chất [cm^{-3}] và W là bề rộng miền nghèo [cm]

Rào thế V_{bi}



$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(aW/2)(aW/2)}{n_i^2} \right] = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{aW}{2n_i} \right).$$

EXAMPLE 3

For a silicon linearly graded junction with a impurity gradient of 10^{20} cm^{-4} , the depletion-layer width is $0.5 \text{ }\mu\text{m}$. Calculate the maximum field and built-in voltage ($T = 300 \text{ K}$) :

SOLUTION From Eq. 29a and Eq. 32, we obtain

$$\mathcal{E}_m = \frac{qaW^2}{8\epsilon_s} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{20} \times (0.5 \times 10^{-4})^2}{8 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14}} = 4.75 \times 10^3 \text{ V / cm},$$

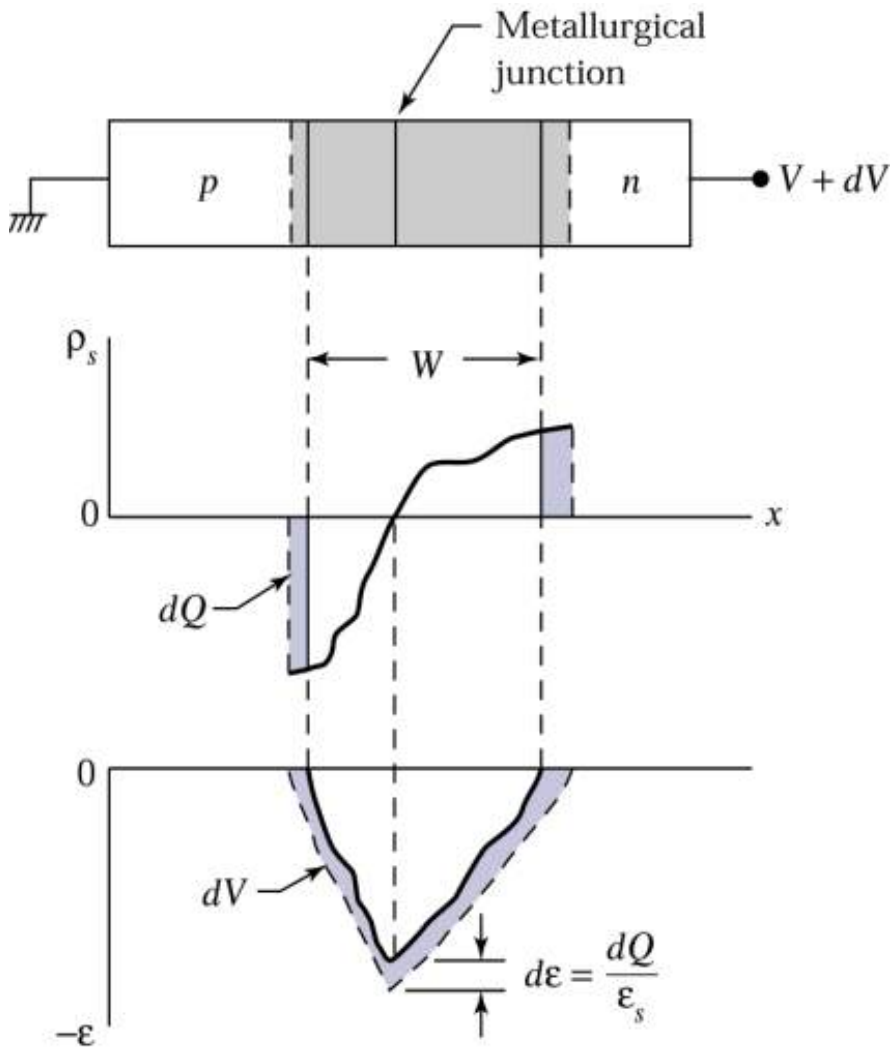
$$V_{bi} = \frac{2kT}{q} \left(\frac{aW}{2n_i} \right) = 2 \times 0.0259 \left(\frac{10^{20} \times 0.5 \times 10^{-4}}{2 \times 9.65 \times 10^9} \right) = 0.645 \text{ V}.$$

4.4 Điện dung miền nghèo

- Đặc tuyến điện dung-điện áp
(Capacitance-voltage characteristics)
- Đánh giá sự phân bố tạp chất
(Evaluation of impurity distribution)
- Diode biến dung (Varactor=Varicap)

Điện dung chuyển tiếp

Định nghĩa: C_j là *điện dung trên đơn vị diện tích* [mặt cắt ngang]



- Khi điện tích thay đổi đại lượng nhỏ dQ sẽ làm cho điện trường thay đổi 1 đại lượng nhỏ $dE = dQ/\epsilon_s$ (từ phương trình Poisson).
- Sự thay đổi tương ứng ở điện áp đưa vào dV được biểu diễn bằng diện tích gạch chéo ở hình bên và xấp xỉ bằng $WdE = WdQ/\epsilon_s$. Do đó C_j sẽ bằng

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W \frac{dQ}{\epsilon_s}} = \frac{\epsilon_s}{W}$$

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} \text{ F/cm}^2.$$

Đặc tuyến điện dung-điện áp

- Phân cực ngược

- Điện dung chuyển tiếp

- Phân cực thuận

- Điện dung khuếch tán

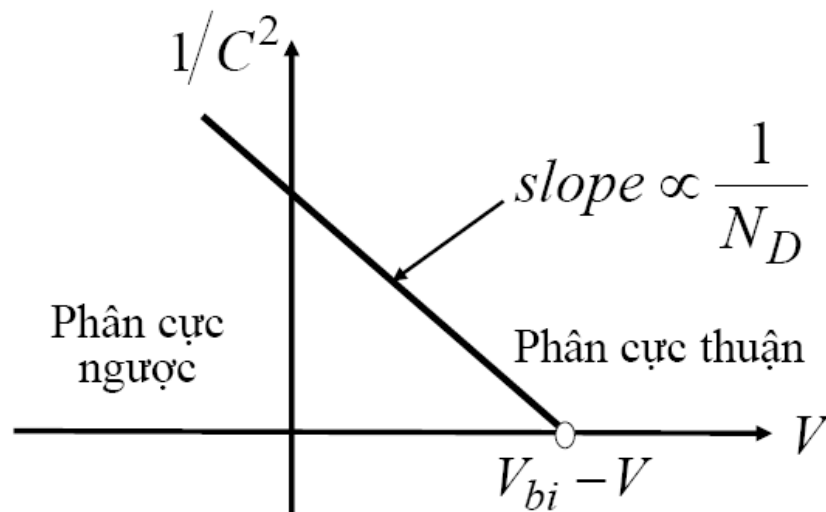
- » Từ hạt dẫn chuyển động

- Điện dung chuyển tiếp

- Với chuyển tiếp bước 1 bên

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2(V_{bi} - V)}}$$

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_s N_B}$$



- Đồ thị của $1/C_j^2$ theo V là đường thẳng, Độ dốc của đường thẳng này cho biết nồng độ tạp chất N_B của miền nền
- Phần giao (tại $1/C_j^2 = 0$) cho V_{bi}

EXAMPLE 4

For a silicon one-sided abrupt junction with $N_A = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $N_D = 8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, calculate the junction capacitance at zero bias and reversed bias of 4 V ($T = 300 \text{ K}$).

SOLUTION From Eqs. 12, 27, and 34, we obtain at zero bias

$$V_{bi} = 0.0259 \ln \frac{2 \times 10^{19} \times 8 \times 10^{15}}{(9.65 \times 10^9)^2} = 0.906 \text{ V},$$

$$W|_{V=0} \cong \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.906}{1.6 \times 10^{-19} \times 8 \times 10^{15}}} = 3.86 \times 10^{-5} = 0.386 \text{ } \mu\text{m},$$

$$C_J|_{V=0} = \frac{\epsilon_s}{W|_{V=0}} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2V_{bi}}} = 2.728 \times 10^{-8} \text{ F / cm}^2.$$

From Eqs. 27 and 34, we can obtain at reverse bias of 4 V:

$$W|_{V=-4} \cong \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \times 11.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times (0.906 + 4)}{1.6 \times 10^{-19} \times 8 \times 10^{15}}} = 8.99 \times 10^{-5} = 0.899 \text{ } \mu\text{m},$$

$$C_J|_{V=-4} = \frac{\epsilon_s}{W|_{V=-4}} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V)}} = 1.172 \times 10^{-8} \text{ F / cm}^2.$$

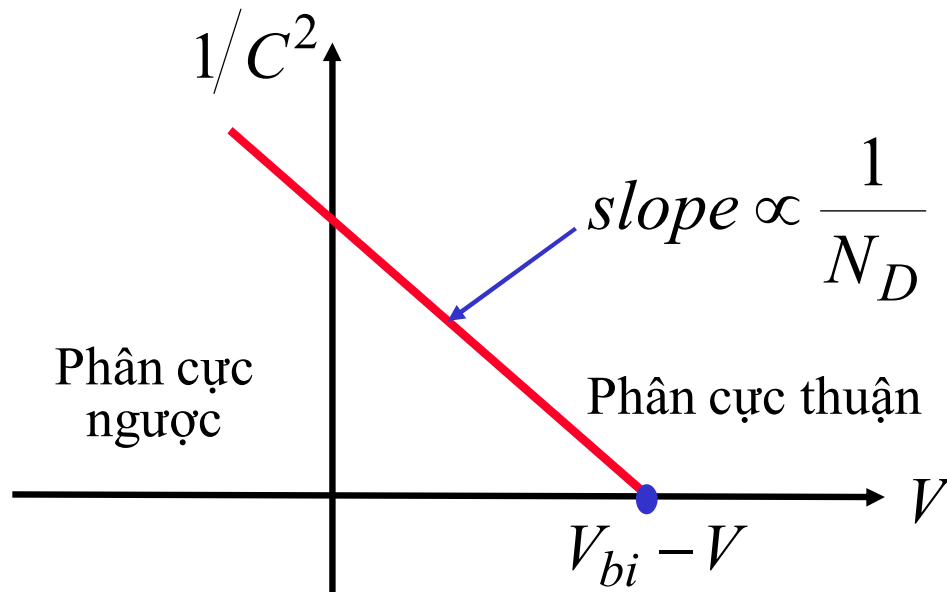
(f) Điện dung lớp nghèo (Depletion layer capacitance):

→ Xét chuyển tiếp p^+n , hay chuyển tiếp 1 bên, sẽ có W:

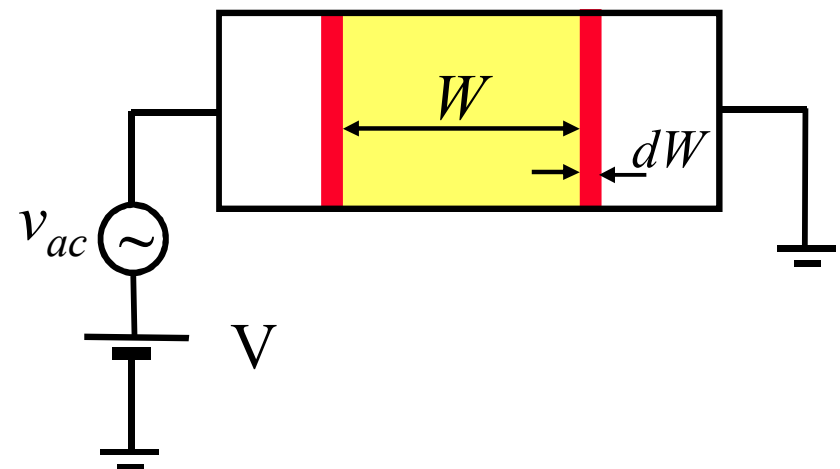
$$W = \sqrt{\frac{2k_s\epsilon_0(V_{bi} \mp V)}{qN_D}}$$

→ Điện dung miền nghèo được tính bằng:

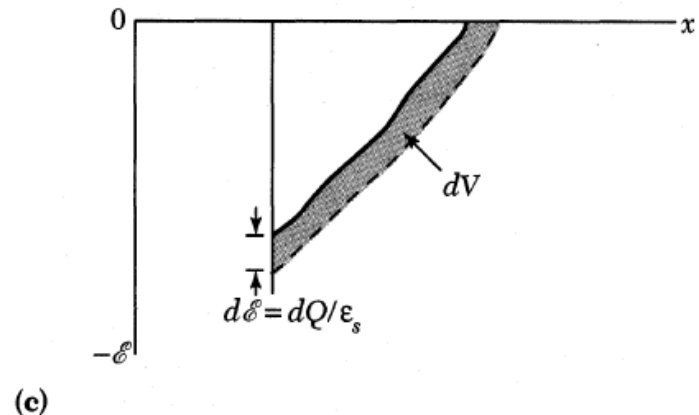
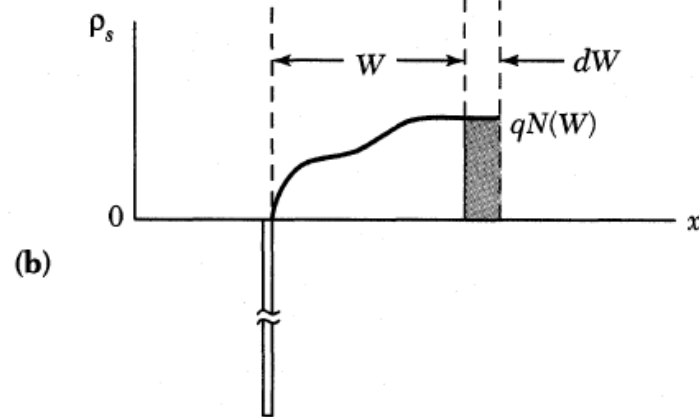
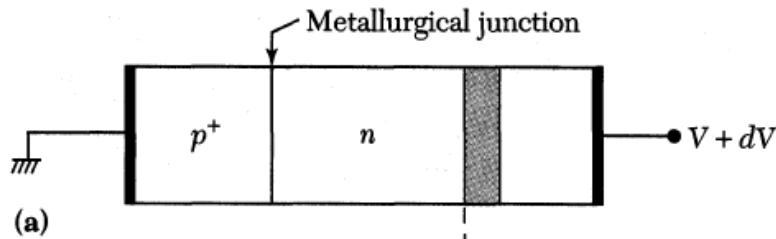
$$C = \frac{dQ_c}{dV} = \frac{qN_D dW}{dV} = \sqrt{\frac{qN_D k_s \epsilon_0}{2(V_{bi} \mp V)}} \rightarrow \frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} \mp V)}{qN_D k_s \epsilon_0}$$



Thiết lập đo lường:



Đánh giá sự phân bố tạp chất



Xét chuyển tiếp p+-n với pha tạp chất bên N:

$$dV \cong (d\phi) W = \left(\frac{dQ}{\epsilon_s} \right) W = \frac{qN(W) dW^2}{2\epsilon_s}$$

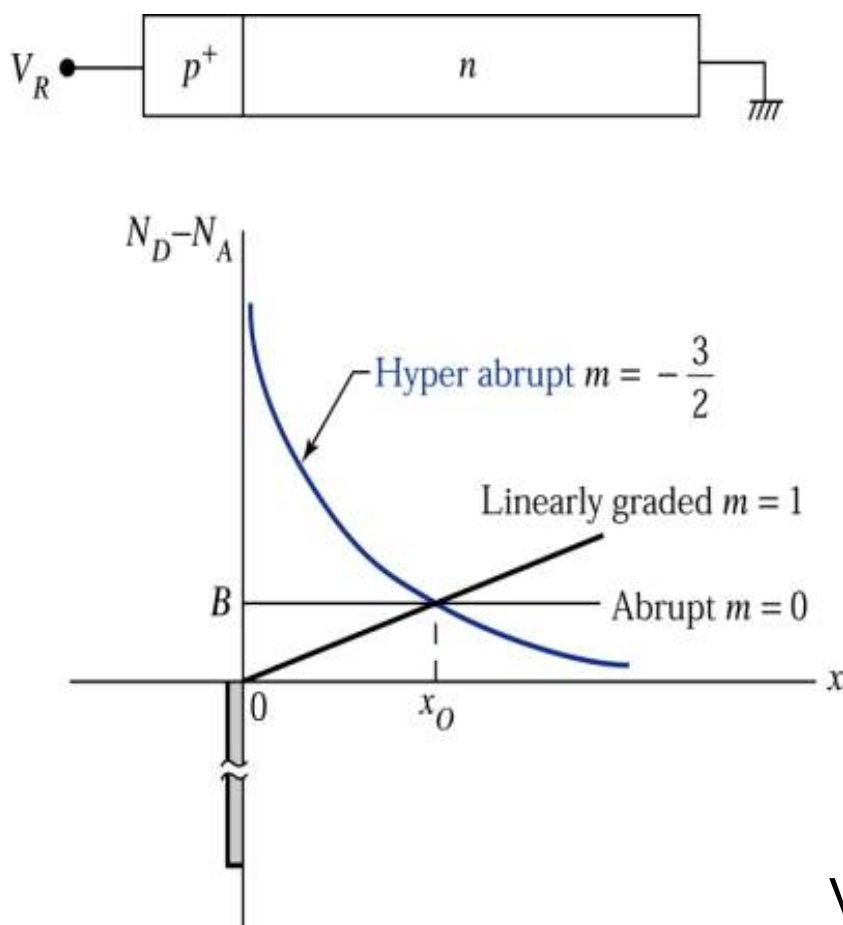
Biểu thức của nồng độ tạp chất ở cạnh miền nghèo

$$N(W) = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[\frac{1}{d(1/C_j^2)/dV} \right]$$

Như vậy ta có thể đo điện dung trên diện tích đơn vị với điện áp phân cực ngược và vẽ $1/C_j^2$ theo V .

Độ dốc của đồ thị $= d(1/C_j^2)/dV$, cho nồng độ $N(W)$

Diode biến dung (Varactor=Varicap)



Sử dụng tính chất điện dung miền nghèo thay đổi theo điện áp phân cực ngược:

$$C_j \propto (V_{bi} + V_R)^{-n}$$

$$C_j \propto (V_R)^{-n} \quad \text{với} \quad V_R \gg V_{bi}$$

Với $n=1/3$ cho chuyển tiếp biến đổi đều
 $n=1/2$ cho chuyển tiếp bước
 $n>1/2$ cho chuyển tiếp hyperabrupt

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -B \left(\frac{x}{x_0} \right)^m \quad W \propto (V_R)^{1/(m+2)}$$

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} \propto (V_R)^{-1/(m+2)}$$

Với $m=-3/2$, thì $n=2$, khi đó varactor này được nối với điện cảm L. tần số cộng hưởng:

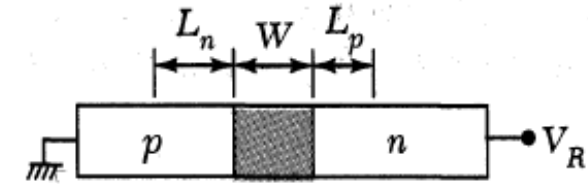
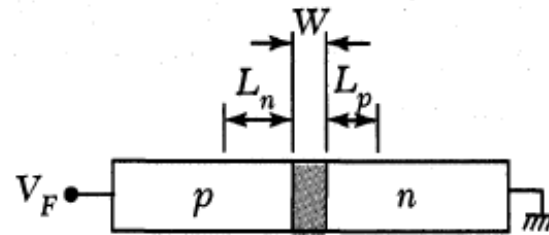
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_j}} \propto \frac{1}{\sqrt{V_R^{-n}}} = V_R \quad \text{với} \quad n = 2$$

4.5 Đặc tuyến dòng-áp

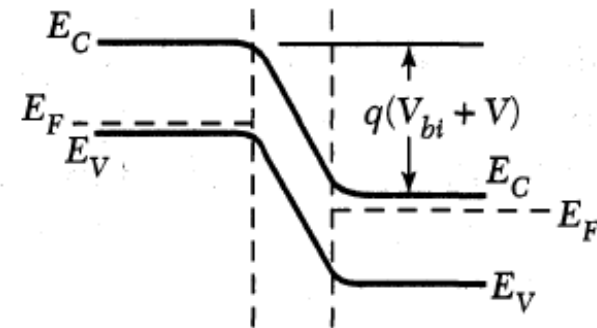
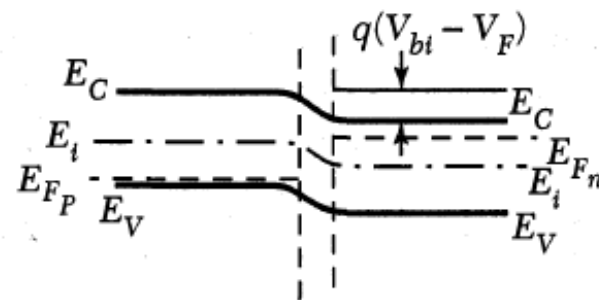
- Khi đưa điện áp vào chuyển tiếp p-n nó sẽ phá sự cân bằng chính xác giữa dòng điện khuếch tán và dòng điện trôi của điện tử và lỗ:
 - Với ***phân cực thuận***, điện áp đưa vào làm giảm thế tĩnh điện trên miền nghèo (xem phần giữa hình 16a). Dòng điện trôi bị giảm so với ***dòng điện khuếch tán***. Ta có sự khuếch tán mạnh hơn của lỗ từ bên P sang N và của điện tử từ bên N sang P. Do đó sự ***bơm hạt dẫn thiểu số*** xảy ra (minority carrier injection), nghĩa là, điện tử được bơm vào bên P, trái lại lỗ được bơm vào bên N.
 - Với ***phân cực ngược***, điện áp đưa vào làm tăng thế tĩnh điện trên miền nghèo (xem phần giữa hình 16b). Điều này làm giảm đáng kể dòng điện khuếch tán, dẫn đến kết quả là có ***dòng điện ngược nhỏ***.
- Trong phần này, trước hết ta xét đặc tuyến dòng-áp lý tưởng (ideal current-voltage characteristics) và sau đó từ các xét ảnh hưởng do sự sinh và tái hợp và do các hiệu ứng khác.

Hình 16. Chuyển tiếp PN với phân cực thuận (V_F) và phân cực ngược (V_R)

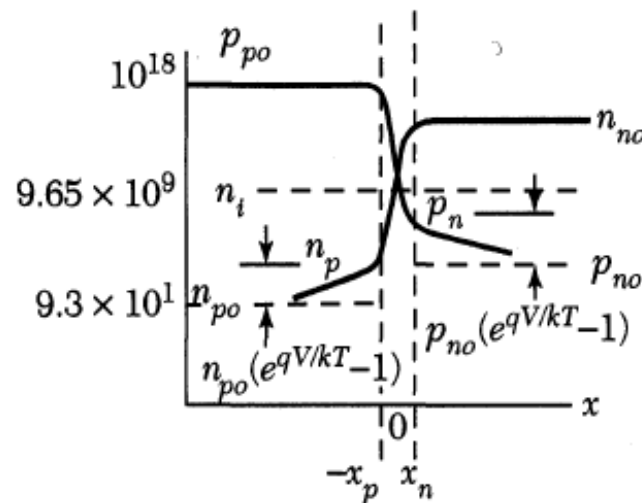
Miền nghèo



Giải đồ
dải năng lượng

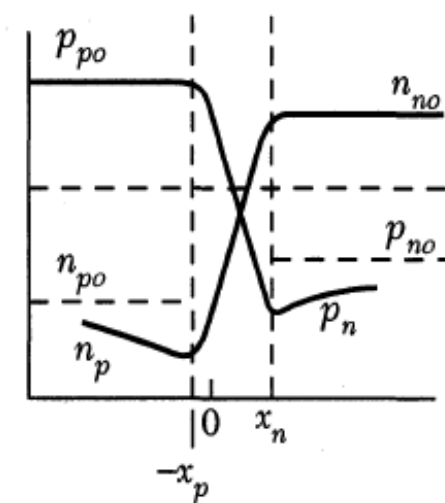


Phân bố
hạt dẫn



(a)

Phân cực thuận



(b)

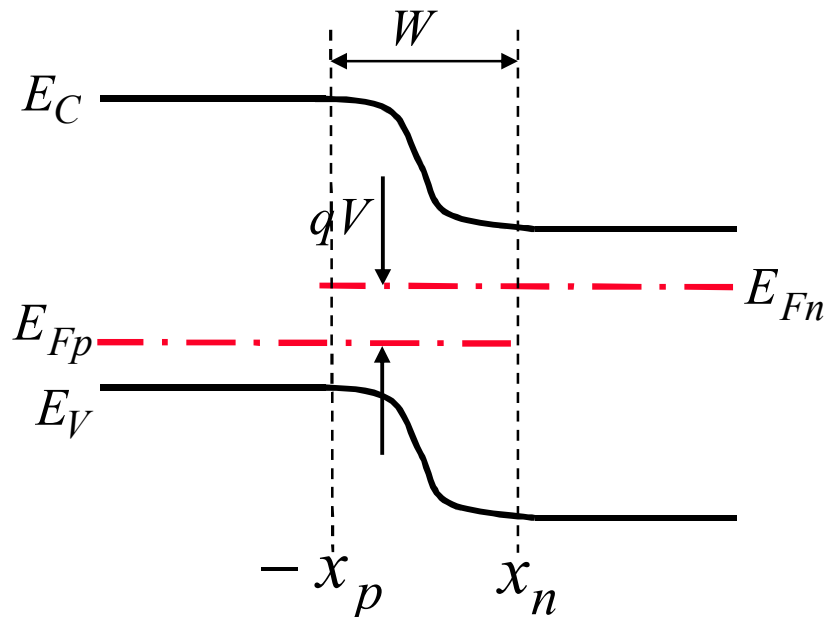
Phân cực ngược

4.5.1 Đặc tuyến dòng-áp lý tưởng

Giả sử:

- Xấp xỉ miền nghèo bước; bên ngoài miền nghèo giả sử trung hòa điện.
- Mật độ hạt dẫn tại các biên liên hệ với hiệu điện thế tĩnh điện trên chuyển tiếp
- Bơm mức thấp (Low-level injection) → mật độ hạt dẫn thiểu số được bơm vào phải nhỏ hơn nhiều mật độ hạt dẫn đa số
- Không có sự sinh-tái hợp trong miền điện tích không gian SCR (space-charge region)

(a) Miền nghèo:



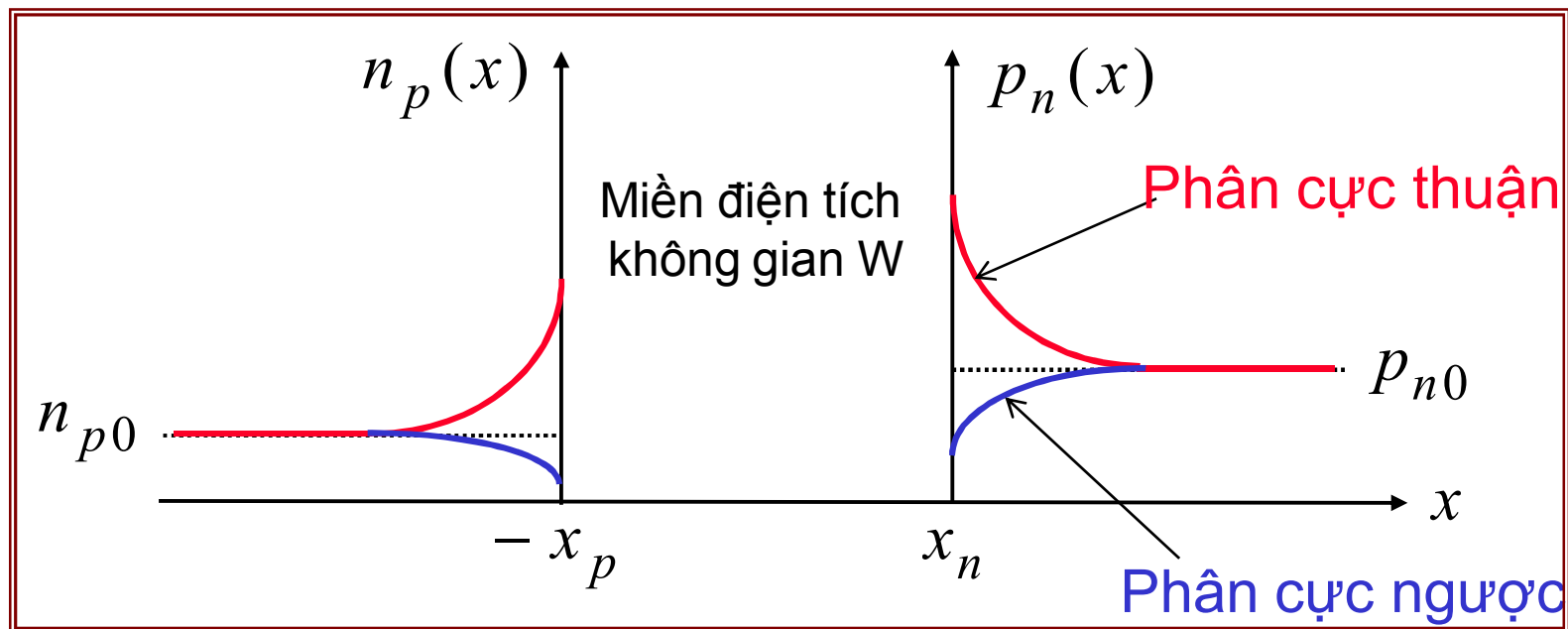
$$np = n_i^2 \exp(V / V_T)$$
$$n_p(-x_p) = n_{p0} \exp(V / V_T)$$
$$p_n(x_n) = p_{n0} \exp(V / V_T)$$

(b) Những miền [tựa] trung hòa (Quasi-neutral regions):

- Sử dụng các phương trình liên tục của hạt dẫn thiểu số, ta có được các biểu thức sau cho các mật độ lỗ và điện tử thừa trong miền tựa trung hòa:

$$\Delta p_n(x) = p_{n0}(e^{V/V_T} - 1)e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$\Delta n_p(x) = n_{p0}(e^{V/V_T} - 1)e^{(x+x_p)/L_n}$$



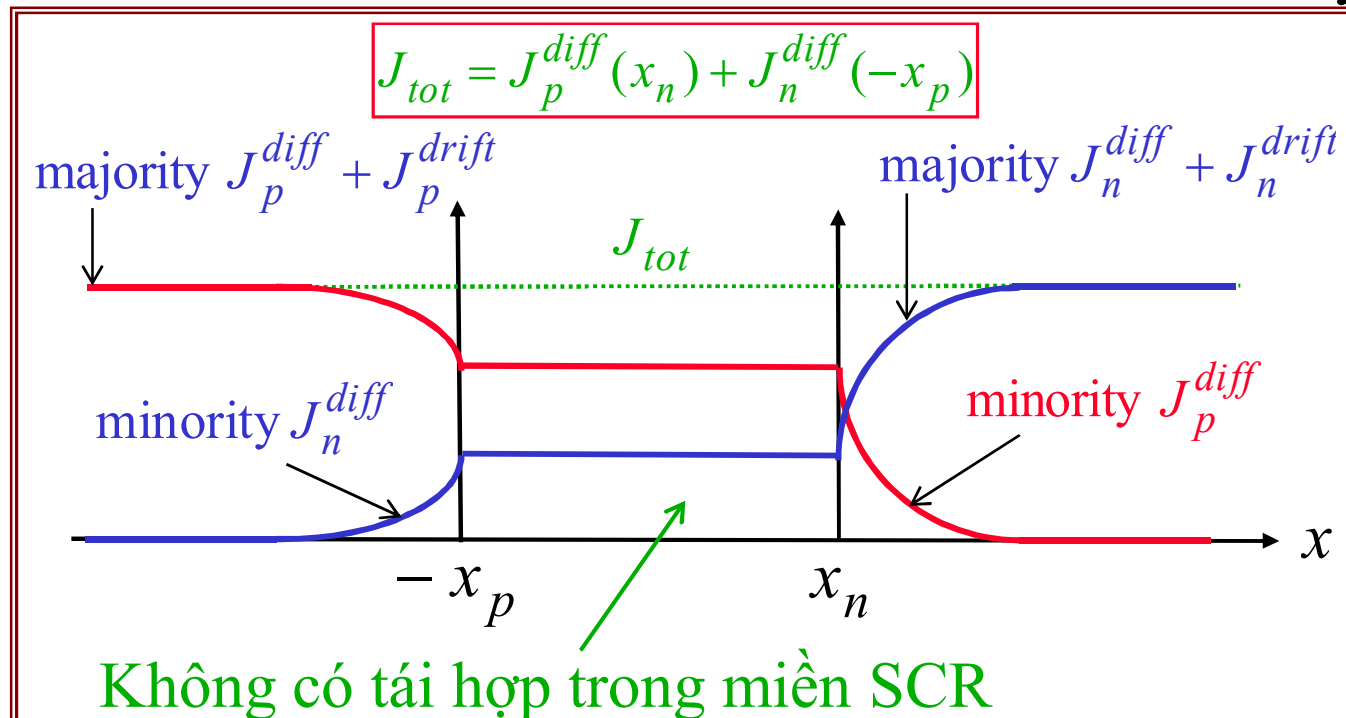
Với L_p là chiều dài khuếch tán của lỗ trong miền N có trị là $\sqrt{D_p \tau_p}$.

- Tương ứng với những mật độ dòng **khuyết tán**:

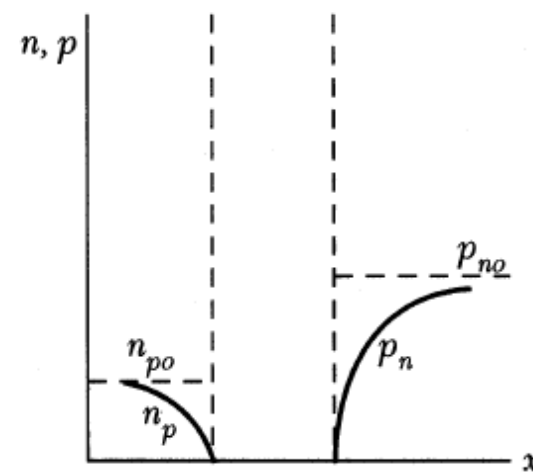
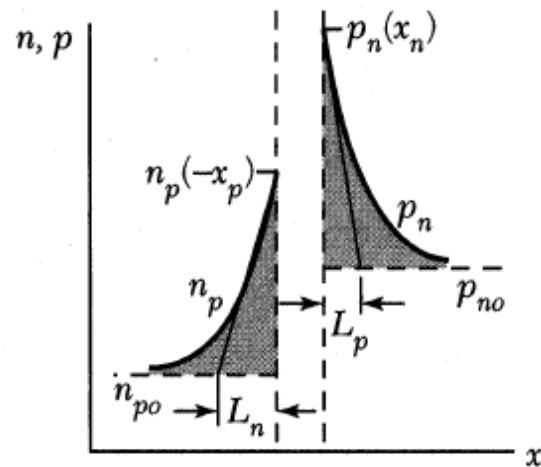
$$J_p^{diff}(x) = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$J_n^{diff}(x) = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} (e^{V/V_T} - 1) e^{(x+x_p)/L_n}$$

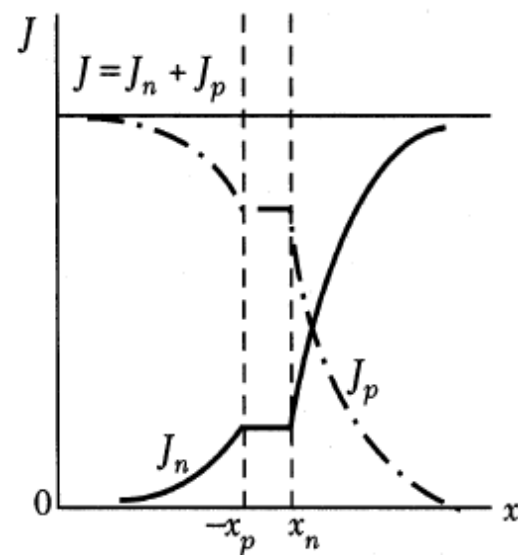
Mô hình Shockley



Phân bố của
hạt dẫn thiểu số
được bơm vào

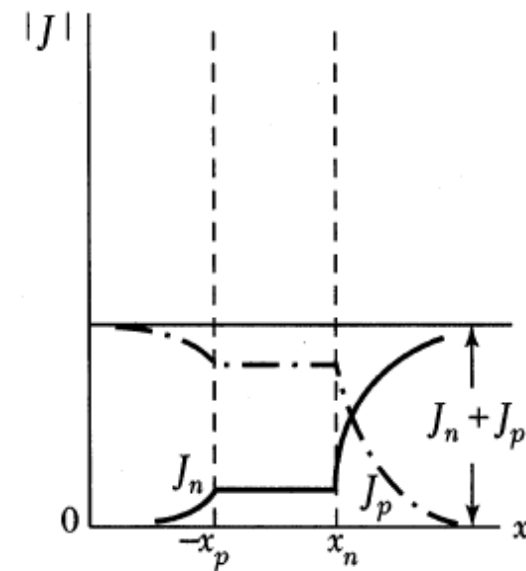


Mật độ dòng
điện tử và
lỗ [lý tưởng]
($J = I/A$)



(a)

Phân cực thuận



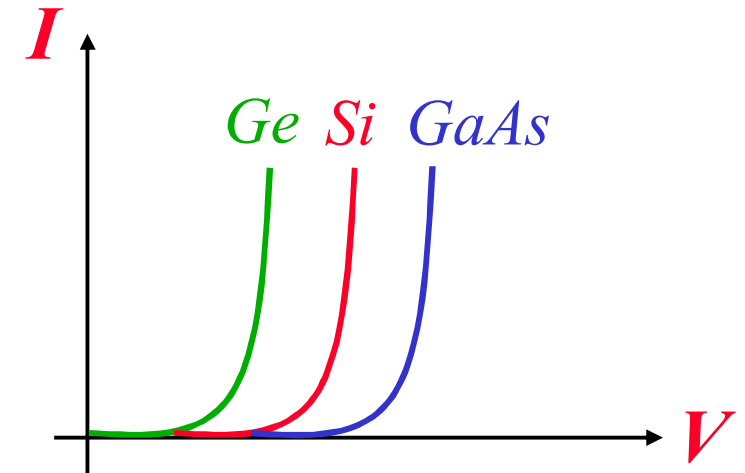
(b)

Phân cực ngược

(c) Mật độ dòng điện tổng cộng:

- Dòng tổng cộng bằng **tổng** của **những dòng điện khuếch tán hạt dẫn thiểu số** được định nghĩa ở các cạnh của SCR:

$$\begin{aligned} I_{tot} &= I_p^{diff}(x_n) + I_n^{diff}(-x_p) \\ &= qA \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) (e^{V/V_T} - 1) \end{aligned}$$

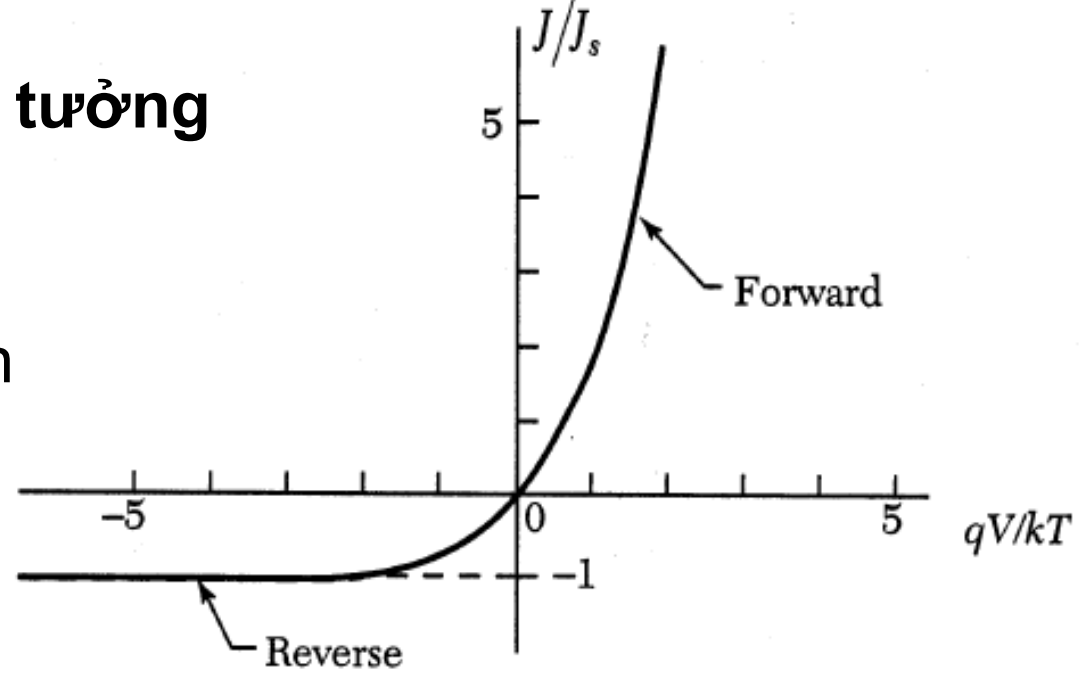


- Dòng bão hòa ngược (Reverse saturation current) I_s :

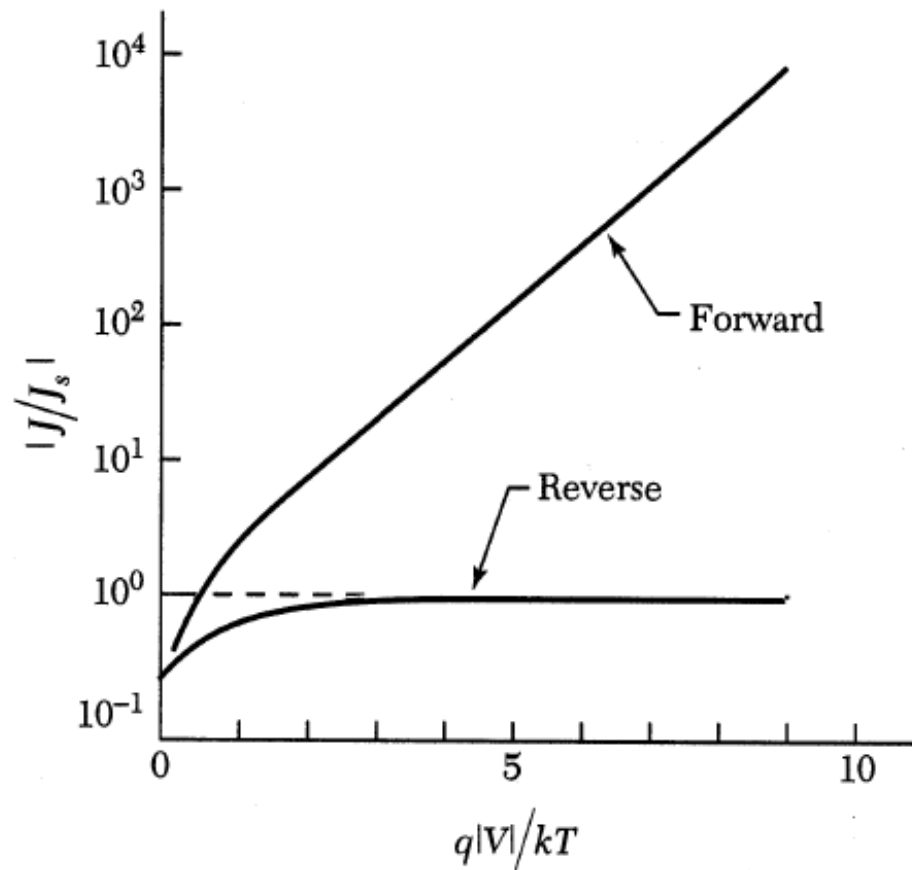
$$I_s = qA \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right) = qA n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

Đặc tuyến dòng-áp lý tưởng

(a) Đồ thị tuyến tính

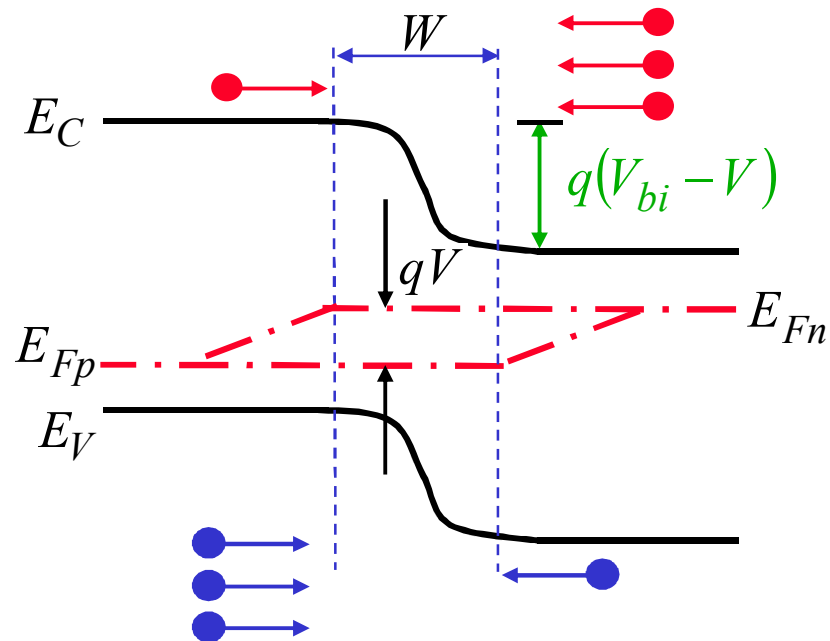


(b) Đồ thị semilog

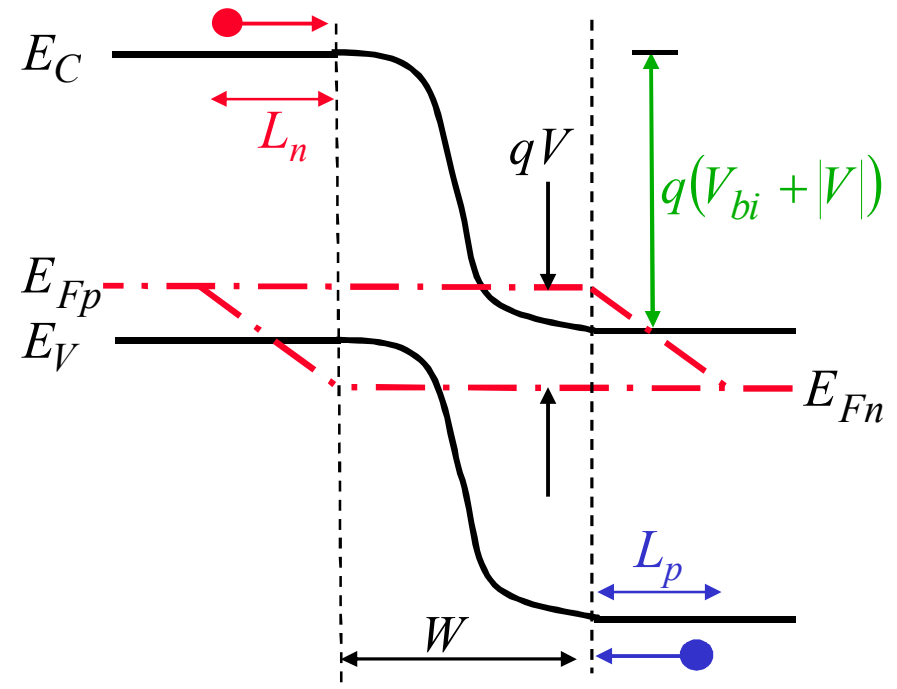


(d) Nguồn gốc của dòng điện:

Phân cực thuận



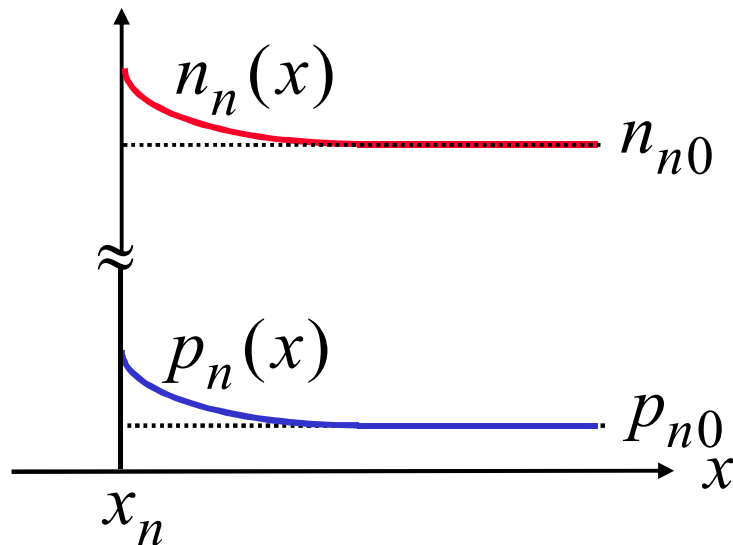
Phân cực ngược



Dòng bão hòa ngược là do các hạt dẫn thiểu số bị thu thập qua khoảng cách cỡ chiều dài khuếch tán.

(e) Dòng điện hạt dẫn đa số:

- Xét một diode được phân cực thuận dưới các điều kiện bơm mức thấp :



Tính tựa trung hòa cần:

$$\Delta n_n(x) \approx \Delta p_n(x)$$

Điều này dẫn đến:

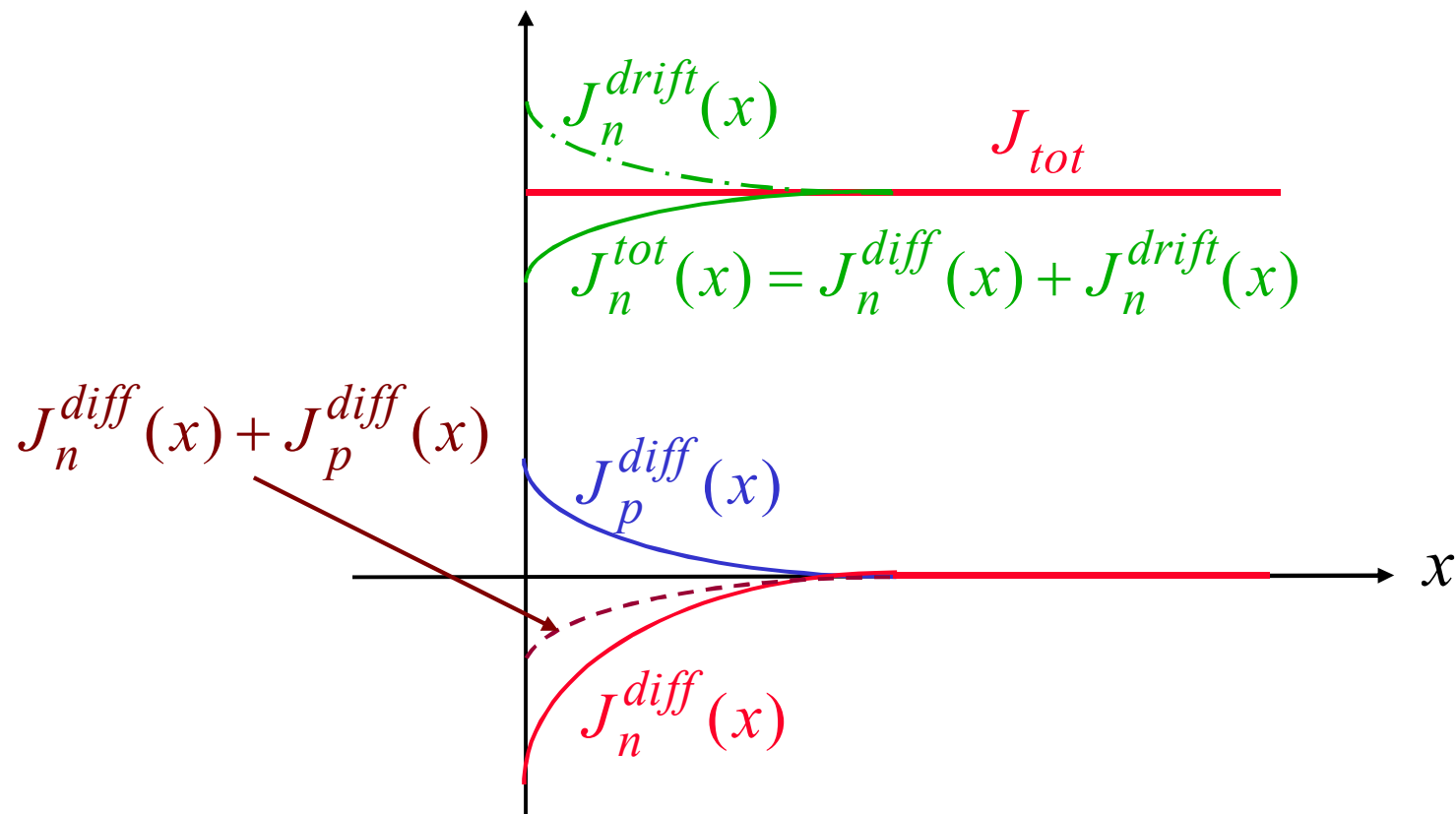
$$J_n^{diff}(x) = -\frac{D_n}{D_p} J_p^{diff}(x)$$

- Dòng lỗ tổng cộng trong miền tựa trung hòa (quasi-neutral regions):

$$J_p^{tot}(x) = J_p^{diff}(x) + J_p^{drift}(x) \approx J_p^{diff}(x)$$

- Dòng trôi điện tử trong miền tựa trung hòa:

$$J_n^{diff}(x) = J_{tot} + \left(\frac{D_n}{D_p} - 1 \right) J_p^{diff}(x), \quad E(x) \approx \frac{1}{qn(x)\mu_n} J_n^{diff}(x)$$



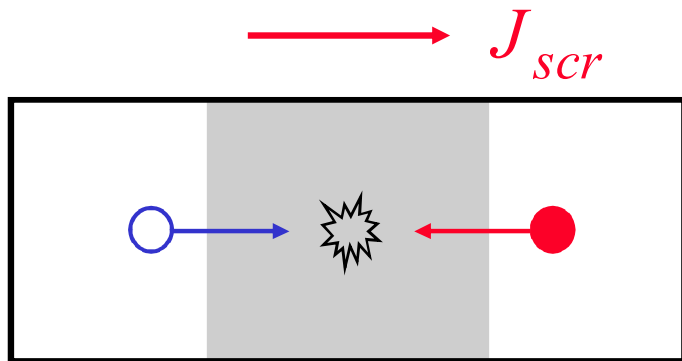
(f) Các giới hạn của mô hình Shockley :

- Mô hình Shockley (được đơn giản hóa) mô tả chính xác đặc tuyến I-V của các diode Ge ở những mật độ dòng điện thấp.
- Đối với các diode Si và Ge, người ta cần kể đến nhiều hiệu ứng không lý tưởng quan trọng như:
 - ➔ **Sự sinh và tái hợp** của các hạt dẫn trong miền nghèo.
 - ➔ **Những hiệu ứng điện trở nối tiếp** do sụt áp trong những miền tựa trung hòa.
 - ➔ **Đánh thủng chuyển tiếp xúc** ở những phân cực ngược cao do hiệu ứng đường hầm và ion hóa va chạm.

4.5.2 Những hiệu ứng sinh-tái hợp và sự bơm [vào] mức cao

Những tính chất không lý tưởng trong chuyển tiếp PN:

(A) Những dòng điện sinh và tái hợp



- Phương trình liên tục của lỗ:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_p - R_p$$

- Trạng thái xác lập và quá trình không có ánh sáng:

$$\partial p / \partial t = 0, G_p = 0$$

- [Mật độ] Dòng tái hợp tại SCR :

$$\int_{-x_p}^{x_n} dJ_p(x) = J_p(x_n) - J_p(-x_p) = -q \int_{-x_p}^{x_n} R_p dx$$

$$J_{scr} = q \int_{-x_p}^{x_n} R_p dx$$

Các điều kiện phân cực ngược:

- Nồng độ n và p có thể được bỏ qua trong miền nghèo:

$$R \approx \frac{-n_i^2}{\tau_p n_1 + \tau_n p_1} = -\frac{n_i}{\tau_g}, \quad \tau_g = \tau_p \exp\left(\frac{E_t - E_i}{k_B T}\right) + \tau_n \exp\left(\frac{E_i - E_t}{k_B T}\right)$$



Thời gian sống để sinh hạt dẫn

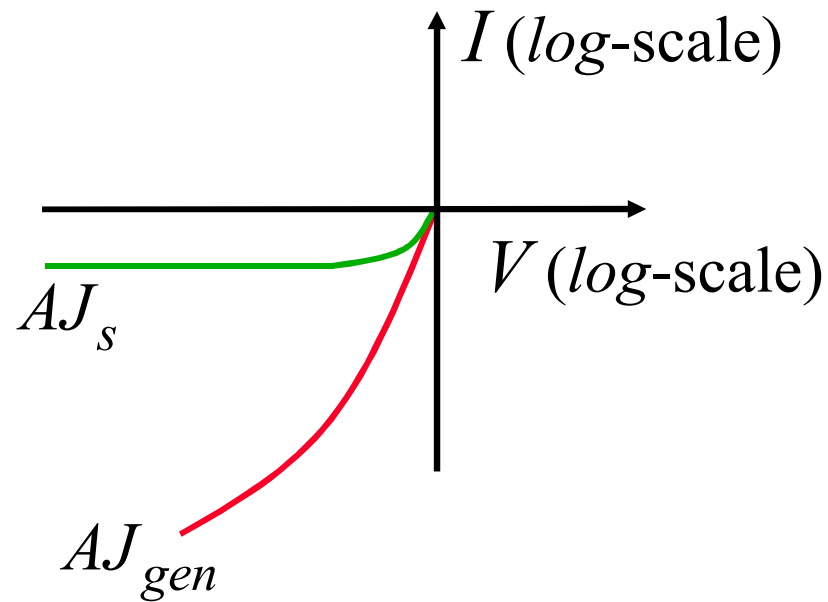
- Dòng SCR thực ra là dòng sinh:

$$J_{scr} = -J_{gen} = -\frac{qn_i W}{\tau_g} \rightarrow J_{gen} = \frac{qn_i W}{\tau_g} \propto \sqrt{V_{bi} - V}$$

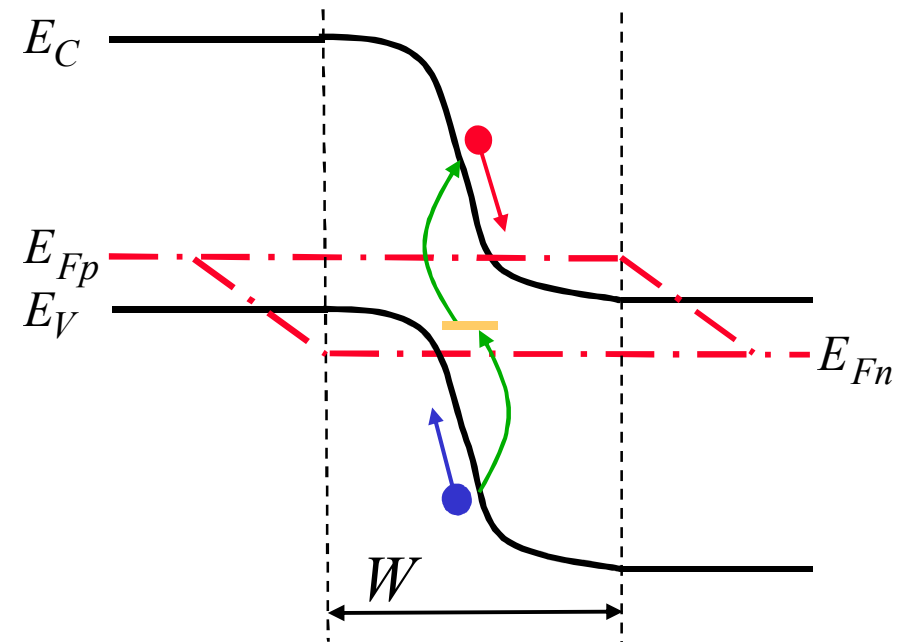
- Dòng bão hòa ngược tổng cộng:

$$J = J_s \left(e^{V/V_T} - 1 \right) + J_{scr} \xrightarrow{|V| > V_T} -\left(J_s + J_{gen} \right)$$

- Dòng sinh thẳng thể khi n_i nhỏ, đây là trường hợp thường thấy trong các diode *Si* và *GaAs*.



Đặc tuyến I - V dưới
điều kiện phân cực ngược



Các hạt dẫn sinh ra bị
quét ra khỏi miền nghèo

Các điều kiện phân cực thuận:

- Nồng độ n và p lớn trong miền nghèo:

$$np = n_i^2 e^{V/V_T} \rightarrow R = \frac{n_i^2 (e^{V/V_T} - 1)}{\tau_p (n + n_1) + \tau_n (p + p_1)}$$

- Điều kiện để tốc độ tái hợp cực đại:

$$n = p = n_i e^{V/2V_T}$$
$$R_{\max} \approx \frac{n_i^2 e^{V/V_T}}{n\tau_p + p\tau_n} = \frac{n_i}{\tau_{rec}} e^{V/2V_T}, \quad \tau_{rec} = \tau_p + \tau_n$$

Thời gian sống tái hợp
↓

- Ước lượng dòng tái hợp:

$$J_{scr}^{\max} = \frac{qn_i W}{\tau_{rec}} e^{V/2V_T}$$

- Biểu thức chính xác cho dòng tái hợp:

$$J_{scr} = \frac{qn_i\Phi}{\tau_{rec}} e^{V/2V_T}, \quad \Phi = \sqrt{\frac{\pi}{2}} V_T \frac{1}{E_{np}}, \quad E_{np} = \sqrt{\frac{qN_D(2V_{bin} - V)}{k_s\epsilon_0}}$$

- Các sửa đổi với mô hình:

$$J_{scr} = \frac{qn_i\Phi}{\tau_{rec}} e^{V/m_r V_T}$$

- Dòng thuận tổng cộng:

$$J = J_s \left(e^{V/V_T} - 1 \right) + \frac{qn_i\Phi}{\tau_{rec}} e^{V/m_r V_T} = J_{s,eff} \left(e^{V/\eta V_T} - 1 \right)$$

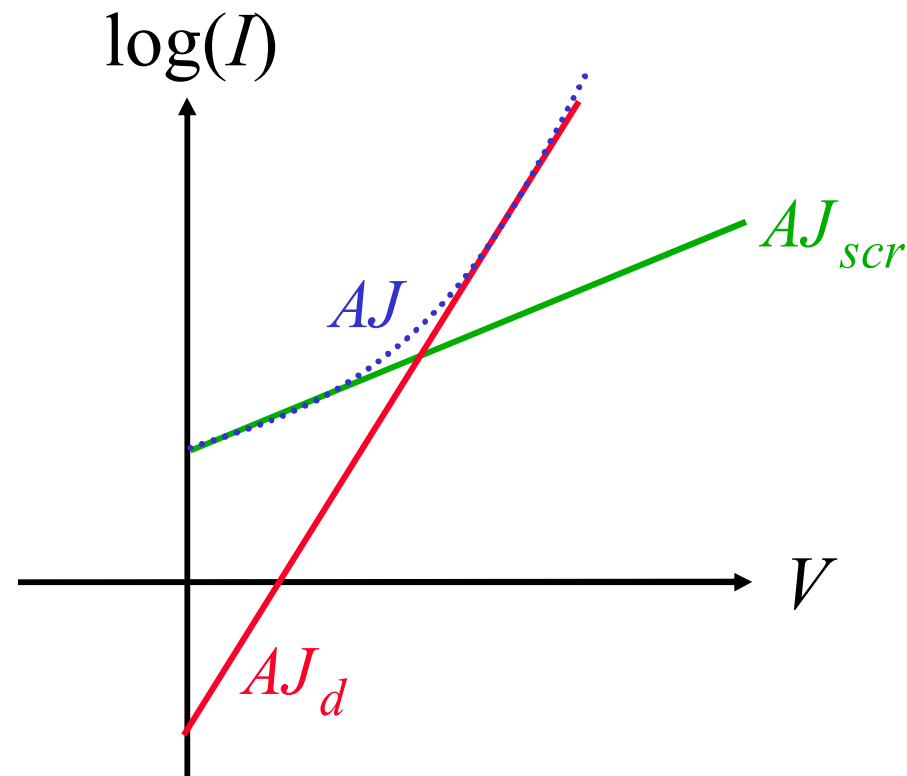
$\eta \rightarrow$ hệ số lý tưởng (ideality factor). Những sai biệt của η với 1 cho biết dòng tái hợp.

$$J_F \approx \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right),$$

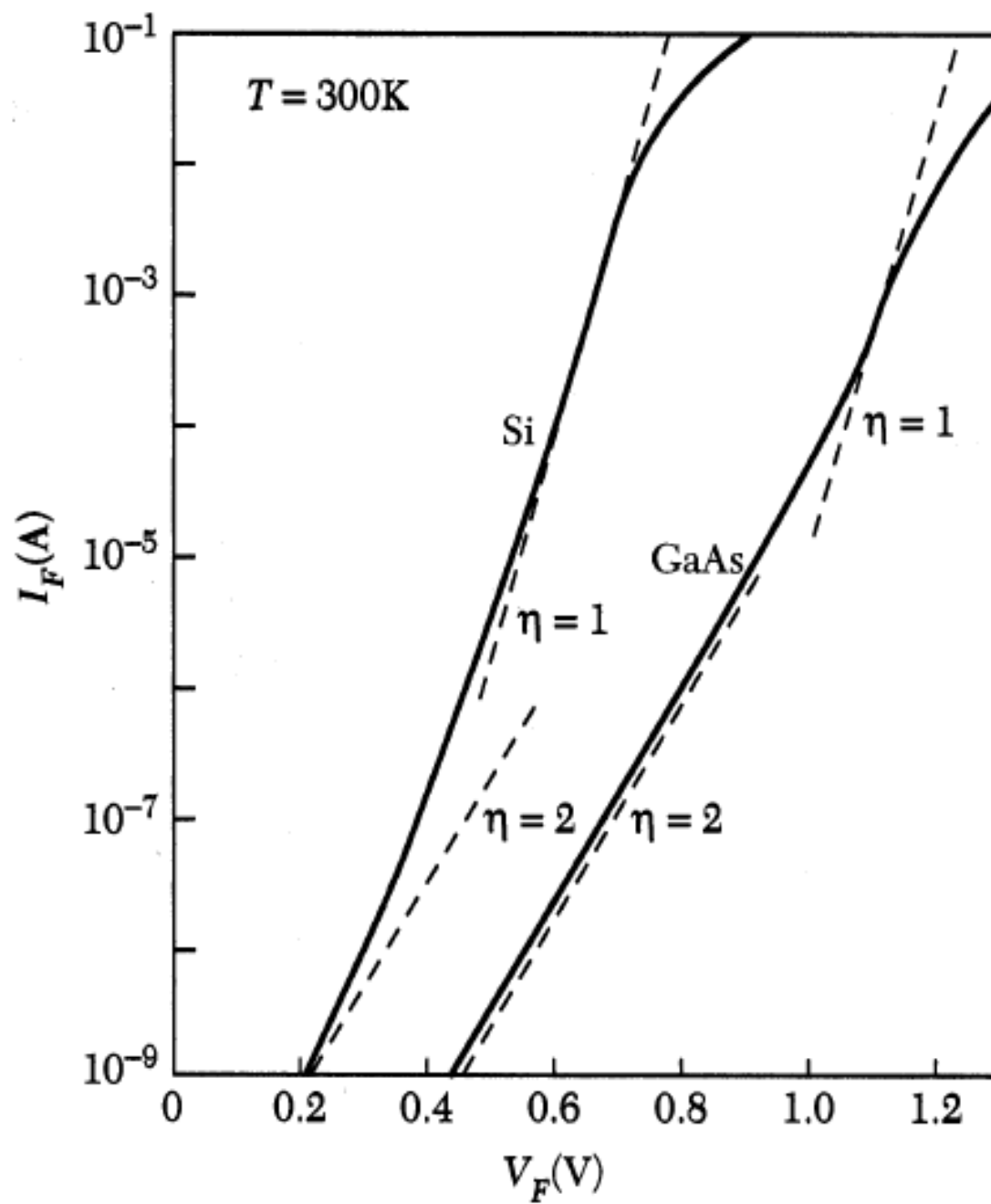
- ***Sự quan trọng của các hiệu ứng tái hợp:***

Điện áp thấp, n_i nhỏ $\rightarrow$ dòng tái hợp thẳng thể

Điện áp lớn $\rightarrow$ dòng khuếch tán thẳng thể



- Ở mức dòng điện thấp, dòng tái hợp thẳng thể và $\eta = 2$.
- Ở mức dòng điện cao hơn, dòng khuếch tán thẳng thể và η tiến tới 1.



So sánh đặc tuyến I-V phân cực thuận của diode Si và GaAs ở 300K. Các đường đứt nét chỉ các độ dốc với các hệ số lý tưởng khác.

Hiệu ứng của bơm mức cao

(B) Bơm mức cao

- Ở mức dòng điện cao hơn nữa, ta thấy rằng dòng điện lệch khỏi trường hợp lý tưởng $\eta=1$ và tăng lên từ từ với điện áp thuận. Hiện tượng này liên quan đến 2 hiệu ứng: **điện trở nối tiếp và bơm mức cao**.
- Trước hết ta xét **hiệu ứng điện trở nối tiếp**. Ở những mức dòng điện thấp và trung bình, sụt áp IR ở miền trung hòa thường nhỏ so với kT/q (26mV ở 300K), với I là dòng điện thuận và R là điện trở nối tiếp. Sụt áp làm giảm phân cực miền nghèo, do đó dòng điện I là

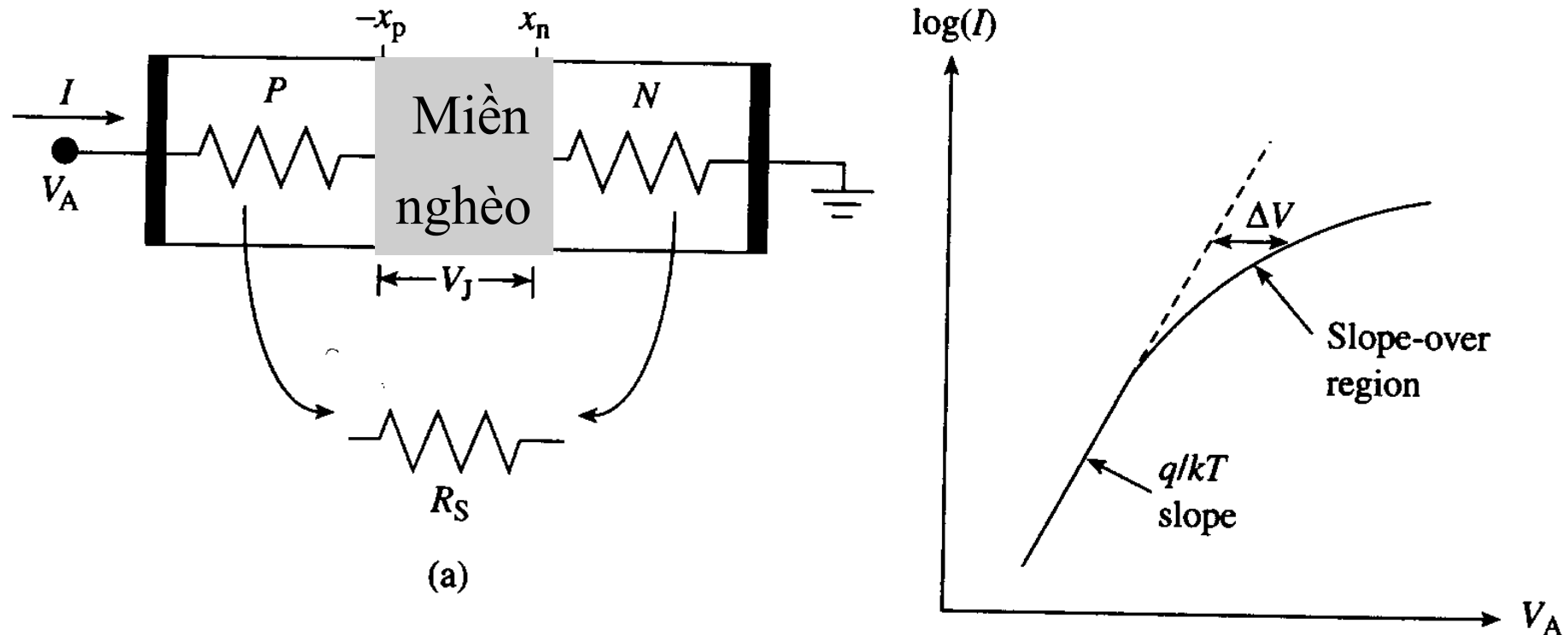
$$I \cong I_s \exp\left[\frac{q(V - IR)}{kT}\right] = \frac{I_s \exp(qV / kT)}{\exp\left[\frac{q(IR)}{kT}\right]}$$

và dòng khuếch tán lý tưởng bị giảm đi 1 đại lượng là $\exp[q(IR)/kT]$

- Ở mật độ dòng điện cao, mật độ hạt dẫn thiểu số được bơm vào có thể so sánh với nồng độ hạt dẫn đa số, nghĩa là $p_n(x=x_n) \cong n_n$

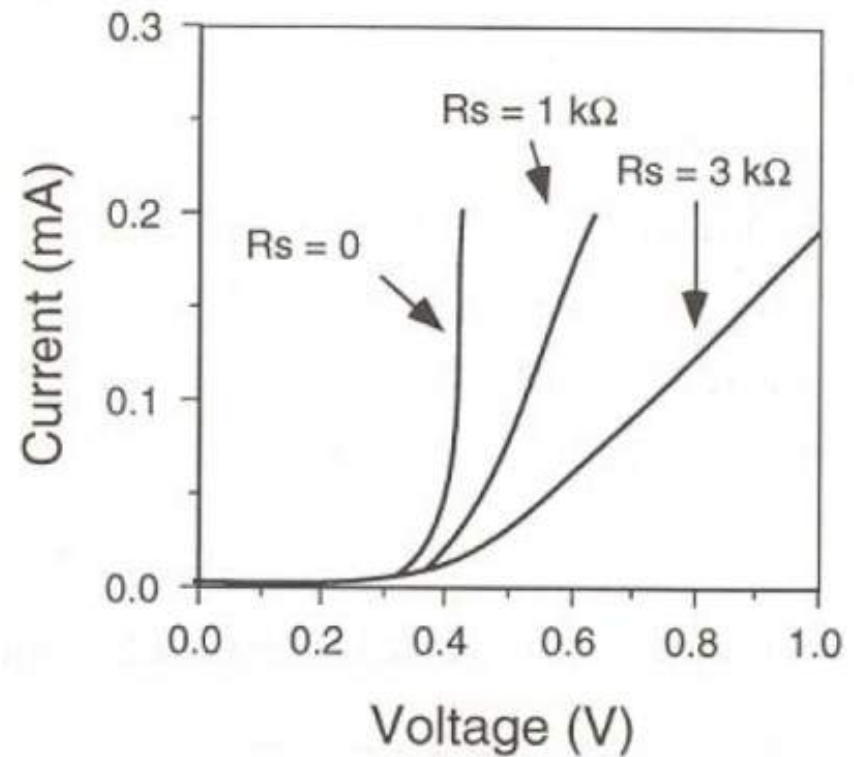
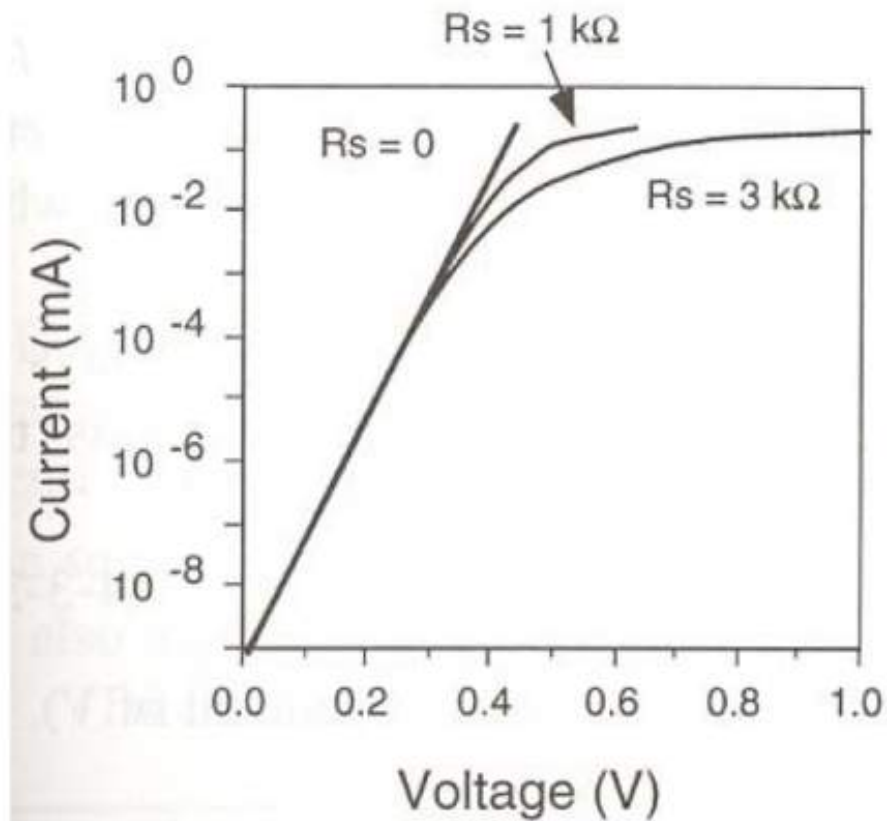
Đây là **điều kiện bơm cao**

Điện trở nối tiếp R_S



At higher current level, the effect of series resistance kicks in
Needs a larger applied voltage to achieve the same level of current

Ảnh hưởng của điện trở nối tiếp



Đặc tuyến semilog của dòng điện diode ở phân cực thuận

