



Bài 7

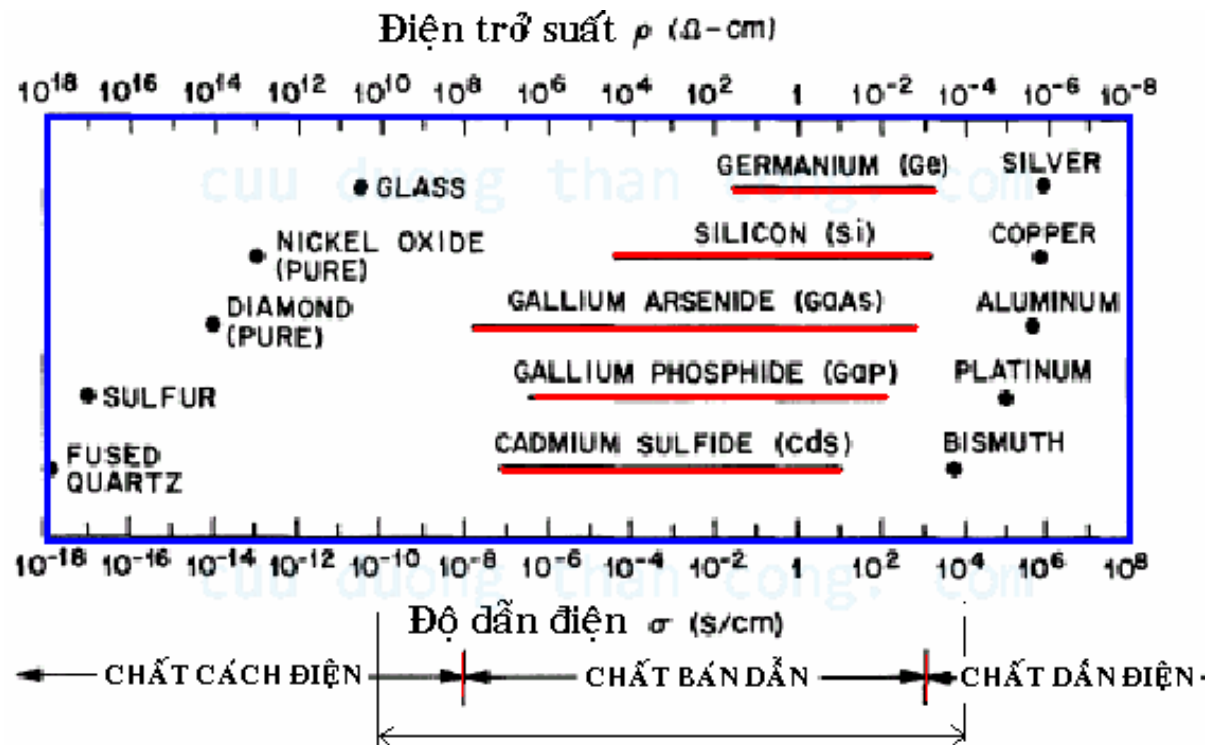
Các chất bán dẫn điện

Nuôi đơn tinh thể Ge

I. Các chất bán dẫn điện

Định nghĩa

- Chất bán dẫn là các chất có độ dẫn điện σ nằm trong khoảng
từ $10^{-10} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ (điện môi)
đến $10^4 \div 10^6 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ (kim loại)



- σ của chất bán dẫn *phụ thuộc nhiều vào các yếu tố bên ngoài* như nhiệt độ, áp suất, điện trường, từ trường, tạp chất ...

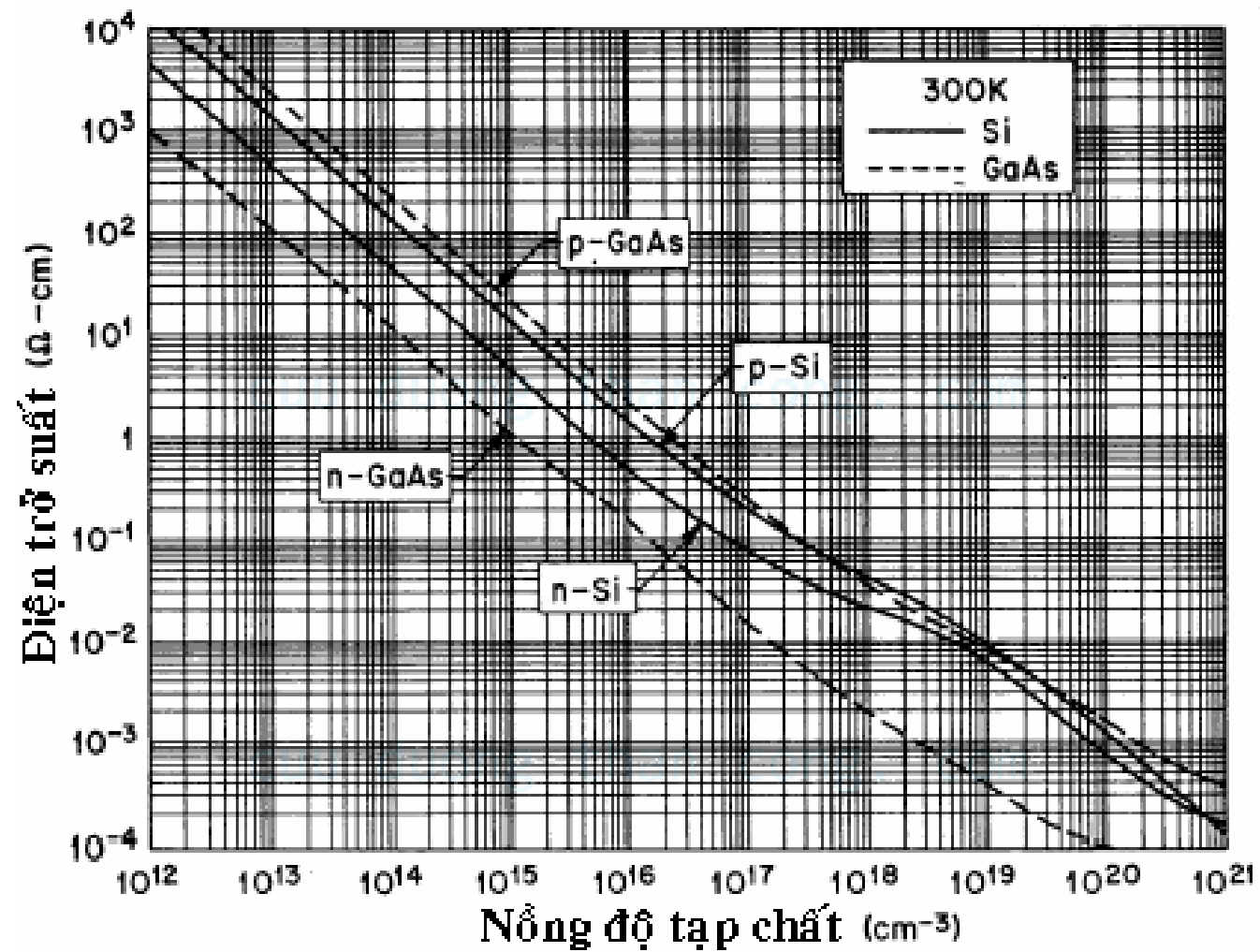
Tạp chất làm thay đổi rất nhiều độ dẫn điện của các chất bán dẫn

Pha tạp chất Bo vào tinh thể Si theo tỷ lệ 1 : 10^5 làm tăng độ dẫn điện của Si lên 1000 lần ở nhiệt độ phòng.

Sự phụ thuộc của điện trở suất ρ (Ωcm) của Si và GaAs vào nồng độ tạp chất ở 300K

Nồng độ tạp chất (cm^{-3})	Si		GaAs	
	N	P	N	P
n_i	$2 \cdot 10^5$		$7 \cdot 10^7$	
10^{14}	40	180	12	160
10^{15}	4,5	12	0,9	22
10^{16}	0,6	1,8	0,2	2,3
10^{17}	0,1	0,3	$9 \cdot 10^{-3}$	0,3
10^{18}	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
10^{19}	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$

Sự phụ thuộc của điện trở suất vào nồng độ tạp chất



Sự phụ thuộc của điện trở vào nhiệt độ

- **Kim loại** : Điện trở suất phụ thuộc nhiệt độ gần như tuyến tính

$$\rho_T = \rho_o [1 + \alpha_T (T - T_o)]$$

với ρ_T = điện trở suất ở nhiệt độ T (°C)

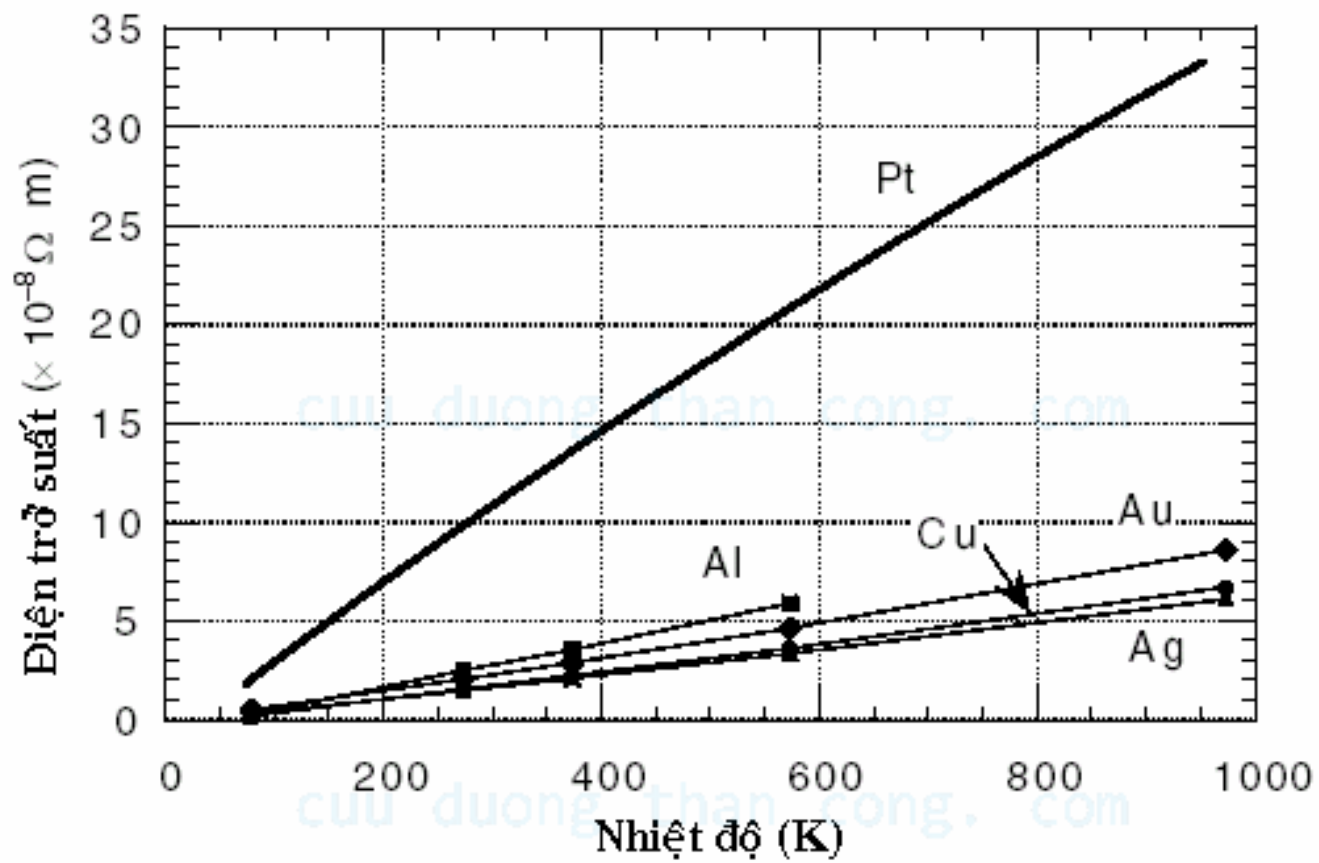
ρ_o = điện trở suất ở một nhiệt độ tham chiếu nào đó

T_o (thường là 0 hoặc 20°C) và

α_T = hệ số nhiệt của điện trở suất.

- Sự biến thiên của điện trở theo nhiệt độ

$$R_T = R_o [1 + \alpha_T (T - T_o)]$$



Vật liệu	Đ trở suất ρ (ohm m)		Hệ số nhiệt trên độ C	Độ dẫn điện σ $\times 10^7 / \Omega m$
Bạc	1,59	$\times 10^{-8}$	.0061	6,29
Đồng	1,68	$\times 10^{-8}$	.0068	5,95
Nhôm	2,65	$\times 10^{-8}$	.00429	3,77
Tungsten	5,6	$\times 10^{-8}$	.0045	1,79
Sắt	9,71	$\times 10^{-8}$	.00651	1,03
Bạch kim	10,6	$\times 10^{-8}$	.003927	0,943
Manganin	48,2	$\times 10^{-8}$	.000002	0,207
Chì	22	$\times 10^{-8}$	...	0,45
Thủy ngân	98	$\times 10^{-8}$	.0009	0,10

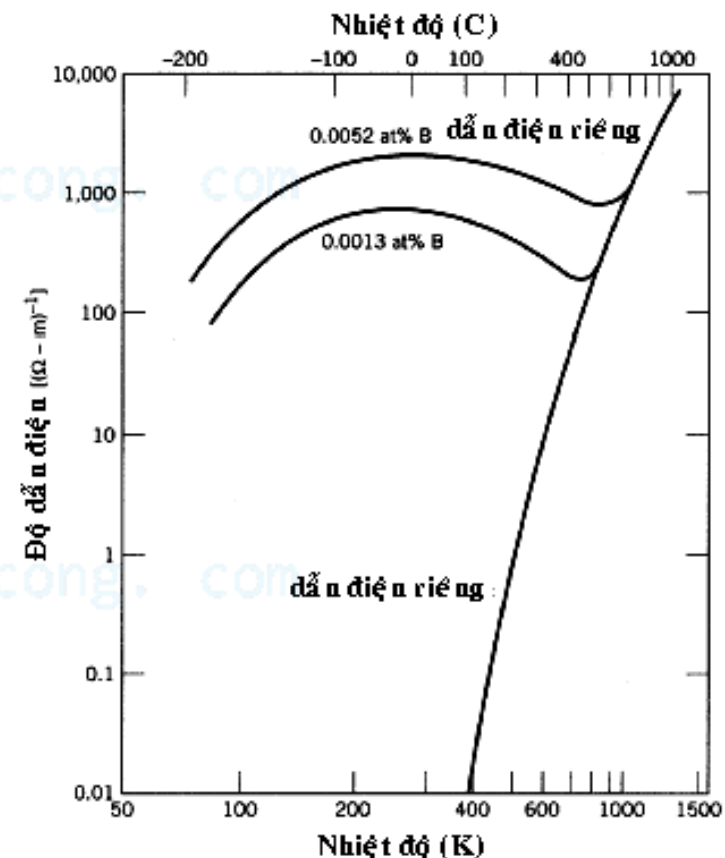
Sự phụ thuộc của điện trở vào nhiệt độ

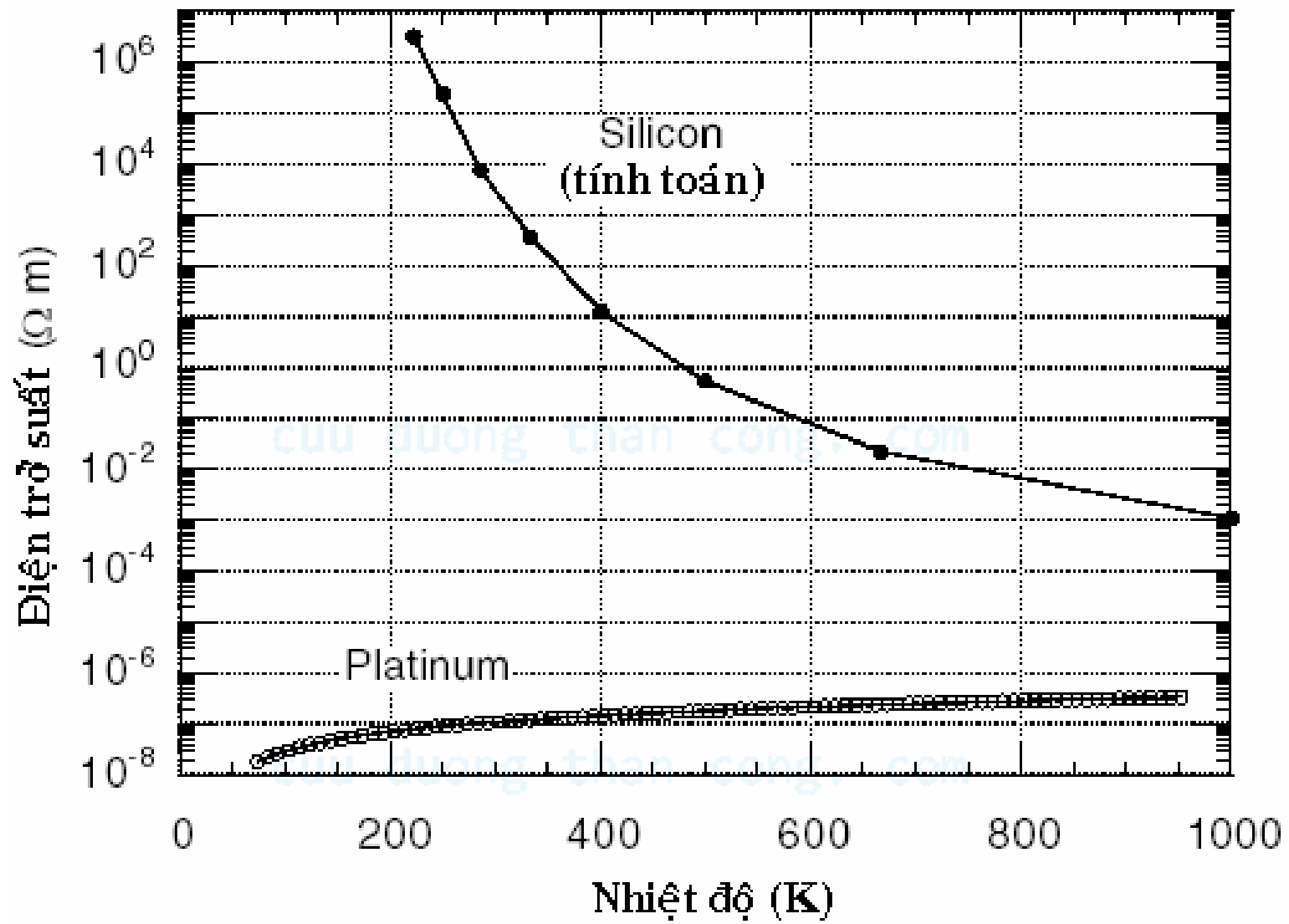
Chất bán dẫn :

Điện trở suất phụ thuộc nhiệt độ theo hàm mũ : giảm khi nhiệt độ tăng.

$$\rho_T = \rho_o \exp\left(\frac{A}{kT}\right)$$

$$\sigma_T = \sigma_o \exp\left(-\frac{A}{kT}\right)$$





Các chất bán dẫn nguyên tố

Chu kỳ	II	III	IV	V	VI
2		B	C	N	
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg		Pb		



Đơn tinh thể Si nuôi bằng
kỹ thuật Czochralski của
Hãng Wacker Silitronix
Hikari Nhật bản.

Đường kính 300 mm, chiều
dài hơn 1,2 m.

Đơn tinh thể Si đường kính 30 cm
độ sạch 99,999999999%

Các chất bán dẫn hợp chất

Chất bán dẫn hợp chất ($A^x B^{8-x}$) :

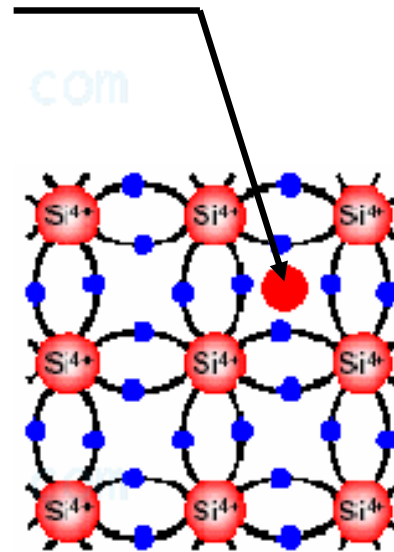
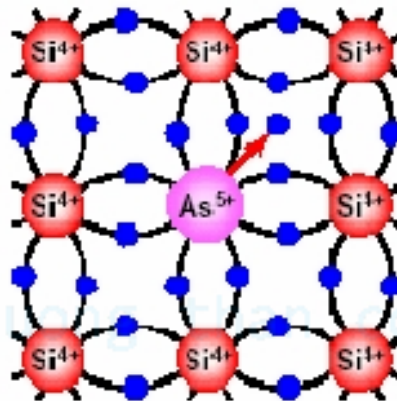
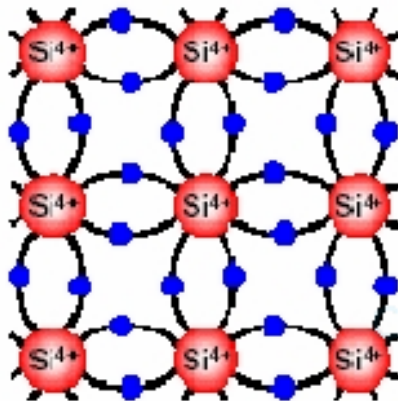
Nguyên tố	Hợp chất IV-IV	Hợp chất III-V	Hợp chất II-VI	Hợp chất IV-VI
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

Chất bán dẫn nhiều thành phần : AlGaAs, InGaAsN ,

...

II. Tạp chất trong các chất bán dẫn

- ❖ Tạp chất thay thế
- ❖ Tạp chất điền khì



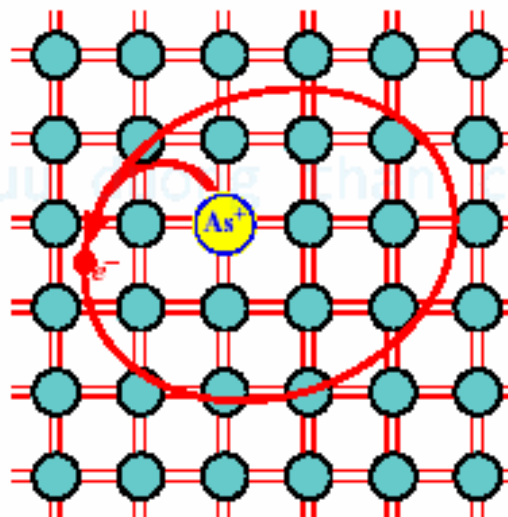
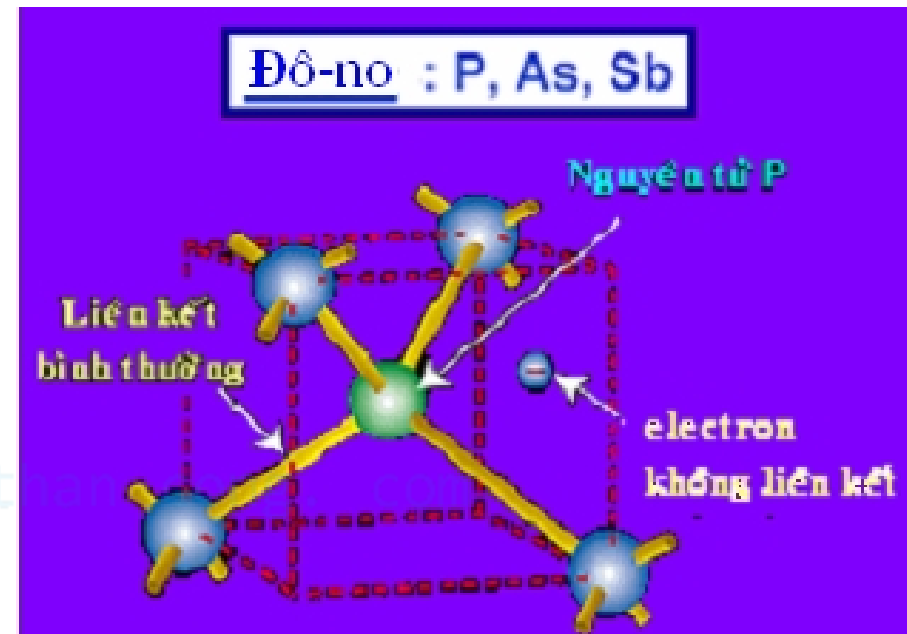
Tạp chất trong các chất bán dẫn :

Tạp chất đô no và ac-xep-to

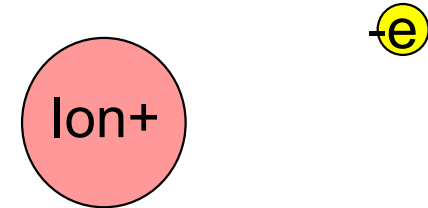
Chu kỳ	Nhóm					
	II	III	IV	V	VI	VII
2	Be	B	C	N	O	F
3	Mg	Al	Si	P	S	Cl
4	Ca Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
5	Sr Cd	In	Sn	Sb	Te	I
		Ac-xep-to		Đô-no		

1) Tạp chất thuộc nhóm V trong chất bán dẫn nhóm IV

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb
Tl	Pb	Bi



Mô hình nguyên tử Hydro của Bohr



Độ lớn của bán kính Bohr

Nguyên tử tương tự Hydrogen : Hàm sóng của trạng thái cơ bản là

$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{a_0} \right]^{\frac{3}{2}} \exp[-r / a_0]$$

Bán kính Bohr : $a_0 = 4\pi\epsilon_r\epsilon_o\hbar^2/m_e e^2$ xác định độ mở rộng về không gian của hàm sóng .

Nguyên tử Hydrogen : ($\epsilon_r = 1$) $a_0 = 0,53 \text{ \AA}$.

Mô hình nguyên tử Hydro của Bohr

Năng lượng liên kết

$$E_H = -\frac{m_o e^4}{2(4\pi\epsilon_o \eta)^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} (eV)$$

m_o - khối lượng của electron tự do

e - điện tích của electron

ϵ_o - hằng số điện môi của chân không

h - hằng số Planck

n - số lượng tử chính

Trong trạng thái cơ bản $n = 1$, $E_H = - 13,6 \text{ eV}$

Năng lượng ion hóa tạp chất đô-no

$$E_i = -\frac{m_n e^4}{2(4\pi\epsilon_o \epsilon_r \eta)^2}$$

Năng lượng ion hóa tạp chất đô-no

$$E_i = -\frac{m_n e^4}{2(4\pi\epsilon_o\epsilon_r\eta)^2} = -\frac{13,6}{n^2} \frac{m_n}{m_o} \frac{1}{\epsilon_r^2}$$

Chất bán dẫn	E _g (eV) ở 273 K	m*/m _o		Hằng số điện môi
		Electron	Lỗ trống	
Ge	0,67	0,2	0,3	16
Si	1,14	0,33	0,5	12
InSb	0,16	0,013	0,6	18
InAs	0,33	0,02	0,4	14,5
InP	1,29	0,07	0,4	14
GaSb	0,67	0,047	0,5	15
GaAs	1,39	0,072	0,5	13

$$\mathbf{Ge} : m_n = 0,22 m_o \quad \varepsilon_r = 16$$

$$E_i = 0,01 \text{ eV}$$

$$\mathbf{Si} : m_n = 0,33 m_o \quad \varepsilon_r = 12$$

$$E_i = 0,031 \text{ eV}$$

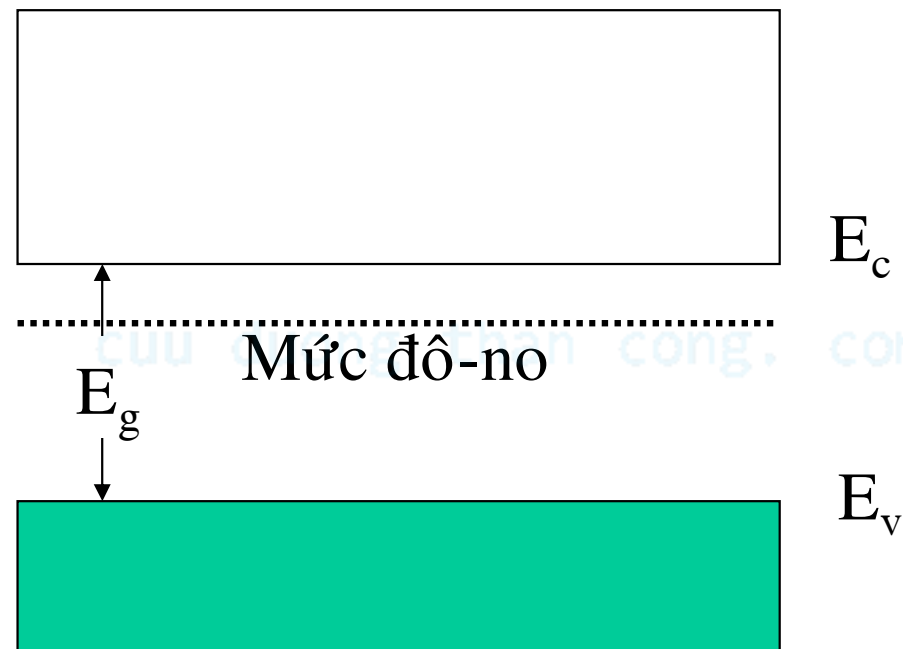
Với phép gần đúng đã dùng, năng lượng ion hóa như nhau cho mọi nguyên tử tạp chất thuộc nhóm V.

Trên thực tế, năng lượng đó có khác nhau với các tạp chất khác nhau, nhưng sự sai khác đó không lớn lắm.

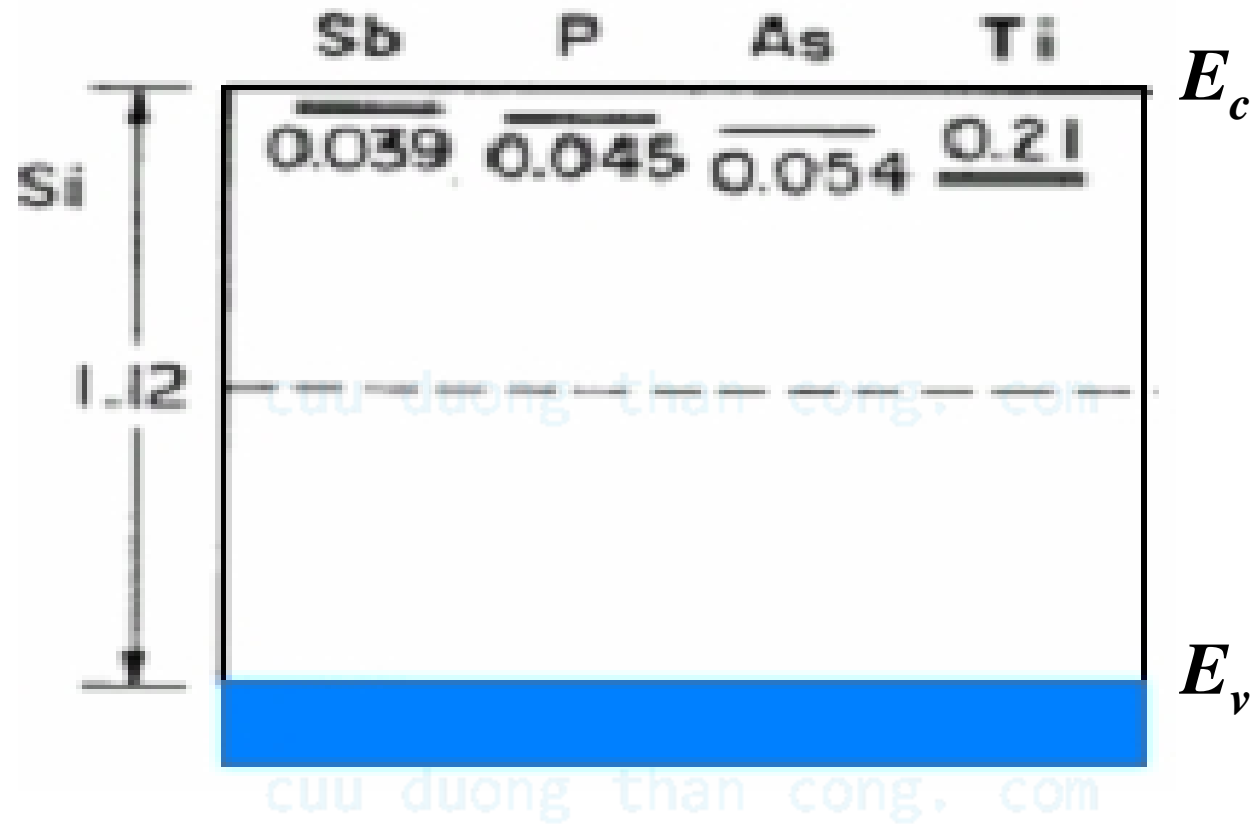
Sự xuất hiện các mức năng lượng tạp chất trong vùng cấm

Khi đưa các nguyên tử tạp chất thuộc nhóm V vào Ge hay Si, trong vùng cấm xuất hiện các mức năng lượng nằm không xa đáy của vùng dẫn .

Tạp chất có thể cung cấp điện tử dẫn điện : *tạp chất đô-no* và mức tạp chất được gọi là *mức đô-no*.



Mức năng lượng tạp chất đô-no

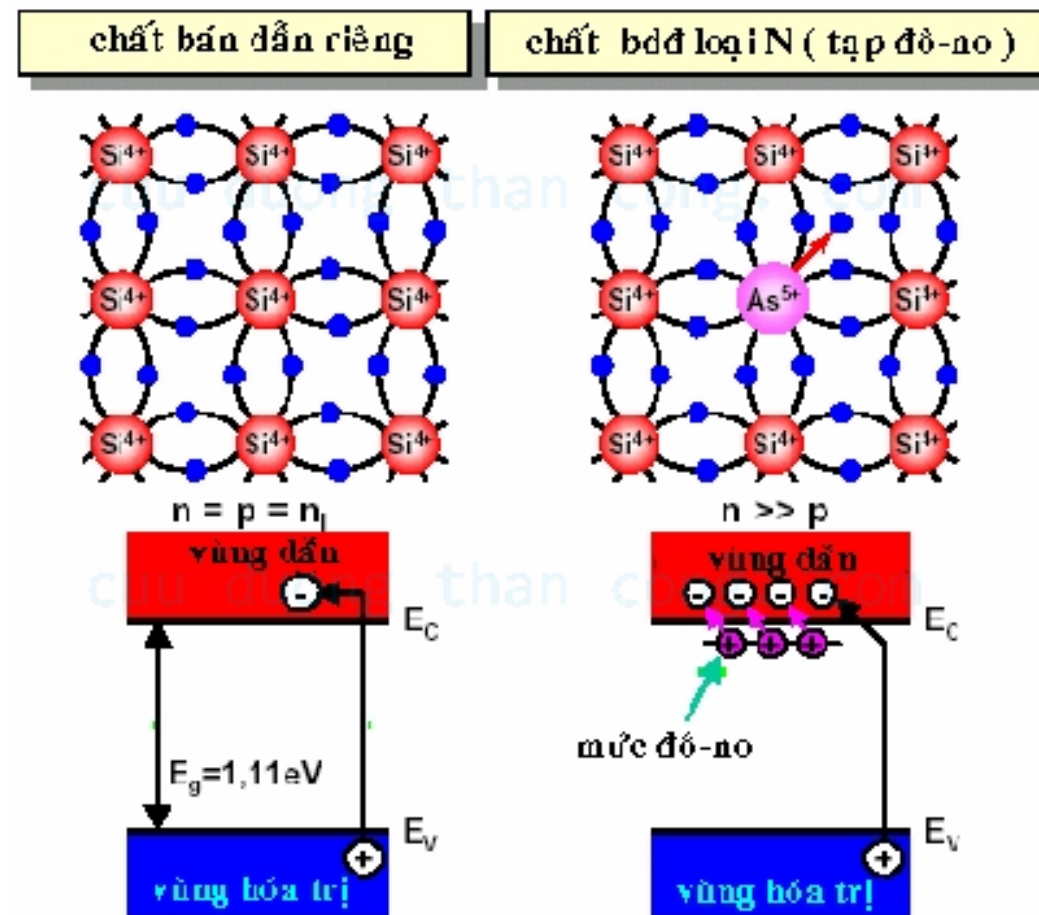


Chất bán dẫn loại N : chất bán dẫn có chứa tạp chất đônô.

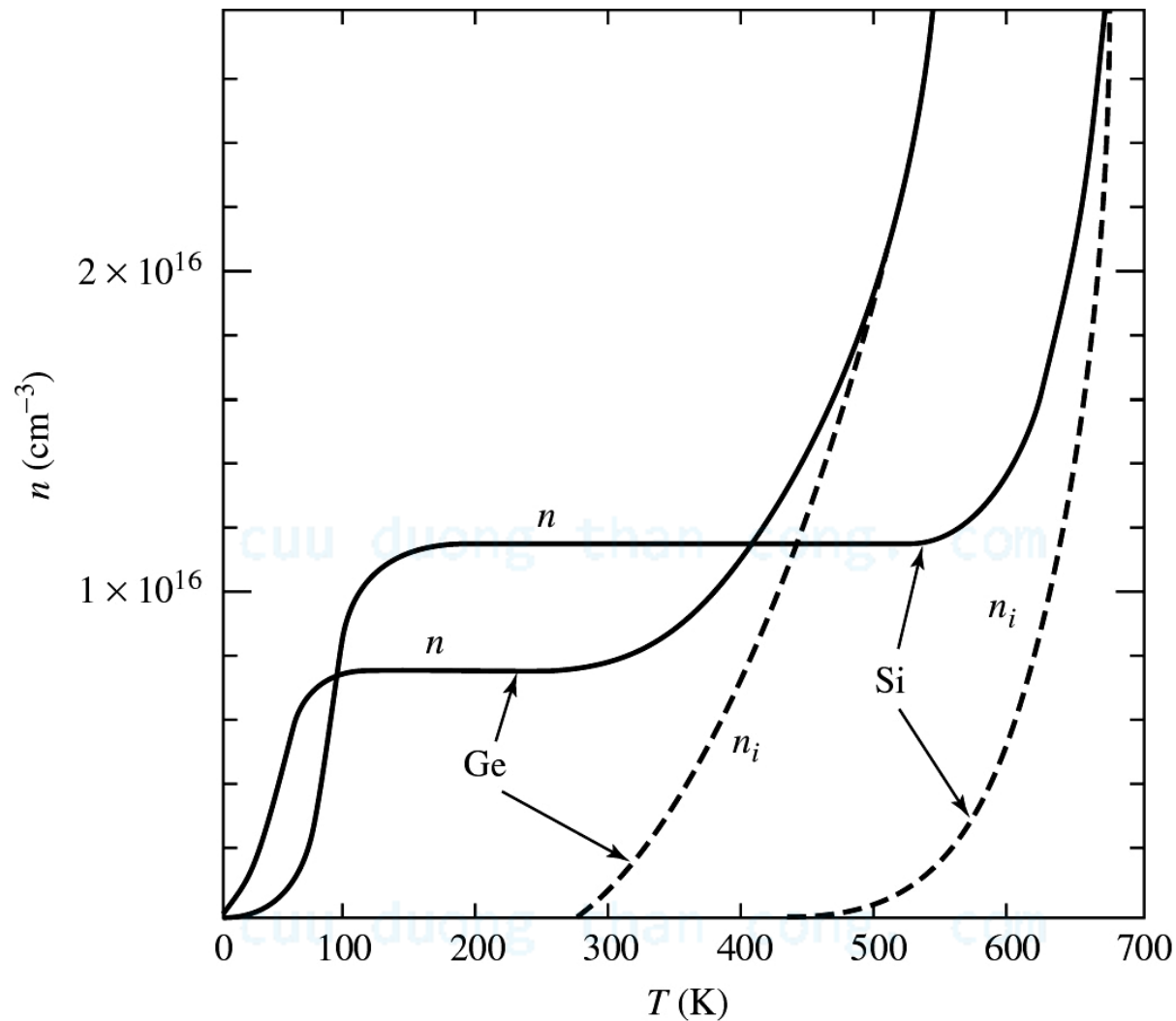
$$n \gg p$$

Hạt tải điện cơ bản : electron

Hạt tải điện không cơ bản : lỗ trống



Sự phụ thuộc của nồng độ electron dẫn vào nhiệt độ



Silicon chứa $1,15 \times 10^{16}$ nguyên tử As / cm^3

Germanium chứa $7,5 \times 10^{15}$ nguyên tử As / cm^3

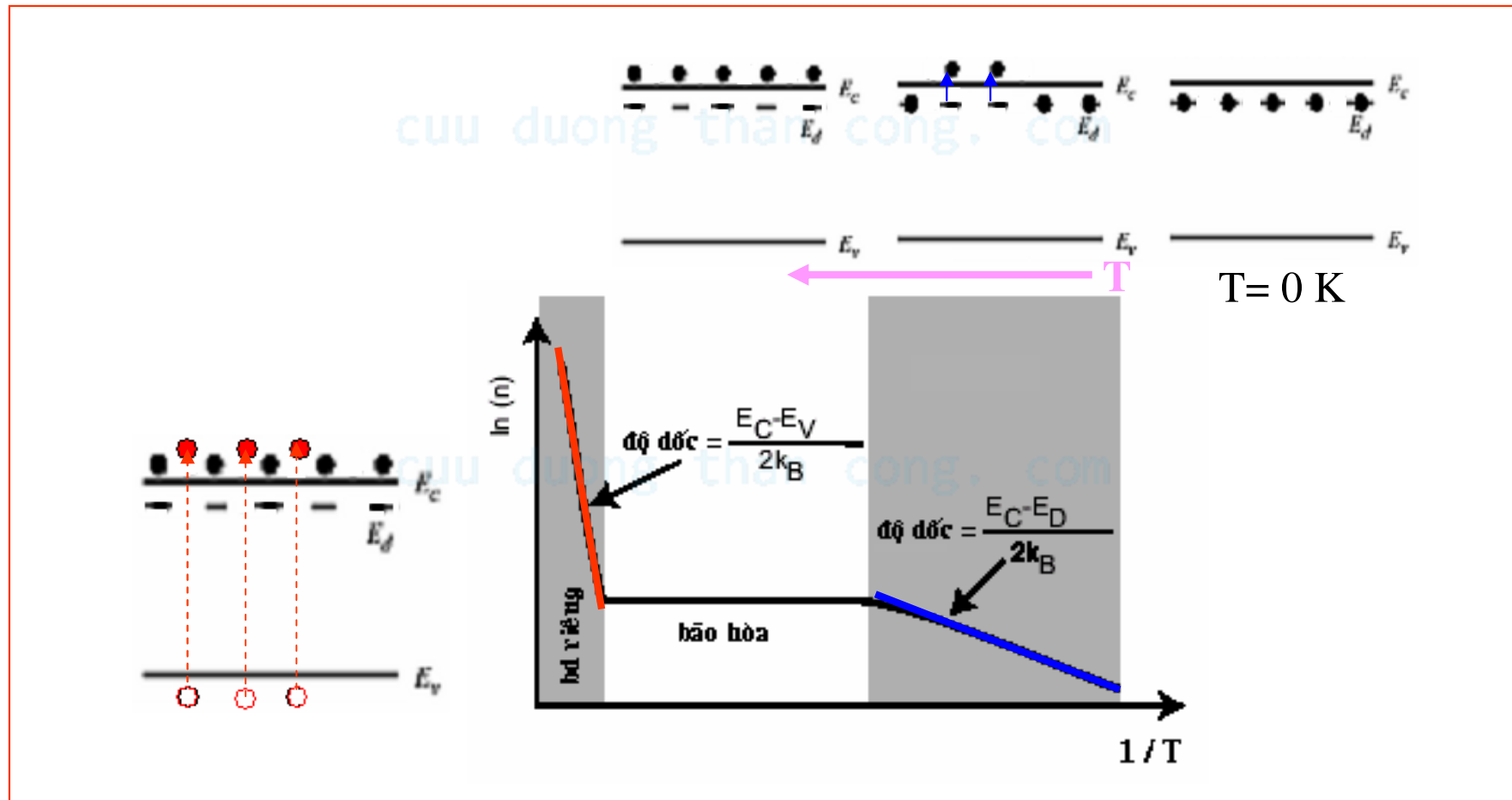
Sự phụ thuộc của nồng độ electron dẫn vào nhiệt độ

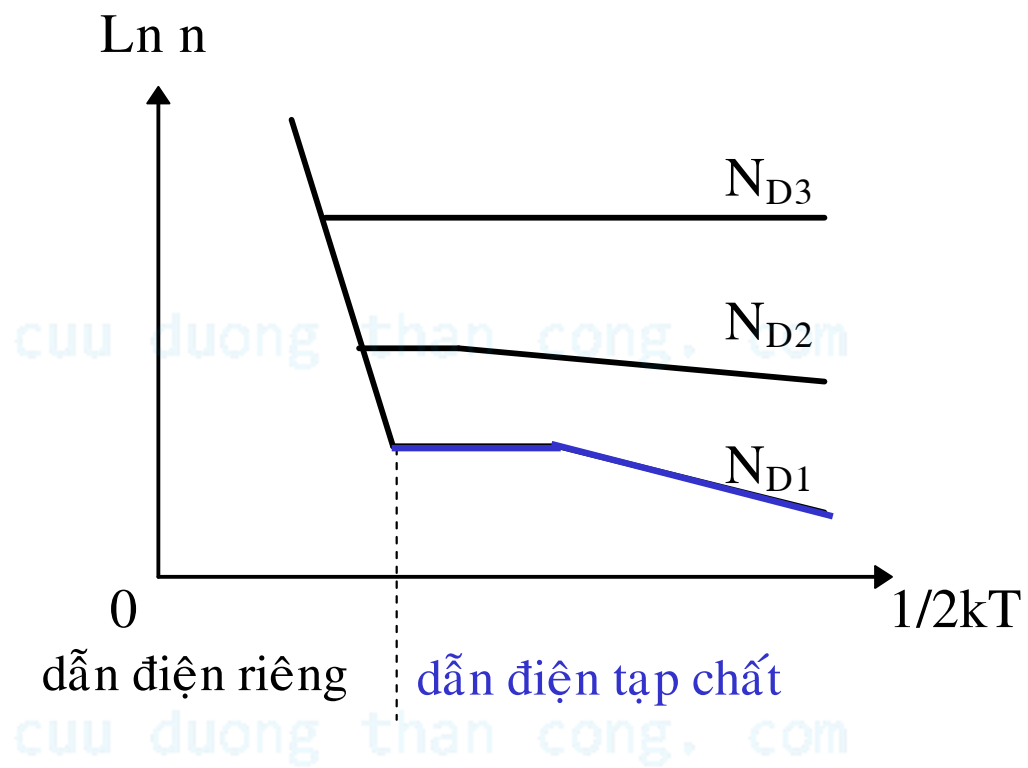
miền dẫn điện tạp chất

$$n \sim \exp - \frac{\Delta E_d}{2kT}$$

miền dẫn điện riêng

$$n \sim \exp - \frac{E_g}{2kT}$$

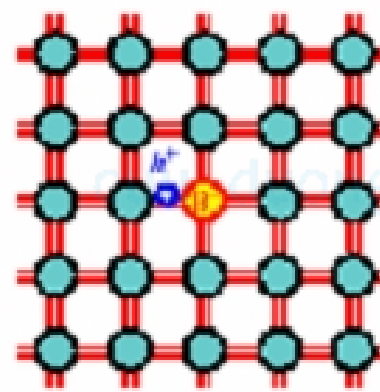




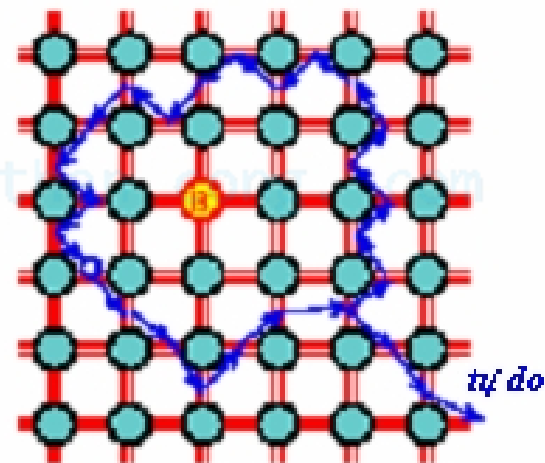
2) Tạp chất thuộc nhóm III trong chất bán dẫn nhóm IV



III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb
Tl	Pb	Bi



(a)

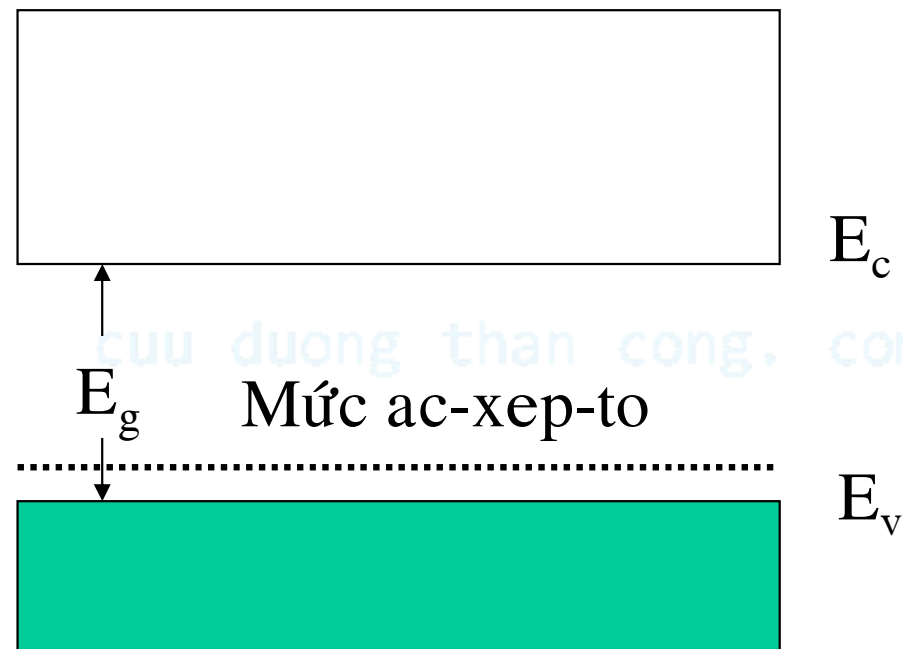


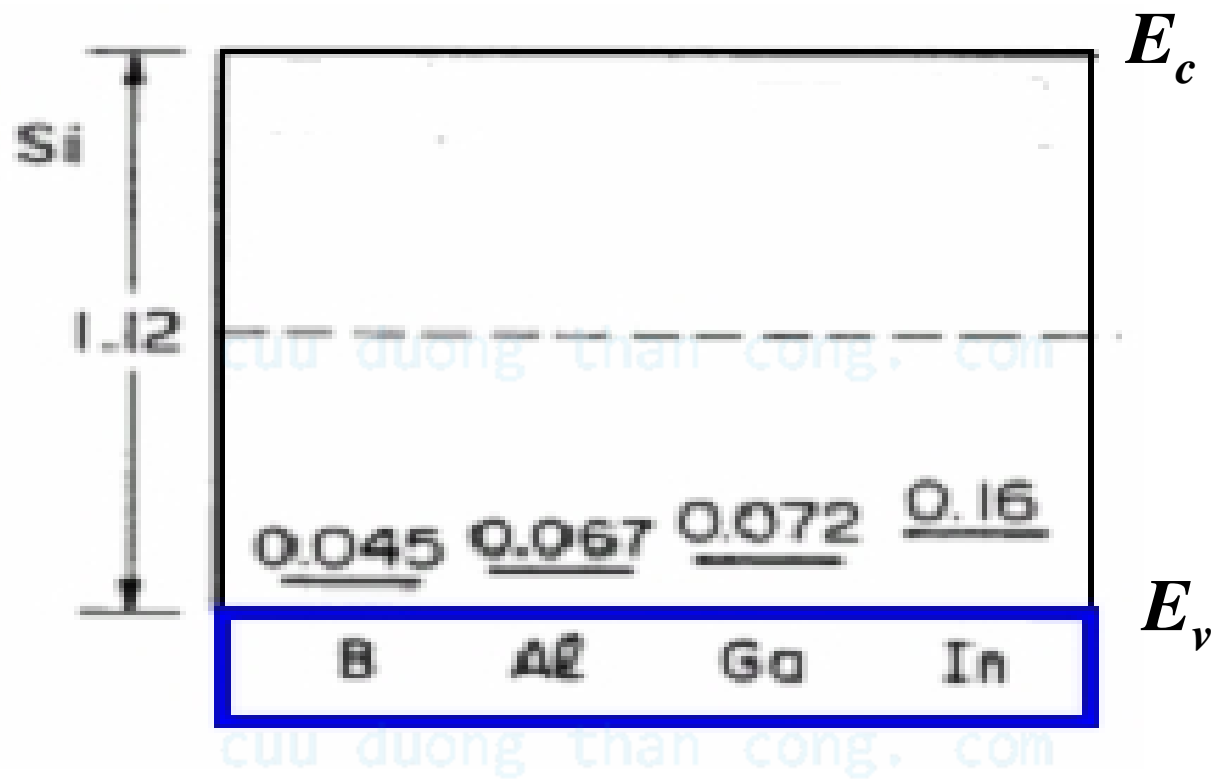
(b)

Sự xuất hiện các mức năng lượng tạp chất trong vùng cấm

Khi đưa các nguyên tử tạp chất thuộc nhóm III vào Ge hay Si, trong vùng cấm xuất hiện các mức năng lượng nằm không xa đỉnh vùng hóa trị .

Tạp chất có thể cung cấp lỗ trống dẫn điện : *tạp chất ac-xep-to* và mức tạp chất được gọi là *mức ac-xep-to* .



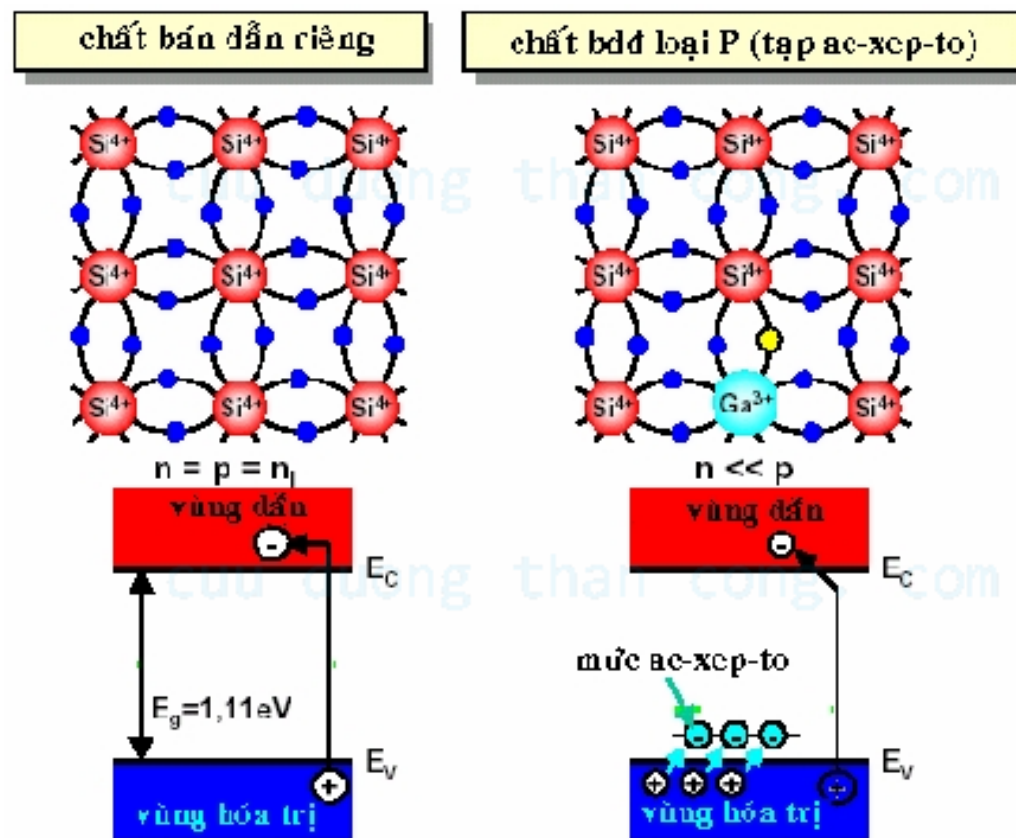


Chất bán dẫn loại P : chất bán dẫn có chứa tạp chất ac-xep-to.

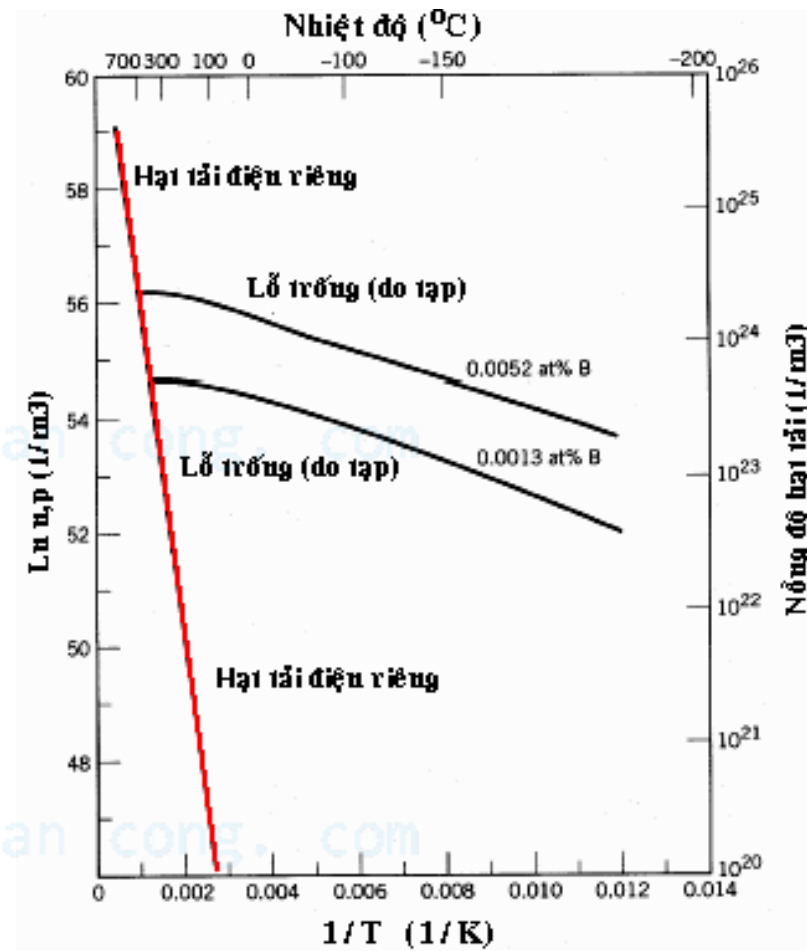
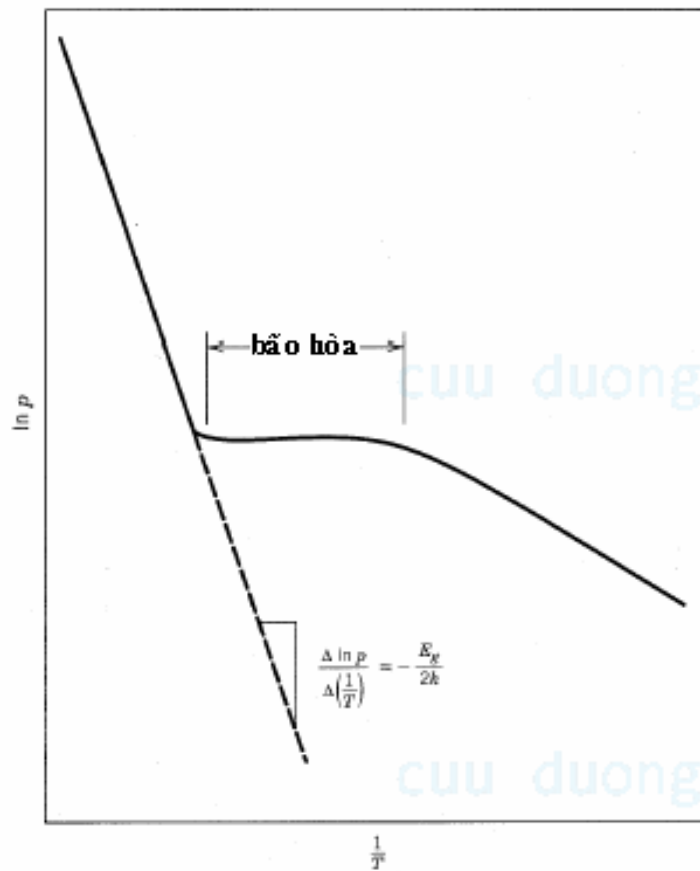
$$p \gg n$$

Hạt tải điện cơ bản : lỗ trống

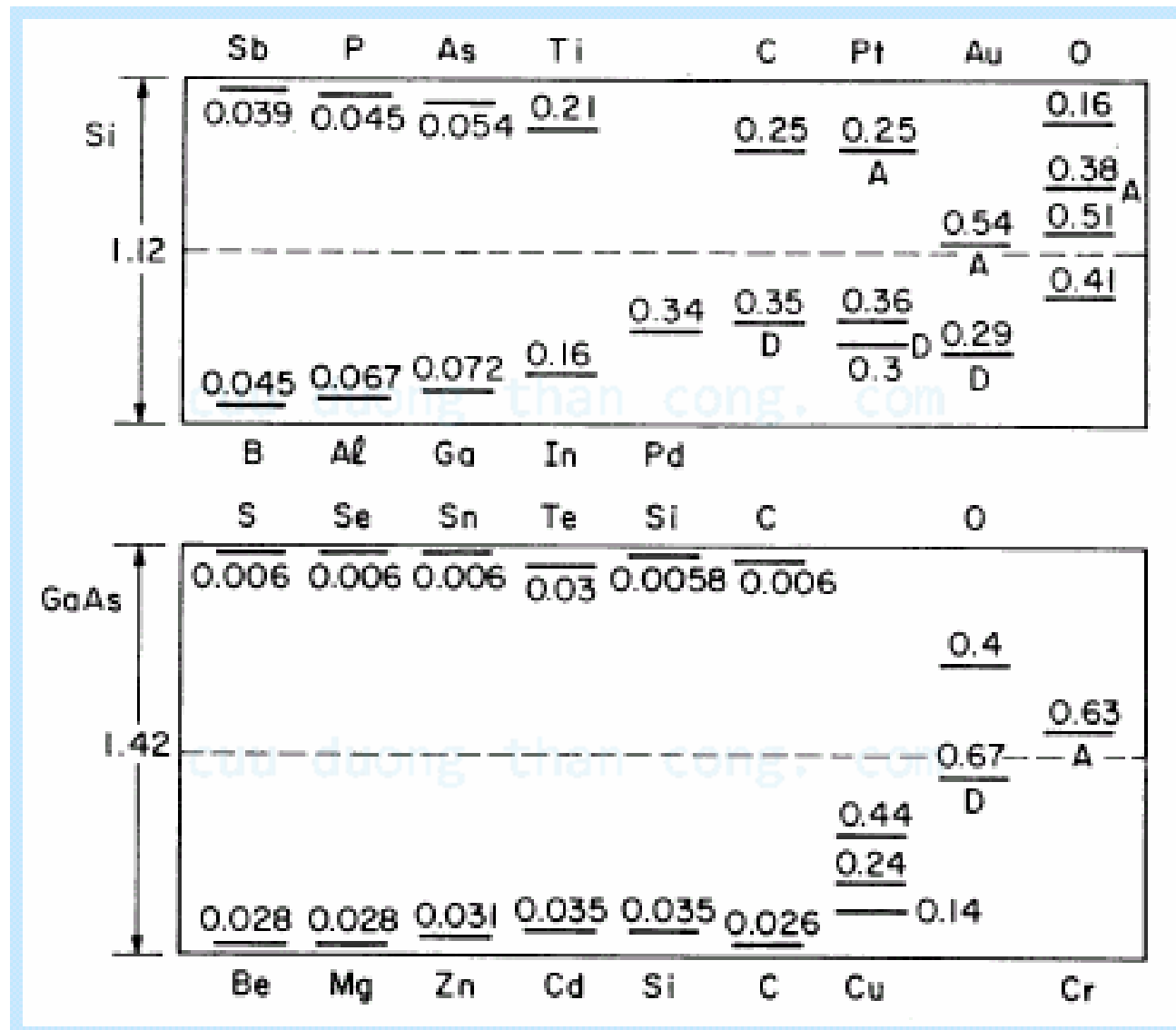
Hạt tải điện không cơ bản : electron



Bán dẫn loại P



Các mức năng lượng tạp chất



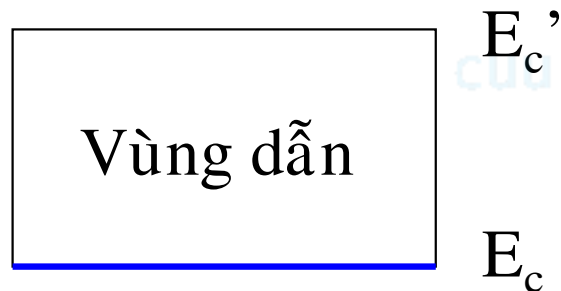
III. Nồng độ các hạt tải điện trong chất bán dẫn

Nồng độ hạt tải điện (n_o và p_o) trong điều kiện cân bằng.

Với chất bán dẫn điện bất kỳ (riêng hoặc tạp chất) trong điều kiện cân bằng ở nhiệt độ T

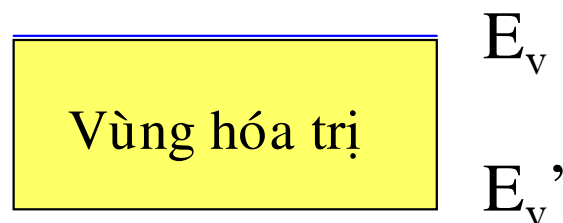
□ Nồng độ electron :

Đơn vị của n_o và p_o [cm^{-3}]



$$n_o = \int_{E_c}^{E_c'} \underbrace{g_c(E)}_{\text{Số trạng thái trong } 1 \text{ cm}^3 \text{ trong khoảng } dE} \underbrace{f(E)}_{\text{Xác suất lấp đầy trạng thái}} dE$$

□ Nồng độ lỗ trống :



$$p_o = \int_{E_v}^{E_v'} \underbrace{g_v(E)}_{\text{Số trạng thái trong } 1 \text{ cm}^3 \text{ trong khoảng } dE} \underbrace{[1 - f(E)]}_{\text{Xác suất trạng thái trống}} dE$$

1) Nồng độ electron trong vùng dẫn

$$n_o = \int_{E_c}^{E_c'} g(E) f(E) dE$$

$g(E)$ là mật độ trạng thái

$$g(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$

m_n là khối lượng hiệu dụng của electron trong vùng dẫn, E_c là năng lượng ở đáy của vùng dẫn.

và hàm phân bố

$$f(E) = \frac{1}{\exp \frac{E - E_F}{kT} + 1}$$

Nồng độ electron trong vùng dẫn :

$$n_o = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} \int_{E_c}^{E_c'} (E - E_c)^{1/2} \frac{1}{\exp \frac{E - E_F}{kT} + 1} dE$$

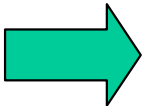
1. mở rộng giới hạn lấy tích phân ra đến vô cùng
(khi E lớn , f(E) tiến đến 0).

Chọn gốc tính năng lượng ở đáy vùng dẫn : $E_c = 0$

2. Với chất bán dẫn **không suy biến** : $E_c - E_F \gg kT$

Có thể dùng gần đúng sau :

$$f(E) \approx \exp \frac{E_F - E}{kT}$$


$$n_o = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} \exp \frac{E_F}{kT} \int_0^{\infty} E^{1/2} \exp - \frac{E}{kT} dE$$

$$n_o = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_F}{kT} \int_0^{\infty} E^{\frac{1}{2}} \exp - \frac{E}{kT} dE =$$

$$= 4\pi \left(\frac{2m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_F}{kT} \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx$$

với $x = \frac{E}{kT}$

Theo định nghĩa và tính chất của hàm Gamma :

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx$$

$$\Gamma(n) = (n-1)\Gamma(n-1)$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$$

$$n_o = 4\pi \left(\frac{2m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_F}{kT} \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx =$$

$$4\pi \left(\frac{2m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_F}{kT} \times \Gamma \left(\frac{3}{2} \right)$$

$$n_o = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_F}{kT} = N_c \exp \left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{mật độ trạng thái rút gọn của vùng dẫn}$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} = 4,831.10^{15} \left(\frac{m_n}{m_o} \right)^{3/2} T^{3/2} (cm^{-3})$$

2) Nồng độ lỗ trống trong vùng hóa trị : chất bán dẫn không suy biến

$$p_o = 2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_v - E_F}{kT} = N_v \exp \frac{E_v - E_F}{kT}$$

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{mật độ trạng thái rút gọn của vùng hóa trị}$$

3) Nồng độ hạt tải điện riêng

$$n_o p_o = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} \exp \frac{E_v - E_c}{kT} = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_n m_p)^{\frac{3}{2}} \exp - \frac{E_g}{kT}$$

Với một chất bán dẫn cho trước và ở nhiệt độ T cố định, tích $n_o p_o$ là một hằng số :

$$n_o p_o = \text{const}$$

Với chất bán dẫn riêng : $n_o = p_o = n_i$

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n m_p)^{\frac{3}{4}} \exp - \frac{E_g}{2kT}$$

IV. Điều kiện trung hòa điện trong chất bán dẫn Mức Fermi

Với một chất bán dẫn bất kỳ, điều kiện trung hòa điện

$$n_o + N_A^- = p_o + N_D^+$$

N_A^- , N_D^+ tương ứng là nồng độ ion aczepto và nồng độ ion đônô.

Chất bán dẫn riêng : $n_o = p_o$

$$N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$$

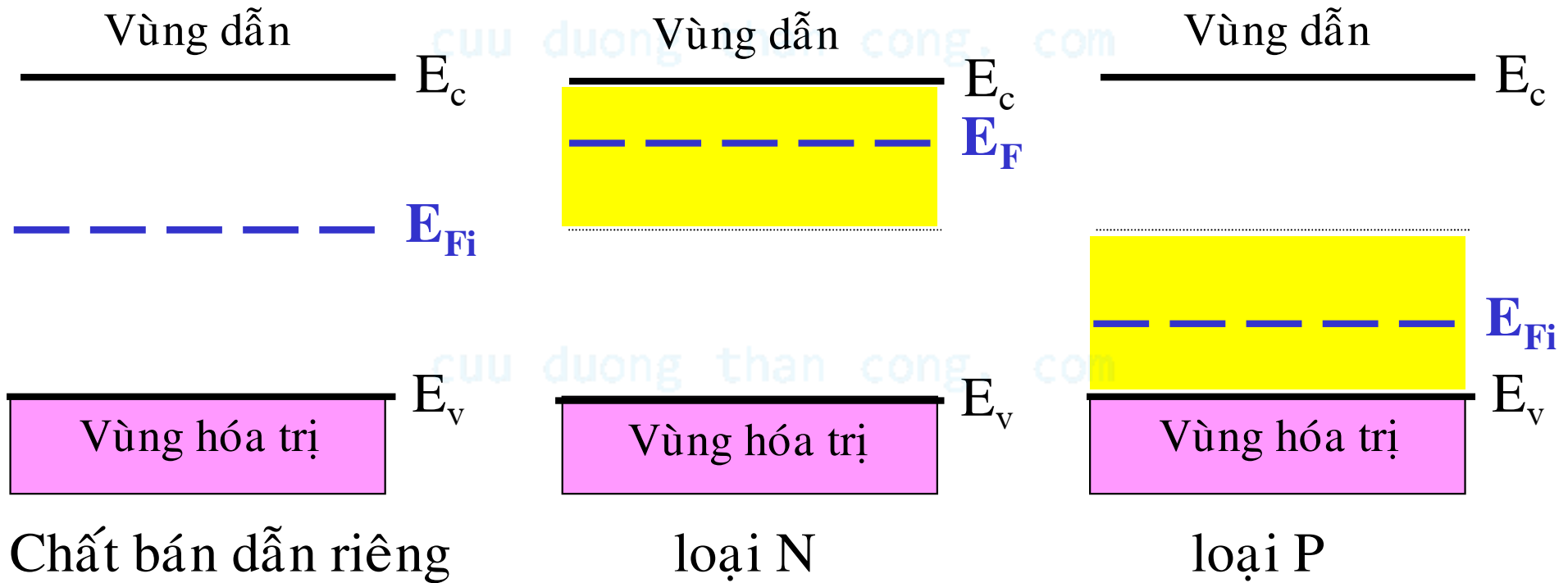
$$\exp\frac{2E_F}{kT} = \frac{N_v}{N_c} \exp\frac{E_c + E_v}{kT}$$

$$E_F = \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} + \frac{E_c + E_v}{2} = \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p}{m_n} + \frac{E_c + E_v}{2}$$

Mức Fermi trong các chất bán dẫn

Chất bán dẫn riêng

$$E_{Fi} = \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p}{m_n} + \frac{E_c + E_v}{2}$$



V. Các hạt tải điện không cân bằng

Các hạt tải điện cân bằng

$$g_o = r_o = \gamma_r n_o p_o$$

Sự tạo thành các hạt tải điện không cân bằng trong chất bán dẫn.

- Trong kim loại, trên thực tế ta không thể làm thay đổi nồng độ hạt tải điện trong thể tích.
- Trong các chất bán dẫn có thể làm thay đổi đáng kể nồng độ hạt tải trong thể tích (do đồng thời có thể tồn tại hai loại hạt tải điện : electron và lỗ trống mang điện tích ngược dấu nhau) nhờ các tác nhân bên ngoài như chiếu sáng chất bán dẫn với ánh sáng có năng lượng photon bằng hoặc lớn hơn độ rộng vùng cấm E_g ...

Sự tạo thành các hạt tải điện dư (hạt tải điện không cân bằng) làm thay đổi nhiều độ dẫn điện ở trong thể tích.

Khi mới được tạo thành, động năng của các hạt tải điện không cân bằng có thể vượt xa năng lượng nhiệt trung bình của các hạt tải điện cân bằng. Nhưng do tán xạ với mạng tinh thể chúng nhanh chóng nhường năng lượng vượt trội đó và không còn phân biệt được với các hạt tải điện cân bằng.

Nồng độ hạt tải điện bằng

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

$$n_0 = \int g(E) f_0(E) dE = \frac{2(2\pi m_n kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \exp \frac{E_F}{kT}$$

$$n = \int g(E) f_e(E) dE = \frac{2(2\pi m_n kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \exp \frac{E_{Fn}}{kT}$$

$f_e(E)$ là hàm phân bố không cân bằng của điện tử .

$$n = n_o \exp \frac{E_{Fn} - E_F}{kT}$$

$$p = p_o \exp \frac{E_F - E_{Fp}}{kT}$$

E_{Fn} và E_{Fp} tương ứng được gọi là *chuẩn mức Fermi* của electron và lỗ trống

$$np = n_o p_o \exp \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}$$

Hiệu năng lượng $E_{Fn} - E_{Fp}$ đặc trưng cho độ lệch khỏi trạng thái cân bằng

VI. Thời gian sống

Với chất bán dẫn điện riêng $\Delta n = \Delta p$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = g_o - \gamma_r np = -\gamma_r (n_o \Delta p + p_o \Delta n + \Delta n \Delta p)$$

* Trường hợp kích thích yếu $\Delta n \ll n_o + p_o$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}$$
$$\tau = \frac{1}{\gamma_r (n_o + p_o)}$$

$$\Delta n = \Delta n(0) \exp -\frac{t}{\tau}$$

τ là thời gian mà sau đó nồng độ hạt tải điện không cân bằng giảm đi e lần - *thời gian sống* của electron (lỗ trống).

* Trường hợp kích thích mạnh $\Delta n \gg n_0 + p_0$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_r (\Delta n)^2 = -\frac{\Delta n}{\tau}$$

$$\tau = \frac{1}{\gamma_r \Delta n}$$

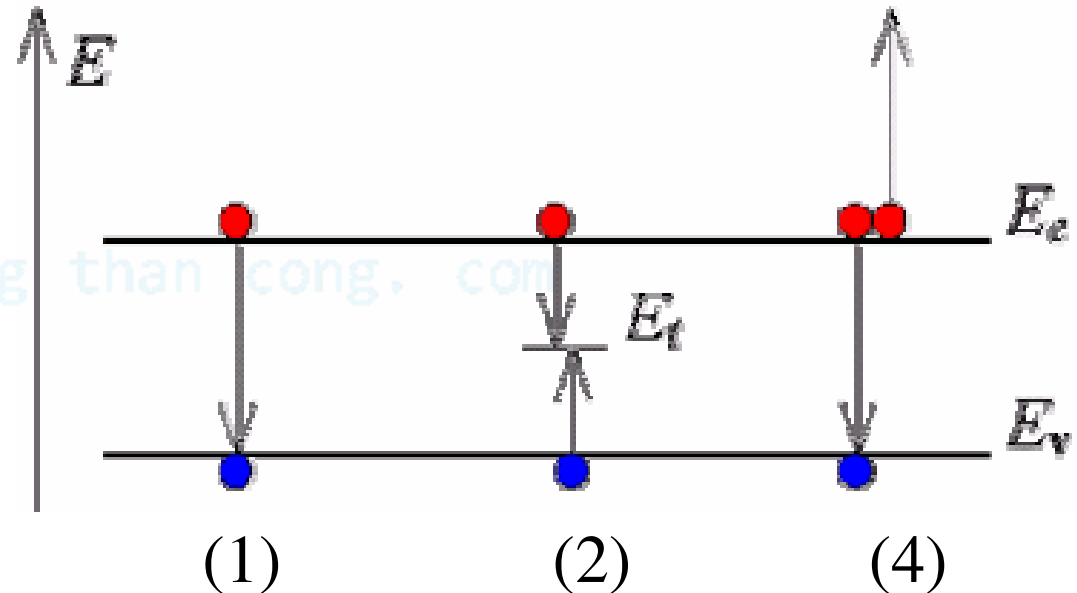
Trong các chất bán dẫn tạp chất, nói chung $\tau_n \neq \tau_p$

Các quá trình tái hợp trong các chất bán dẫn

Thời gian sống τ của các hạt tải điện do các quá trình tái hợp xảy ra bên trong chất bán dẫn quy định .

Có thể phân loại các quá trình tái hợp thành

1. Tái hợp vùng – vùng
2. Tái hợp thông qua bẫy
3. Tái hợp mặt ngoài
4. Tái hợp Auger



Nếu trong chất bán dẫn đồng thời xảy ra cả 3 quá trình tái hợp nói trên thì thời gian sống τ của các hạt tải điện được tính theo công thức :

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i} = \frac{1}{\tau_{\text{vùng-vùng}}} + \frac{1}{\tau_{\text{bẫy}}} + \frac{1}{\tau_{\text{mặt}}}$$

VII. Tiếp xúc kim loại - chất bán dẫn

1) Dòng phát xạ nhiệt điện tử . Công thoát nhiệt điện tử

- Electron nằm trong tinh thể chịu sự tương tác Coulomb từ phía các ion dương của mạng. Một electron muốn thoát khỏi chất rắn cần tốn một năng lượng xác định nào đó.
- Mật độ dòng phát xạ nhiệt điện tử (dòng điện tích của các electron đi ra chân không trong một đơn vị thời gian qua 1 đơn vị diện tích của vật liệu ở một nhiệt độ T) :

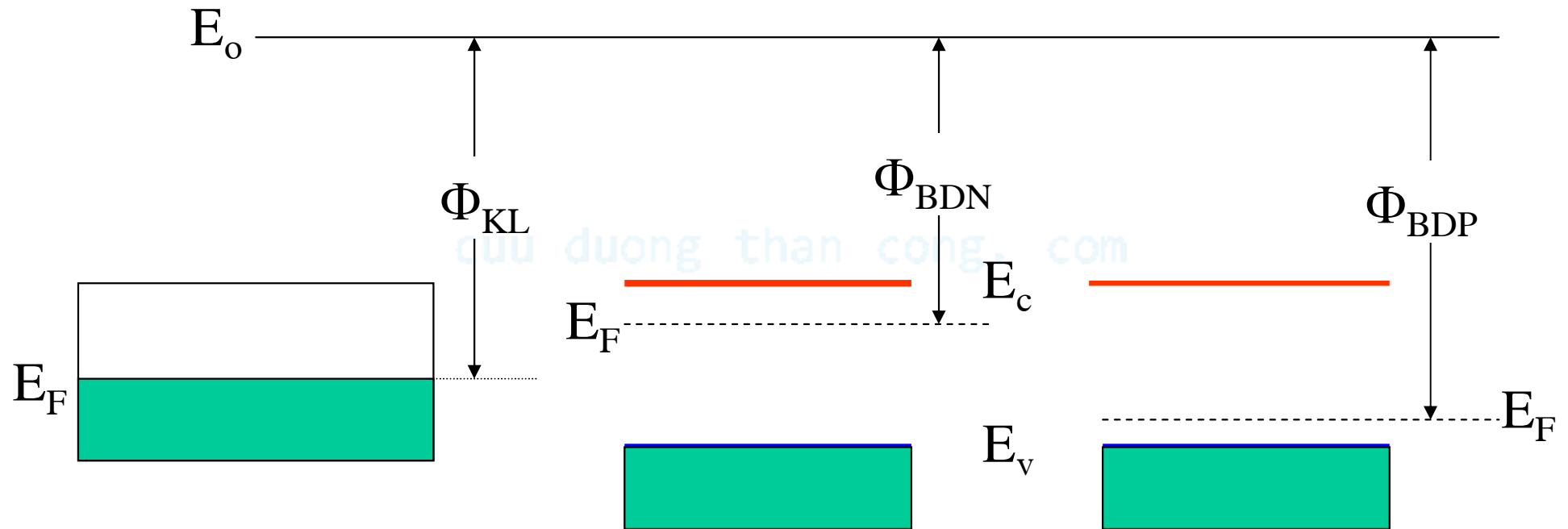
$$j_s = AT^2 \exp - \frac{\Phi}{kT}$$

được gọi là *dòng phát xạ nhiệt điện tử* .

A là một hằng số không phụ thuộc vào vật liệu

$$A = \frac{4\pi m_o e k^2}{h^3}$$

$\Phi = E_0 - E_F$ là công rút điện tử .



VII. Tiếp xúc kim loại - chất bán dẫn

2) Giải đồ vùng năng lượng của lớp chuyển tiếp kim loại - bán dẫn

Giả thử chất bán dẫn là loại N và có công thoát điện tử $\phi_{\text{Bd}} < \phi_{\text{KL}}$.

Số electron thoát khỏi chất bán dẫn để sang kim loại sẽ lớn hơn số electron chuyển động theo chiều ngược lại \rightarrow phía kim loại có tích điện âm còn phía chất bán dẫn mất đi một số electron để lại các ion donor dương không được trung hòa : xuất hiện điện trường ở ranh giới hướng từ chất bán dẫn sang kim loại.

Điện trường này ngăn cản sự chuyển động của electron từ chất bán dẫn sang kim loại nhưng không ảnh hưởng đến các electron chuyển động từ kim loại sang chất bán dẫn .

Do tác dụng này mà đến một lúc nào đó sẽ đạt trạng thái cân bằng : ở ranh giới của hai vật liệu xuất hiện một điện trường ổn định \mathcal{E}_0 , được gọi là *điện trường tiếp xúc*.

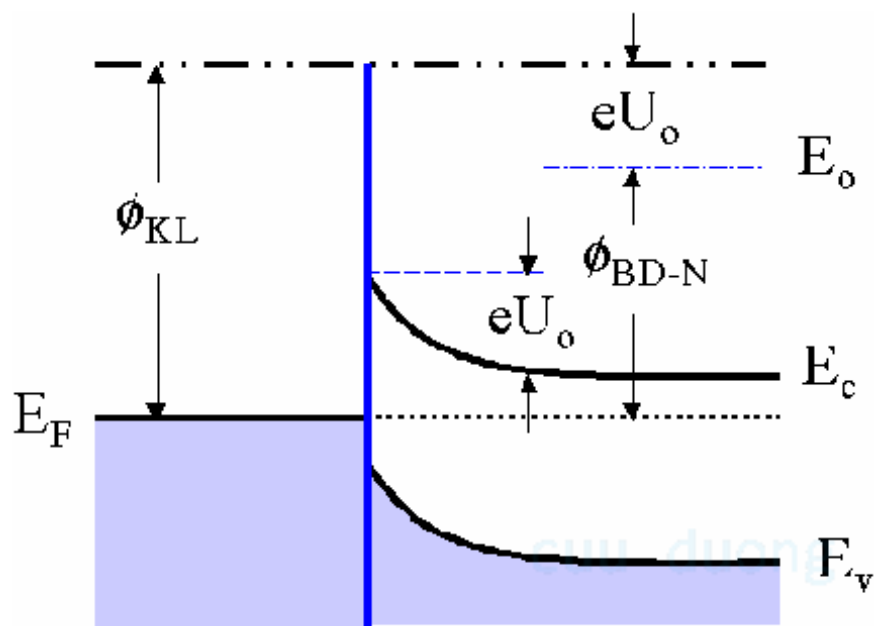
Ở trạng thái dừng, dòng electron đi từ chất bán dẫn sang kim loại j_{BD} bằng dòng electron đi từ kim loại sang chất bán dẫn j_{KL}

$$j_{BD} = AT^2 \exp - \frac{\phi_{BD} + eU_0}{kT} = j_{KL} = AT^2 \exp - \frac{\phi_{KL}}{kT}$$

cuu duong than cong. com

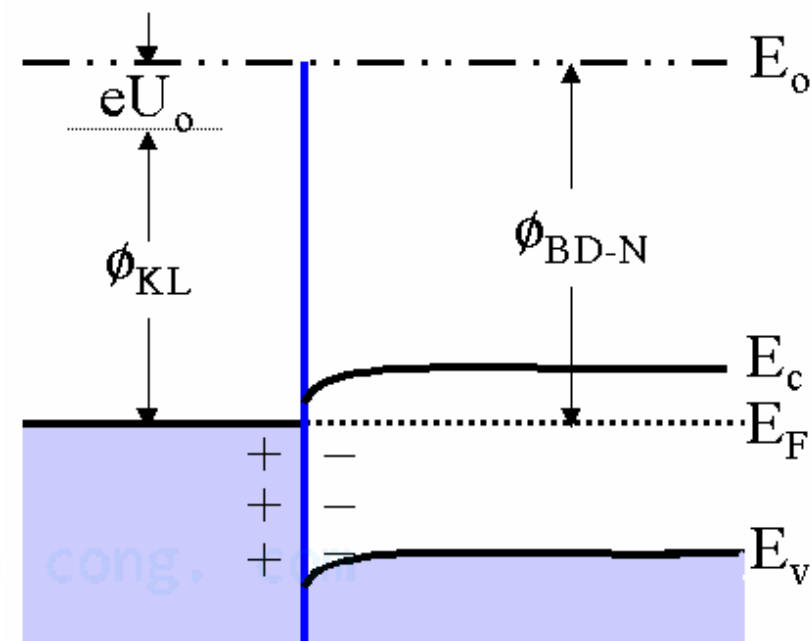
Từ những đánh giá sơ bộ về các lớp điện tích không gian và tính đến hiệu ứng đường hầm khi khe d hẹp ta có thể vẽ giản đồ năng lượng cho lớp chuyển tiếp kim loại - bán dẫn trong điều kiện cân bằng như ở hình ở slide sau.

cuu duong than cong. com



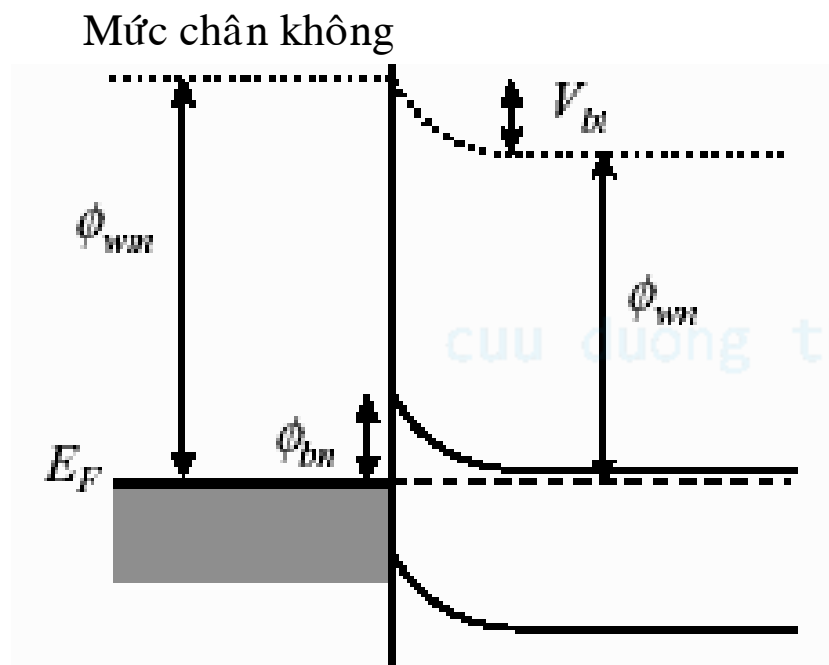
$$\phi_{KL} > \phi_{BD-N}$$

Miền điện tích thể tích w trên mặt chất bán dẫn có điện trở rất lớn so với điện trở của kim loại và của miền bán dẫn trung hòa. Lớp đó thường được gọi là *lớp ngăn*.

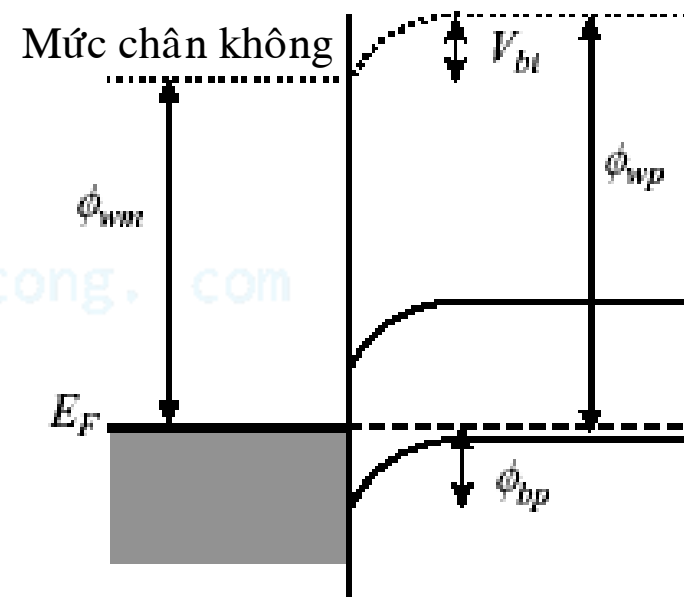


$$\phi_{KL} < \phi_{BD-N}$$

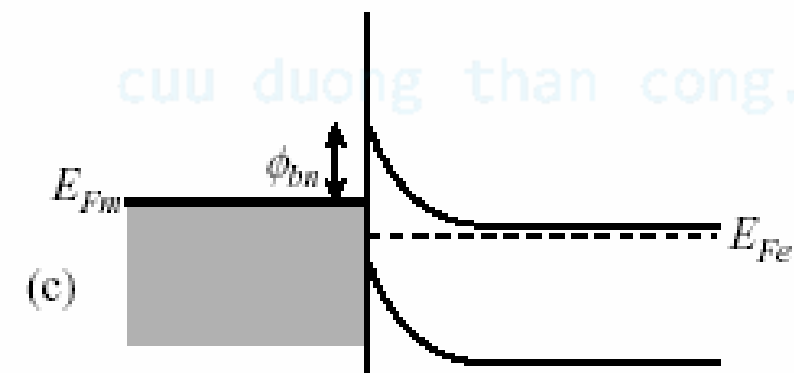
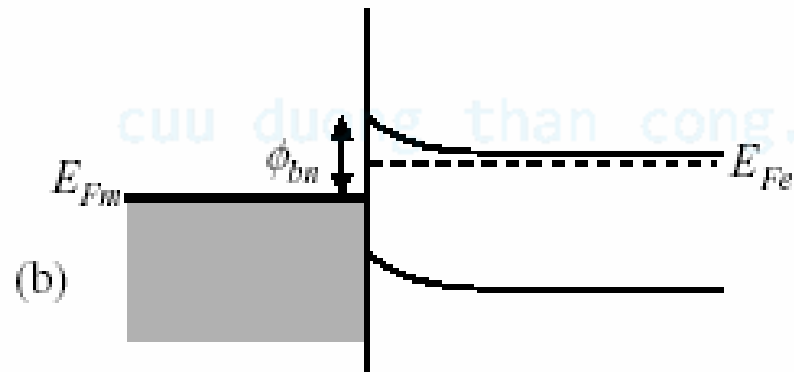
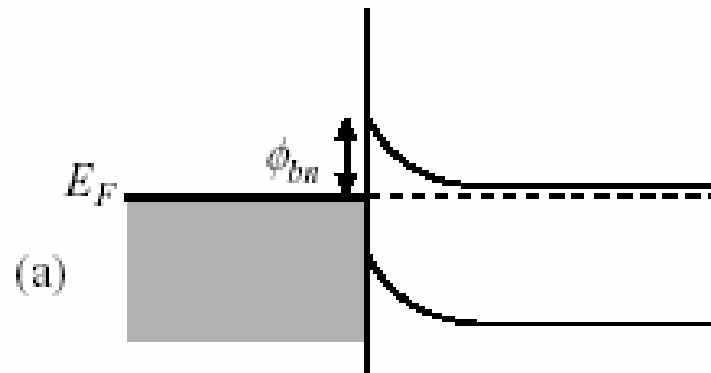
Trong trường hợp $\phi_{KL} < \phi_{BD-N}$, miền điện tích thể tích có điện trở nhỏ nên được gọi là *lớp đối ngăn*.



Kim loại - BDD loại N



Kim loại - BDD loại P



Phân cực thuận

Phân cực ngược

VII. Tiếp xúc kim loại - chất bán dẫn

3) Đặc trưng Von - Ampe của chuyển tiếp kim loại - bán dẫn

Khi chưa đặt điện áp ngoài lên hệ kim loại - bán dẫn , dòng electron từ kim loại sang chất bán dẫn bằng dòng electron từ chất bán dẫn sang kim loại :

$$j_{KL} = j_{BD} = j_s$$

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

$$j = j_{BD} - j_{KL} = 0$$

Đặt điện áp ngoài V lên hệ có hình thành lớp ngăn . Do điện trở của lớp ngăn rất lớn nên gần đúng, có thể xem toàn bộ điện áp ngoài sụt trên lớp ngăn đó. Khi lớp ngăn đủ mỏng có thể bỏ qua sự sinh và tái hợp các hạt tải điện trong lớp đó.

1. Phân cực thuận lớp chuyển tiếp :

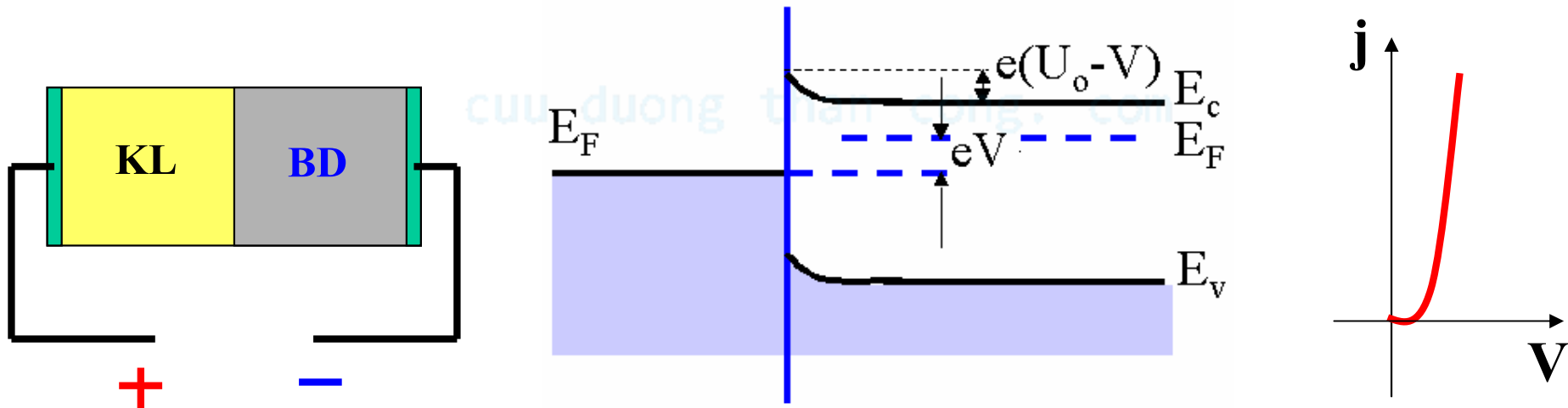
Điện áp V tạo nên điện trường ngược chiều với điện trường tiếp xúc \mathcal{E}_0 . Điện trường ngoài làm giảm hàng rào thế năng đối với các electron chuyển động từ chất bán dẫn sang kim loại và do đó làm thay đổi j_{BD} mà không ảnh hưởng gì đến dòng j_{KL} :

$$j_{KL} = j_s$$

$$j_{BD} = AT^2 \exp - \frac{\phi_{BD} + eU_o - eV}{kT} = j_s \exp \frac{eV}{kT}$$

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

$$j = j_{BD} - j_{KL} = j_s \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right)$$



2. Phân cực ngược lớp chuyển tiếp :

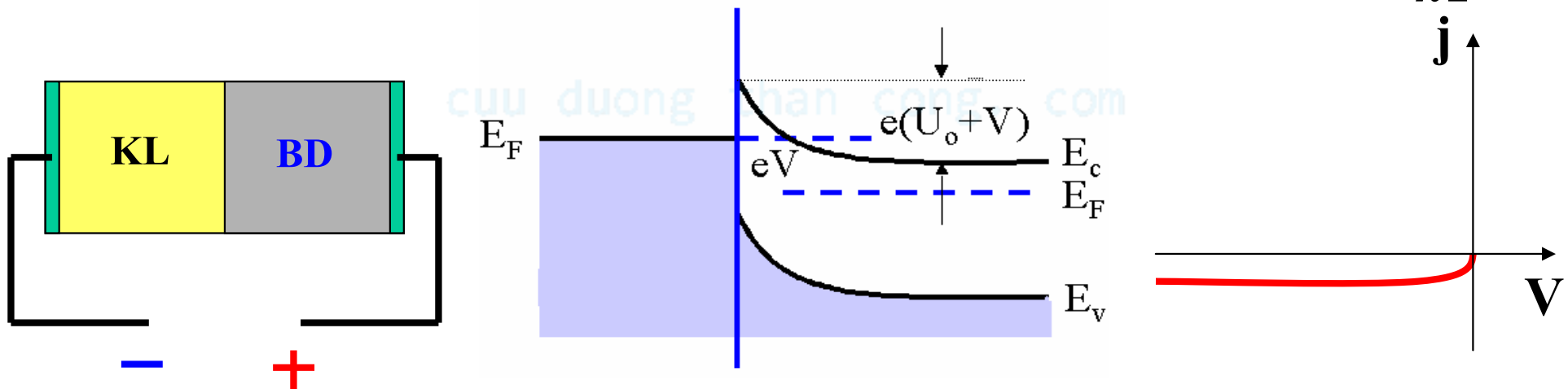
Điện áp V tạo nên điện trường cùng chiều với điện trường tiếp xúc \mathcal{E}_0 .

Điện trường ngoài làm tăng hàng rào thế năng đối với các electron chuyển động từ chất bán dẫn sang kim loại và do đó làm thay đổi j_{BD} mà không ảnh hưởng gì đến dòng j_{KL} :

$$j_{KL} = j_s$$

$$j_{BD} = AT^2 \exp - \frac{\phi_{BD} + eU_o + eV}{kT} = j_s \exp - \frac{eV}{kT}$$

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp $j = j_{BD} - j_{KL} = j_s \left(\exp - \frac{eV}{kT} - 1 \right)$



VIII. Chuyển tiếp P – N

Các cách chế tạo

- + Phương pháp nóng chảy
- + Pha tạp trong quá trình kéo đơn tinh thể bán dẫn
- + Phương pháp khuếch tán tạp chất vào chất bán dẫn ở nhiệt độ cao.

Phương pháp plana.

Trong các cách chế tạo trên lớp chuyển tiếp P-N được hình thành *trên cùng một đơn tinh thể*.

1) Chuyển tiếp P – N : điều kiện cân bằng

Giản đồ vùng năng lượng của lớp chuyển tiếp P - N. Thể hiện tiếp xúc

Khi mới được hình thành lớp chuyển tiếp, do có chênh lệch về nồng độ của các hạt tải điện (electron và lỗ trống) trong hai miền , xảy ra các quá trình khuếch tán sau :

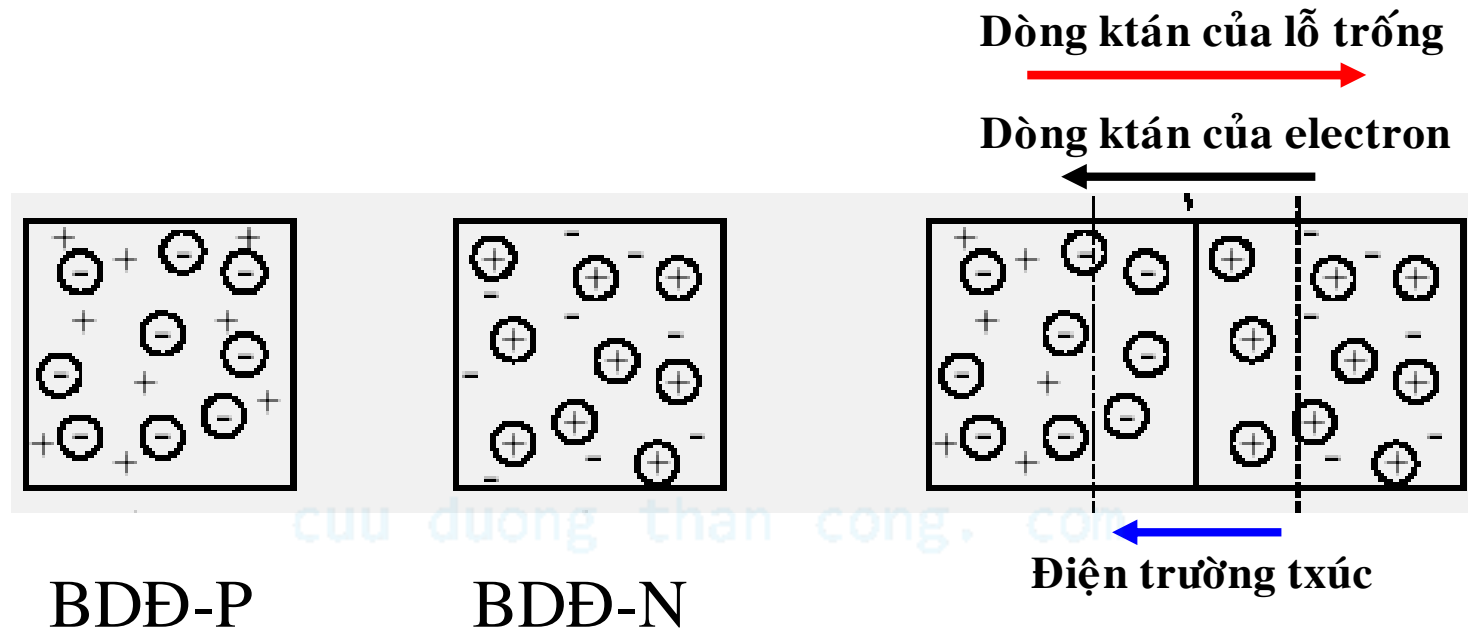
electron khuếch tán từ miền N sang miền P

lỗ trống khuếch tán từ miền P sang miền N.

Kết quả của các quá trình khuếch tán : miền N xuất hiện các ion donor dương không được trung hòa và bên miền P còn lại các ion acceptor âm không được trung hòa bởi lỗ trống .

➡ Ở ranh giới của 2 miền hình thành điện trường hướng từ miền N sang miền P. Điện trường này có tác dụng hạn chế quá trình khuếch tán của các hạt tải điện nên đến một lúc nào đó sẽ đạt tới trạng thái cân bằng.

Chuyển tiếp P - N : điều kiện cân bằng



Trong miền điện tích thể tích W ở ranh giới của hai miền N và P có điện trường tiếp xúc \mathcal{E}_0 và

dòng electron từ N sang P : $j_n = j_{ns}$: dòng electron từ P sang N

dòng lỗ trống từ P sang N : $j_p = j_{ps}$: dòng lỗ trống từ N sang P


dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp $j = (j_n + j_p) - (j_{ps} + j_{ns}) = 0$

Chuyển tiếp P – N : điều kiện cân bằng

E_{cP} ———

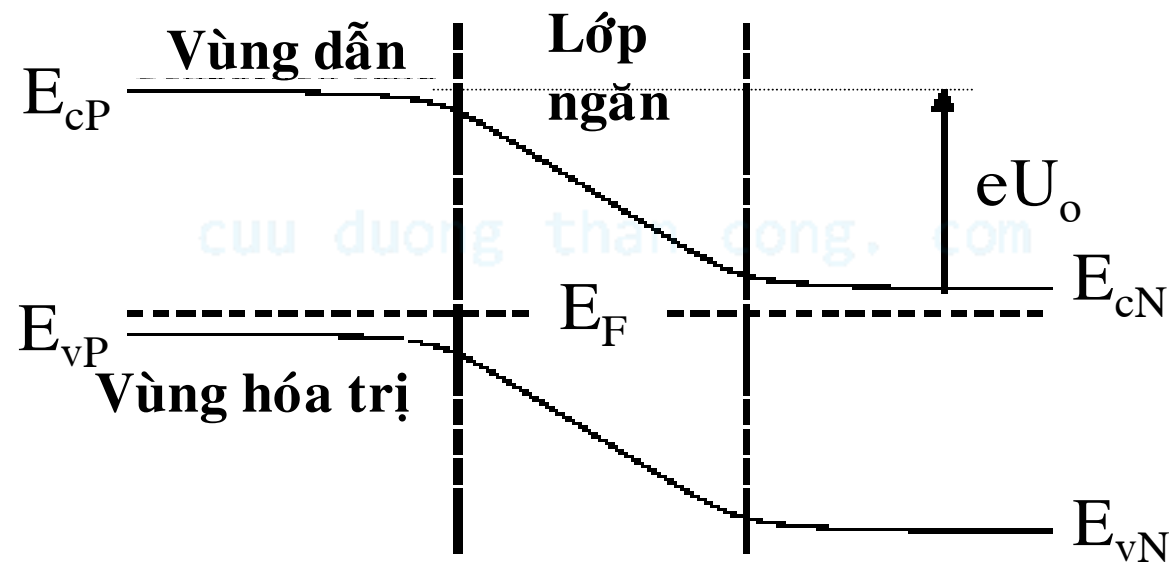
?

E_{vP} ——— E_F ——— E_{cN}

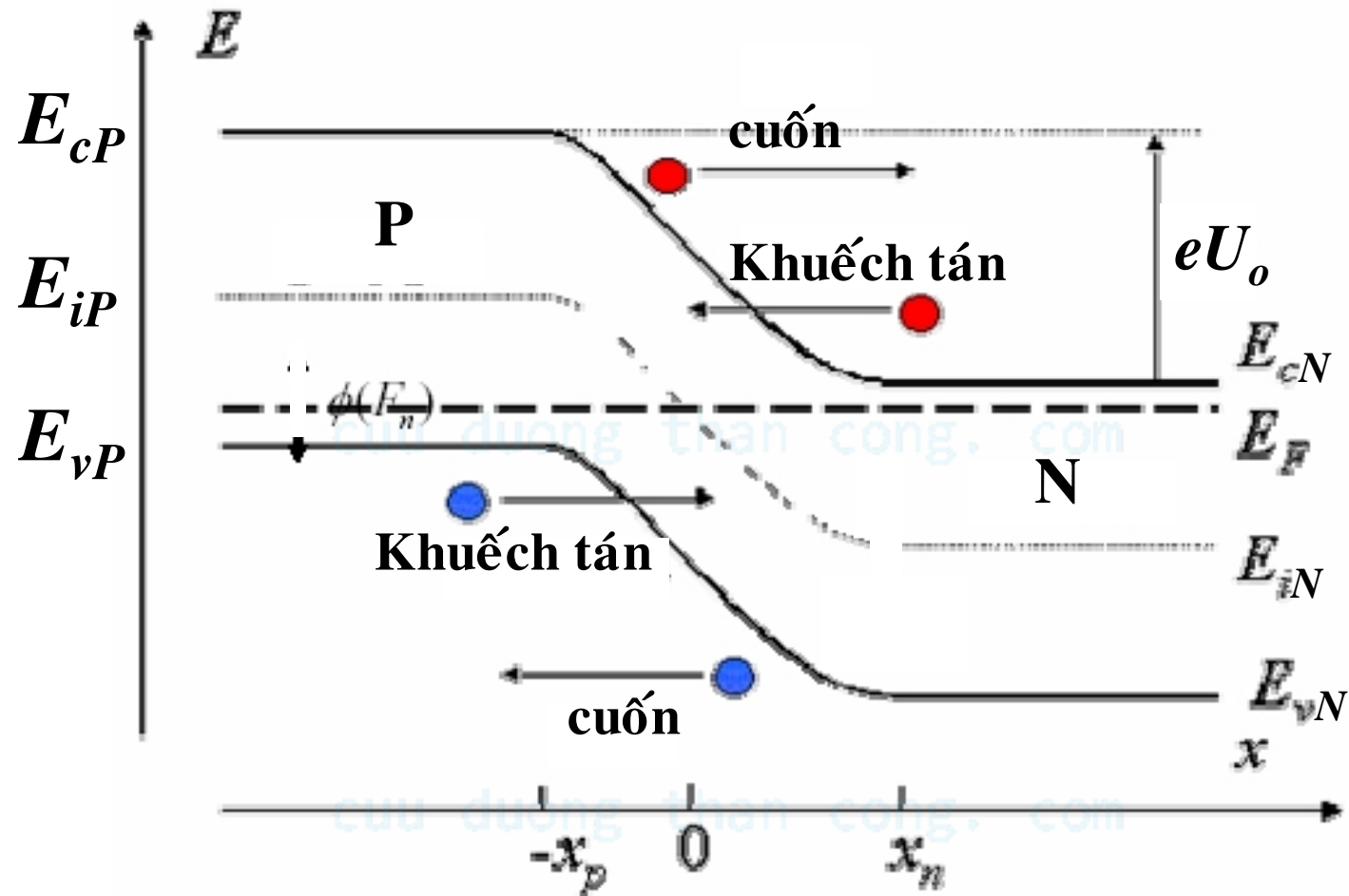


?

E_{vN}

Chuyển tiếp P – N : điều kiện cân bằng



2) Thế hiệu tiếp xúc

Miền điện tích thể tích chỉ có các điện tích cố định (các ion N_D^+ và các ion N_A^-) nên điện trở của miền này rất hơn điện trở của các miền P và N trung hòa.

Trong miền N :
$$n_{oN} = N_c \exp \frac{E_F - E_{cN}}{kT}$$

$$n_{oN} p_{oN} = n_i^2$$

Khi $E_F = E_{iN}$ thì $n_{oN} = n_i$ nên có thể viết

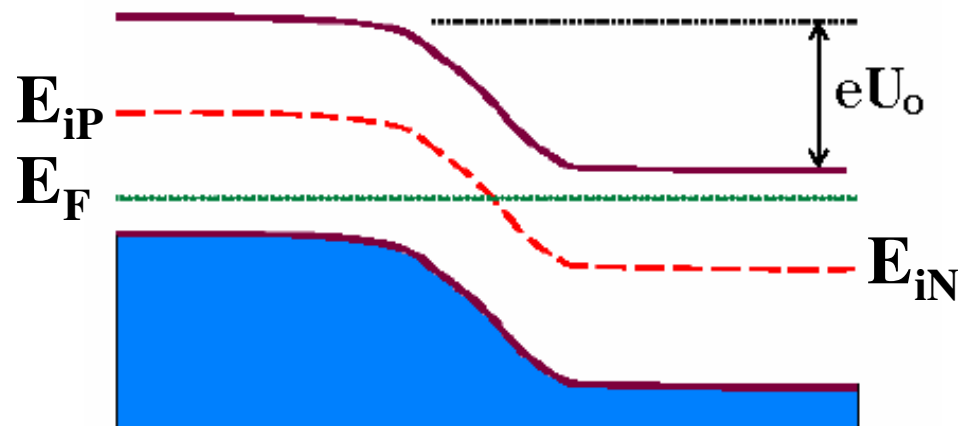
$$n_{oN} = n_i \exp \frac{E_F - E_{iN}}{kT}$$

Thế hiệu tiếp xúc

Trong miền P : $n_{oP} p_{oP} = n_i^2$

$$p_{oP} = N_v \exp - \frac{E_F - E_{vP}}{kT}$$

$$p_{oP} = n_i \exp - \frac{E_F - E_{iP}}{kT}$$

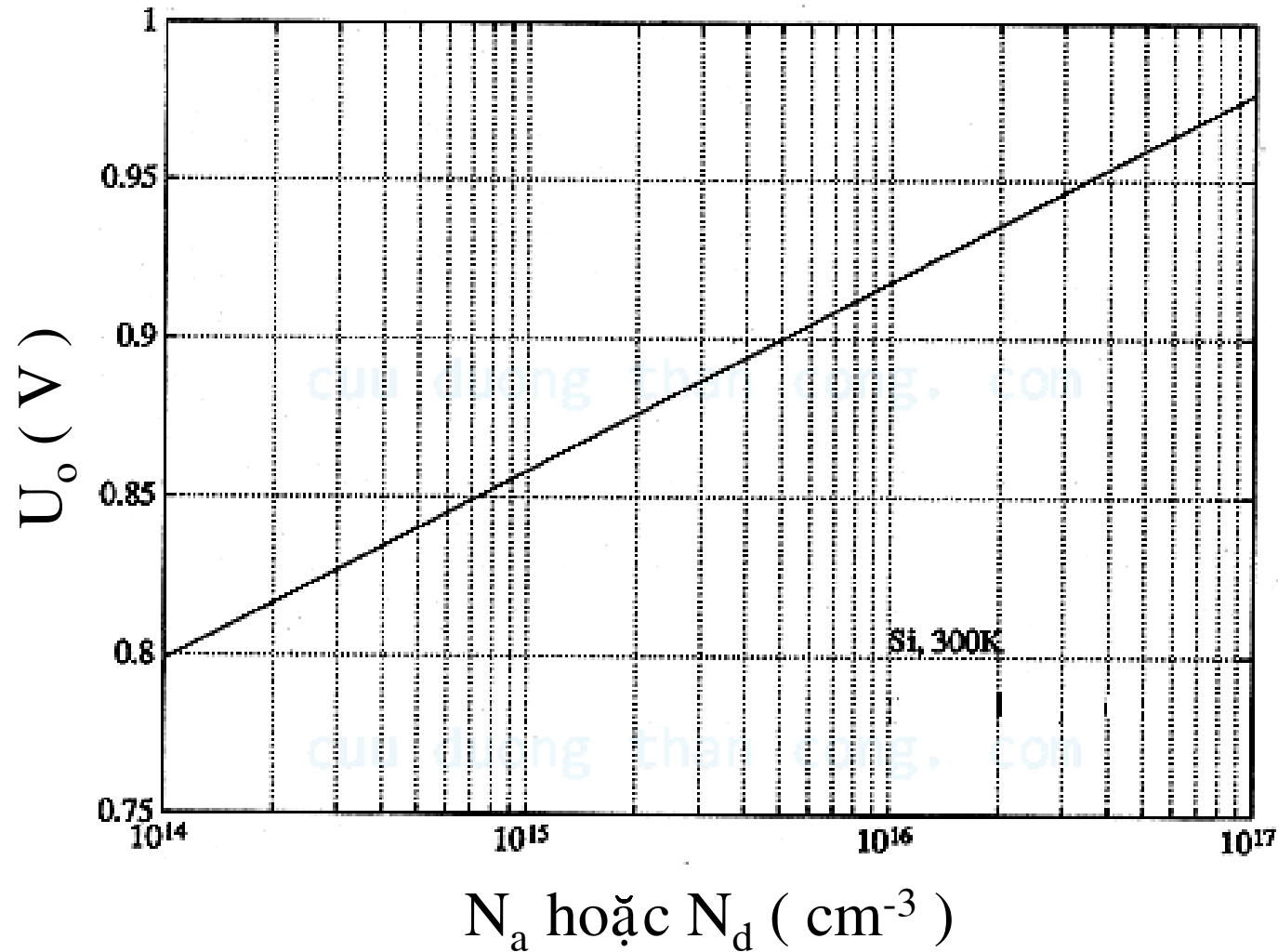


$$n_{oN} p_{oP} = n_i^2 \exp \frac{E_{iP} - E_{iN}}{kT} \rightarrow \frac{n_{oN} p_{oP}}{n_i^2} = \exp \frac{eU_o}{kT}$$

Thế hiệu tiếp xúc :

$$U_o = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{oN}}{n_{oP}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_{oP}}{p_{oN}}$$

Thế hiệu tiếp xúc phụ thuộc vào nồng độ tạp chất trong các chuyển tiếp P⁺ N hoặc N⁺ P



3) Chuyển tiếp P – N : đặc trưng Von-Ampe

Xét lớp chuyển tiếp P-N .

Có các dòng sau chạy qua lớp chuyển tiếp đó :

+ dòng lỗ trống từ miền P sang miền N : \dot{J}_p
(dòng hạt tải điện cơ bản)

+ dòng lỗ trống từ miền N sang miền P : \dot{J}_{ps}
(dòng hạt tải điện không cơ bản)

+ dòng electron từ miền N sang miền P : \dot{J}_n
(dòng hạt tải điện cơ bản)

+ dòng electron từ miền P sang miền N : \dot{J}_{ns}
(dòng hạt tải điện không cơ bản)

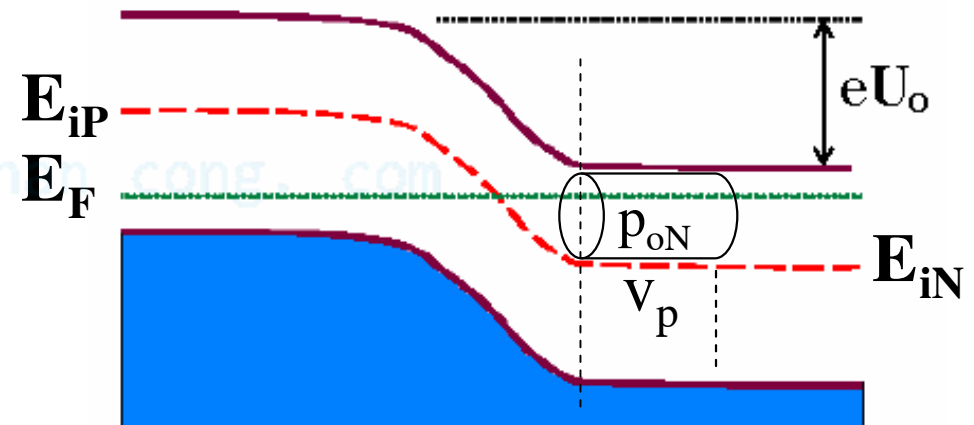
Khi không đặt điện áp ngoài vào , dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

$$j = (j_n + j_p) - (j_{ps} + j_{ns}) = 0$$

trong đó

$$j_{ns} = en_{oP} \frac{L_n}{\tau_n}$$

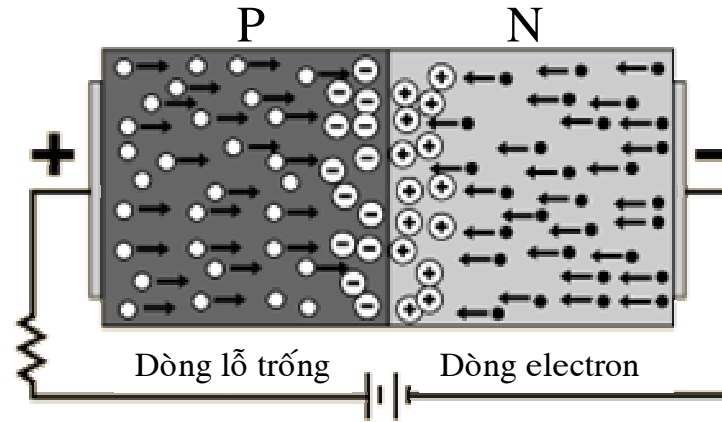
$$j_{ps} = ep_{oN} \frac{L_p}{\tau_p}$$



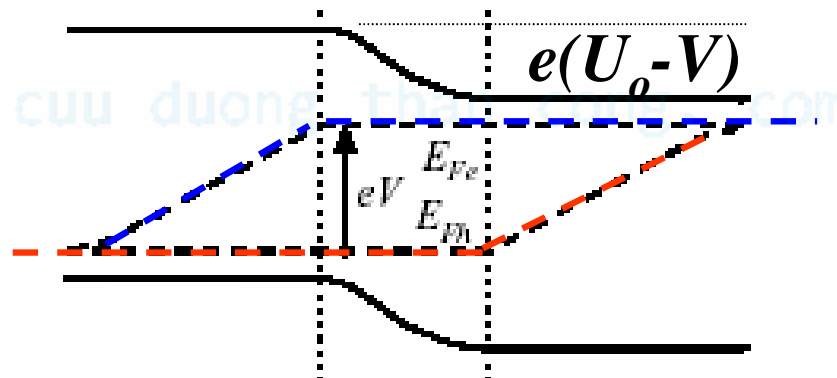
Đặt điện áp V lên hệ P-N.

- Do điện trở của lớp điện tích thể tích rất lớn nên gần đúng có thể xem toàn bộ V sụt hết trên miền này.
- Xét trường hợp lớp ngăn mỏng để có thể bỏ qua các quá trình sinh và tái hợp các hạt tải điện trong miền này.

a. Chuyển tiếp P – N : phân cực thuận



Điện áp V tạo điện trường ngoài ngược chiều với điện trường tiếp xúc. Do hai điện trường ngược chiều nhau nên điện trường tổng cộng trong lớp chuyển tiếp giảm xuống. Thế hiệu tiếp xúc bây giờ bằng $e (U_0 - V)$



Sự giảm này không ảnh hưởng gì đến các dòng hạt tải điện không cơ bản nhưng làm tăng các dòng hạt tải điện cơ bản :

$$j_n = j_{ns} \exp \frac{eV}{kT} = en_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} \exp \frac{eV}{kT}$$

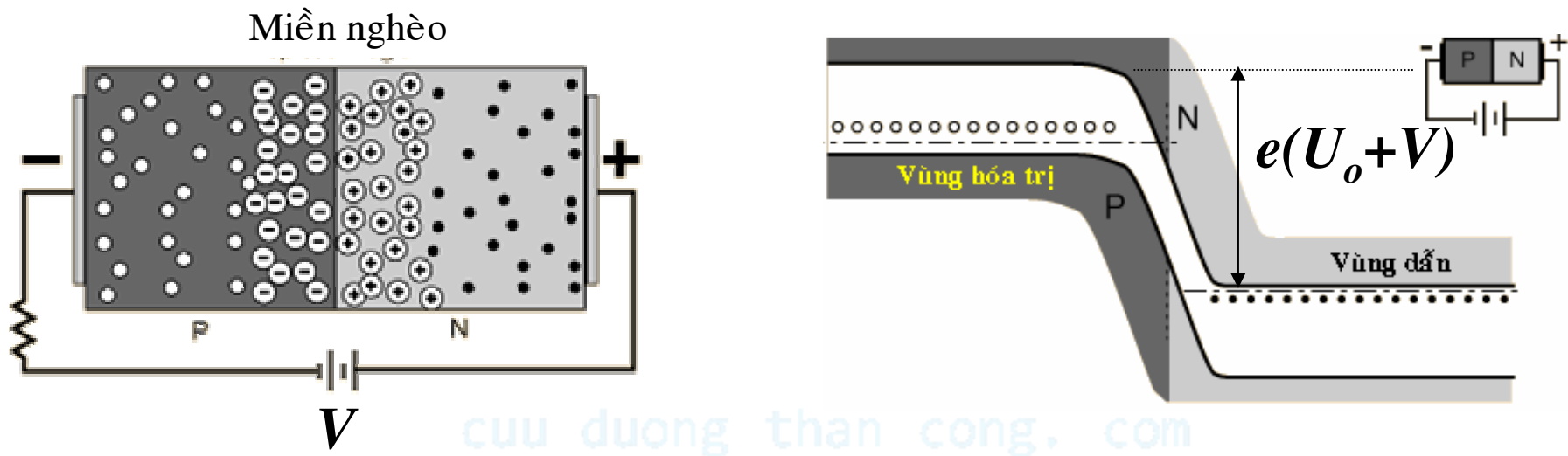
$$j_p = j_{ps} \exp \frac{eV}{kT} = ep_{oN} \frac{L_p}{\tau_p} \exp \frac{eV}{kT}$$

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

$$j = (j_n + j_p) - (j_{ns} + j_{ps})$$

$$= (j_{ns} + j_{ps})(\exp \frac{eV}{kT} - 1) = e(n_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} + p_{oN} \frac{L_p}{\tau_p})(\exp \frac{eV}{kT} - 1)$$

b. Chuyển tiếp P – N : phân cực ngược



Điện áp V tạo điện trường ngoài cùng chiều với điện trường tiếp xúc. Do hai điện trường cùng chiều nhau nên điện trường tổng cộng trong lớp chuyển tiếp tăng lên. Thế hiệu tiếp xúc bây giờ bằng $e (U_0 + V)$.

Sự tăng thế này không ảnh hưởng gì đến các dòng hạt tải điện không cơ bản nhưng làm giảm các dòng hạt tải điện cơ bản :

$$j_n = j_{ns} \exp - \frac{eV}{kT} = en_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} \exp - \frac{eV}{kT}$$

$$j_p = j_{ps} \exp - \frac{eV}{kT} = ep_{oN} \frac{L_p}{\tau_p} \exp - \frac{eV}{kT}$$

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

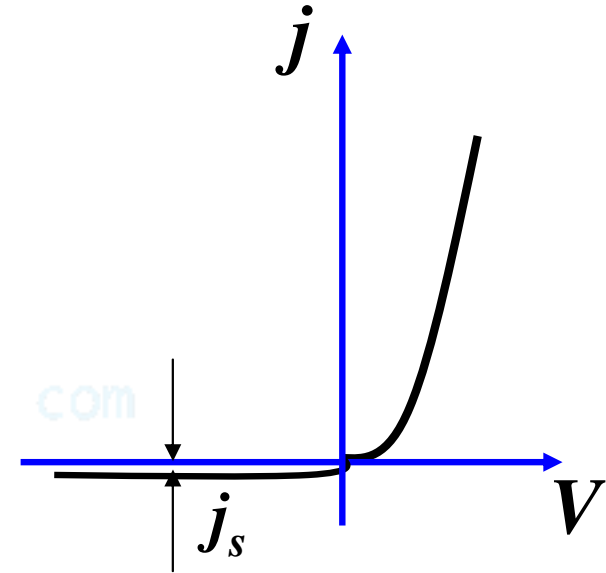
$$j = (j_n + j_p) - (j_{ns} + j_{ps})$$

$$= (j_{ns} + j_{ps}) \left(\exp \frac{-eV}{kT} - 1 \right) = e \left(n_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} + p_{oN} \frac{L_p}{\tau_p} \right) \left(\exp \frac{-eV}{kT} - 1 \right)$$

Kết hợp các kết quả trên, có thể viết biểu thức của đường đặc trưng Von - Ampe dưới dạng

$$j = j_s \left(\exp \pm \frac{eV}{kT} - 1 \right)$$

trong đó lấy dấu + nếu phân cực thuận
và dấu - khi phân cực ngược.



với $j_s = (j_{ns} + j_{pn}) = e \left(n_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} + p_{oN} \frac{L_p}{\tau_p} \right)$

$$j_s = e \left(n_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} + p_{oN} \frac{L_p}{\tau_p} \right) = en_i^2 \left(\frac{L_n}{N_A \tau_n} + \frac{L_p}{N_D \tau_p} \right)$$

phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ .

