

Chương VII

Các chất bán dẫn

cuu duong than cong, com

I. CẤU TRÚC VÙNG NĂNG LƯỢNG CỦA CHẤT BÁN DẪN

Từ đường tán sắc $E(k)$ có thể xác định được nhiều tính chất của vật liệu.

Thực tế các tính chất liên quan tới điện tử (tính chất quang, dẫn điện ...) của các chất bán dẫn hoàn toàn được xác định bởi số electron nằm ở vùng dẫn và lỗ trống ở vùng hóa trị

→ chỉ quan tâm đến các nhánh $E(k)$ liên quan tới vùng dẫn và vùng hóa trị trong phạm vi của vùng Brillouin.

Vùng dẫn: Vị trí (cực tiểu) thấp nhất của một nhánh $E(k)$ của vùng dẫn \rightarrow xác định đáy vùng dẫn. Ta có:

$$E(k) = E(k_0) + \frac{\hbar^2 \left[\frac{k_x^2}{2m_1} + \frac{k_y^2}{2m_2} + \frac{k_z^2}{2m_3} \right]}{2m_1} + \frac{\hbar^2 \left[\frac{k_z^2}{2m_3} \right]}{2m_3}$$

Với $m_1 = m_2 = m_T$: khối lượng hiệu dụng ngang

$m_3 = m_L$: khối lượng hiệu dụng dọc

\Rightarrow Xác định bằng phương pháp cộng hưởng Cyclotron

Tỉ số $\frac{m_L}{m_T}$: xác định tính dị hướng của mặt đẳng năng.

Vùng hóa trị: Cực đại của cả ba nhánh $E(k)$ của vùng hóa trị đều ở vị trí $k = 0 \rightarrow$ đỉnh vùng hóa trị ở tâm của vùng Brillouin tại $k = 0$ có suy biến năng lượng; tương tác spin – quỹ đạo làm giảm suy biến một phần.

*** Trong hai nhánh đầu:**

+ Trong vùng hóa trị khối lượng hiệu dụng được tính bởi:

$$m_p = \frac{m}{A \pm \sqrt{B^2 + \frac{C^2}{5}}}$$

với A, B, C là các hằng số không thứ nguyên phụ thuộc vào các chất bán dẫn.

Có hai loại lỗ trống:

+ Lỗ trống nặng:

$$m_{p \text{ nặng}} = \frac{m}{A - \sqrt{B^2 + \frac{C^2}{5}}}$$

+ Lỗ trống nhẹ:

$$m_{p \text{ nhẹ}} = \frac{m}{A + \sqrt{B^2 + \frac{C^2}{5}}}$$

* Nhánh thứ ba:

Khối lượng của lỗ trống:

$$m_{p 3.} = \frac{m}{A}$$

Khoảng cách ngắn nhất giữa đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hóa trị bằng **độ rộng vùng cấm E_g** .

Các chất có đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hóa trị nằm cùng một điểm trong vùng B (cùng k) \rightarrow ***chất có vùng cấm thẳng hay trực tiếp.***

VD: GaAs.

Ngược lại: chất có đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hóa trị nằm cùng một điểm trong vùng B (khác k) \rightarrow ***chất có vùng cấm nghiêng hay gián tiếp.***

VD: GaP.

II. BÁN DẪN TINH KHIẾT

BÁN DẪN TẠP CHẤT

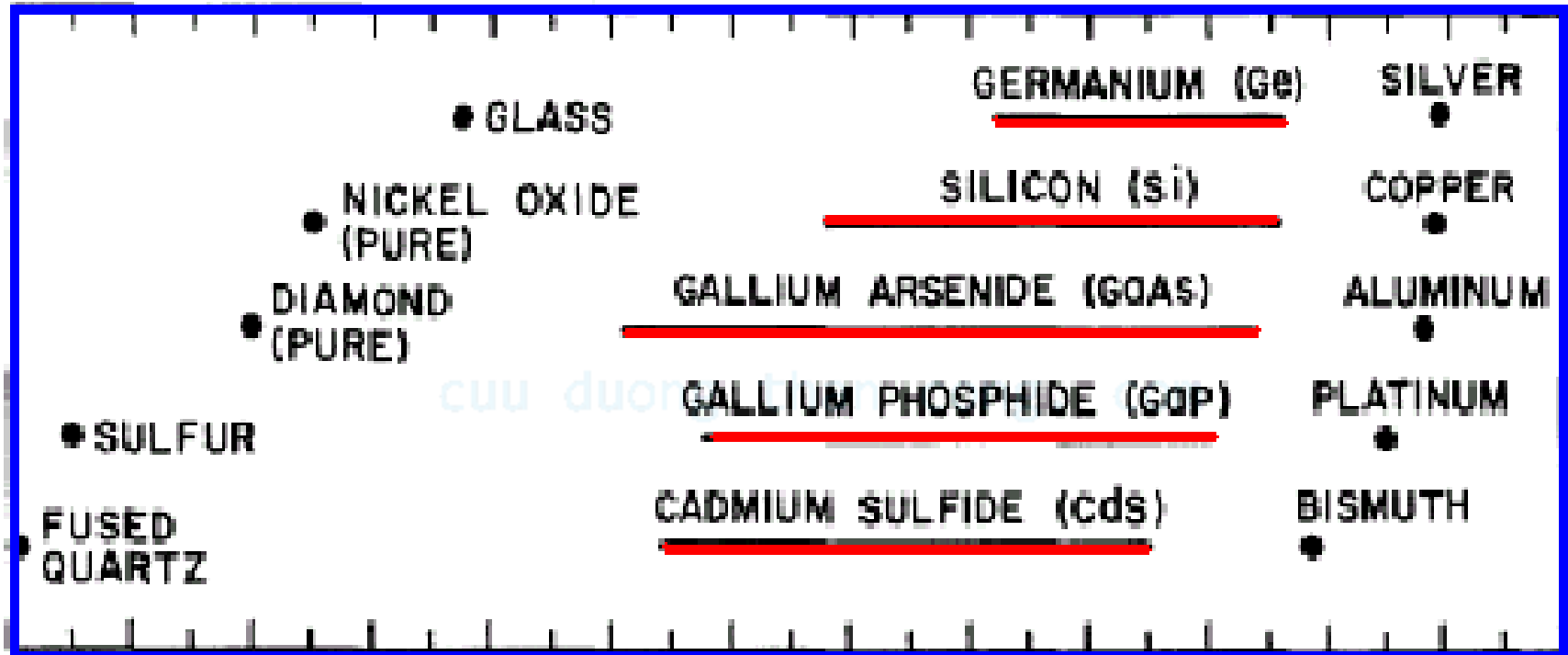
Định nghĩa

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)

Điện trở suất ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)

10^{18} 10^{16} 10^{14} 10^{12} 10^{10} 10^8 10^6 10^4 10^2 1 10^{-2} 10^{-4} 10^{-6} 10^{-8}



10^{-18} 10^{-16} 10^{-14} 10^{-12} 10^{-10} 10^{-8} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 1 10^2 10^4 10^6 10^8

Độ dẫn điện σ (S/cm)



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 ...

Bán dẫn sạch hay bán dẫn tinh khiết \rightarrow không pha tạp chất \rightarrow còn gọi là *chất bán dẫn điện riêng*.

Pha tạp vào chất bán dẫn làm độ dẫn điện của nó thay đổi mạnh \Rightarrow *Bán dẫn tạp chất*.

VÍ DỤ

Pha B và Si theo nồng độ $1:10^5 \rightarrow$ độ dẫn điện tăng thêm 10^3 lần.

Pha tạp với nồng độ thích hợp có thể đạt được:

- + Chất bán dẫn có độ dẫn điện mong muốn.
- + Chất bán dẫn loại n hay p.

Khi đưa tạp chất vào tinh thể bán dẫn: tạp có thể thế chỗ các nguyên tử gốc ở nút mạng \rightarrow *tạp chất thay thế.*

hay nằm xen kẽ vào giữa các nút mạng \rightarrow *tạp chất điền khuyết.*

Các chất bán dẫn nguyên tố

Chu kỳ	II	III	IV	V	VI
2		B <i>Boron</i>	C <i>Carbon</i>	N <i>Nitrogen</i>	
3	Mg <i>Magnesium</i>	Al <i>Aluminum</i>	Si <i>Silicon</i>	P <i>Phosphorus</i>	S <i>Sulfur</i>
4	Zn <i>Zinc</i>	Ga <i>Gallium</i>	Ge <i>Germanium</i>	As <i>Arsenic</i>	Se <i>Selenium</i>
5	Cd <i>Cadmium</i>	In <i>Indium</i>	Sn <i>Tin</i>	Sb <i>Antimony</i>	Te <i>Tellurium</i>
6	Hg <i>Mercury</i>		Pb <i>Lead</i>		

Các chất bán dẫn hợp chất

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

Element	Compounds IV-IV	Compounds III-V	Compounds II-VI	Compounds 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

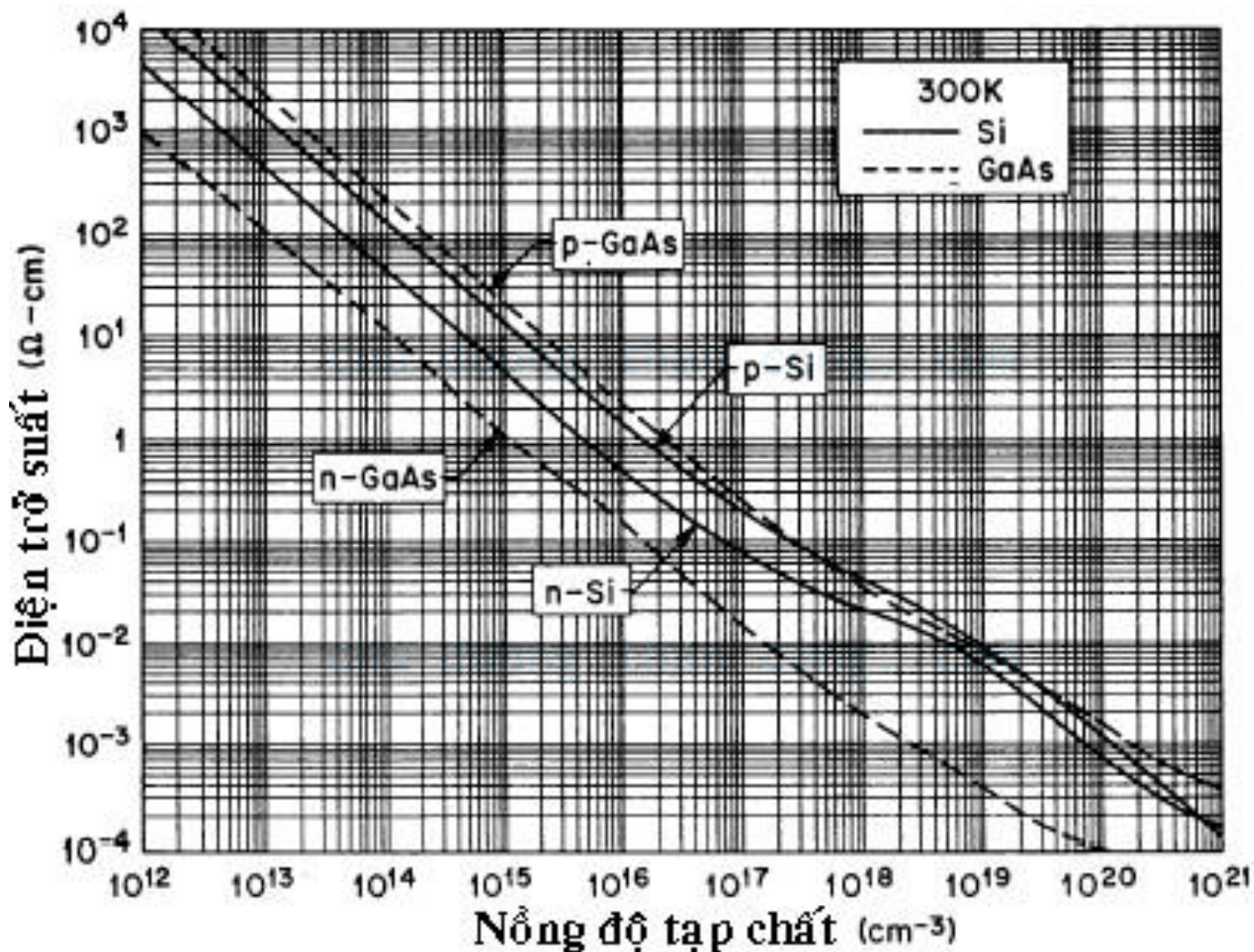
Tạp chất làm thay đổi rất nhiều độ dẫn điện của các chất bán dẫn .

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 ($^{\circ}\text{C}$)

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

t_o (thường là 0 hoặc 20°C)

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 (Ωm)		Hệ số nhiệt trên độ C	Độ dẫn điện σ $\times 10^7 / \Omega\text{m}$
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

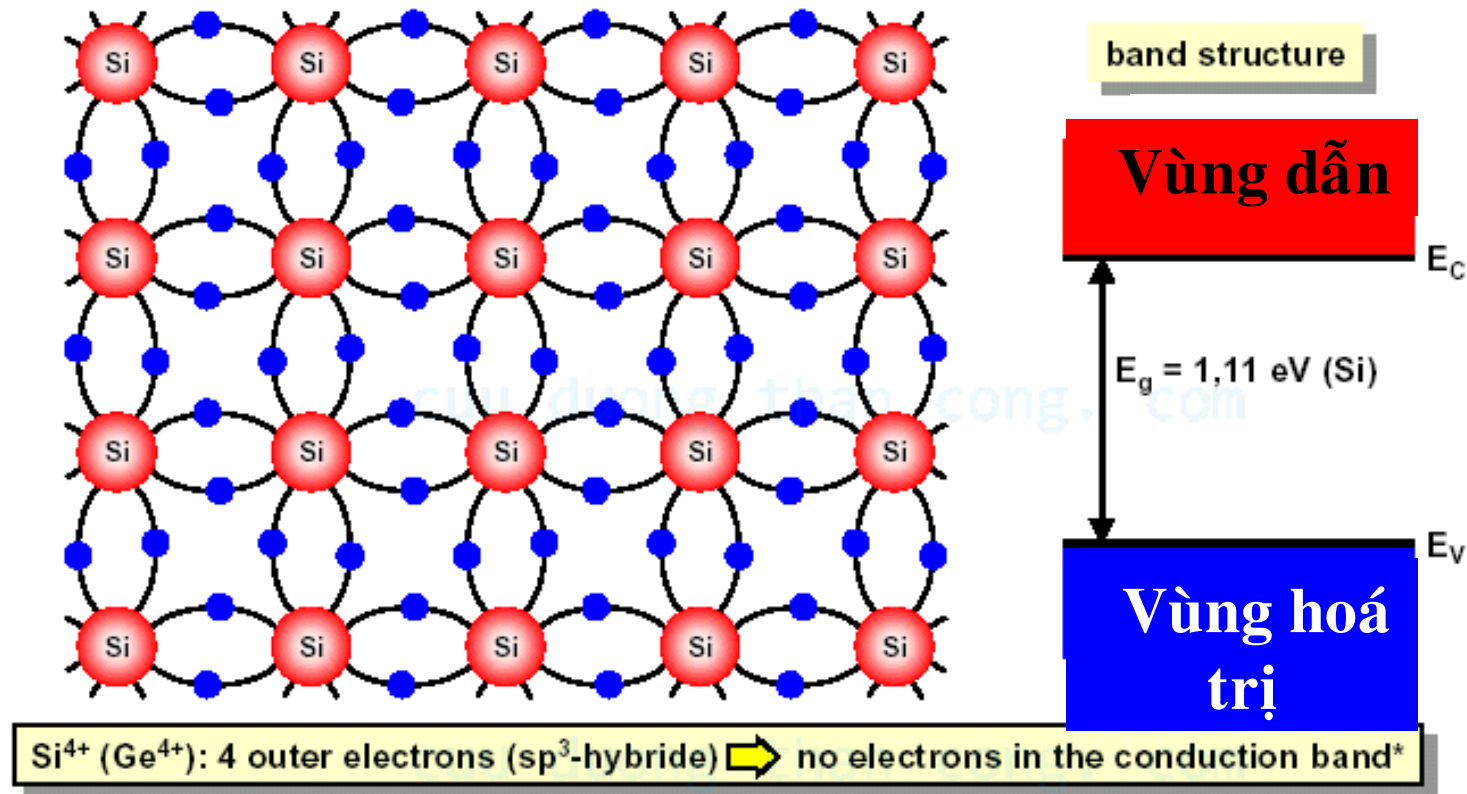
Sự phụ thuộc của điện trở vào nhiệt độ

Chất bán dẫn :

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

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

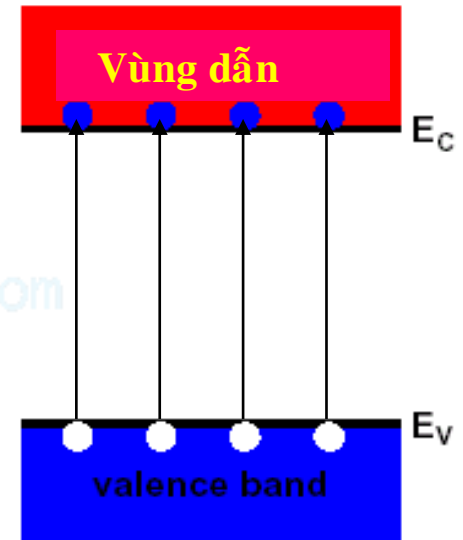
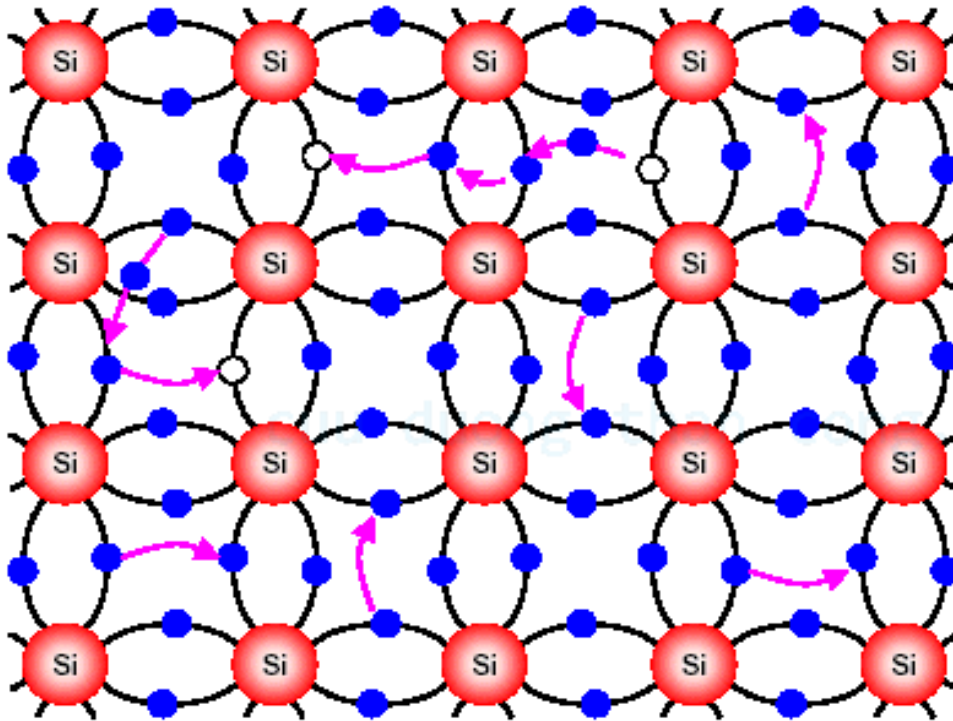
Sự dẫn điện trong Si sạch ở nhiệt độ $T = 0 \text{ K}$



$\text{Si}^{4+} (\text{Ge}^{4+})$: 4 electron ngoài (liên kết lai sp^3)

Không có electron trong vùng dẫn

Sự dẫn điện trong Si sạch ở nhiệt độ $T > 0$ K

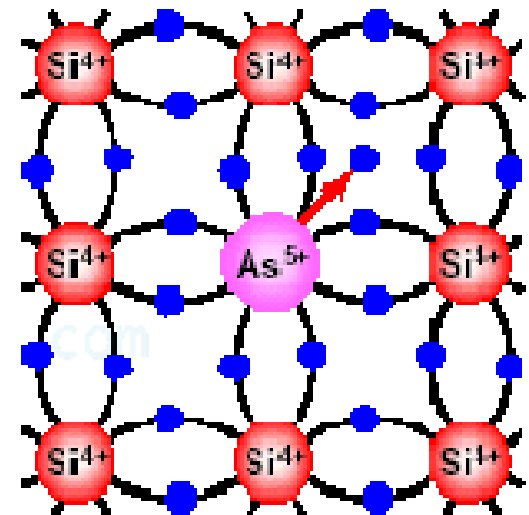
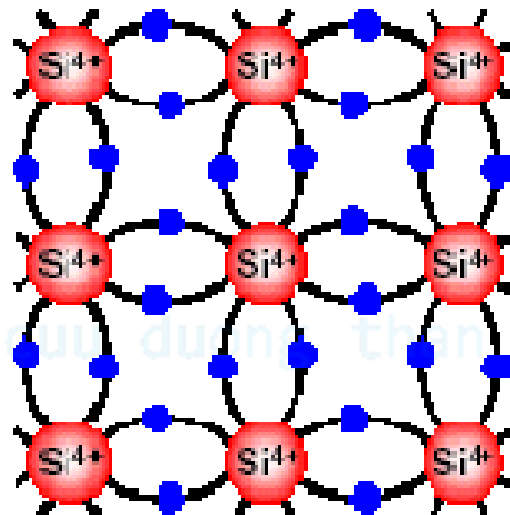


$T > 0$: electron trong vùng dẫn

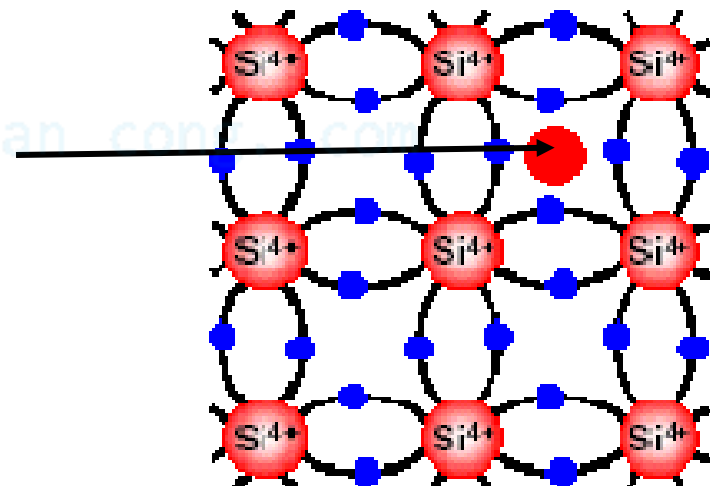
lỗ trống trong vùng hóa trị

Tạp chất trong các chất bán dẫn

❖ Tạp chất thay thế



❖ Tạp chất điện khít



Tạp chất trong các chất bán dẫn

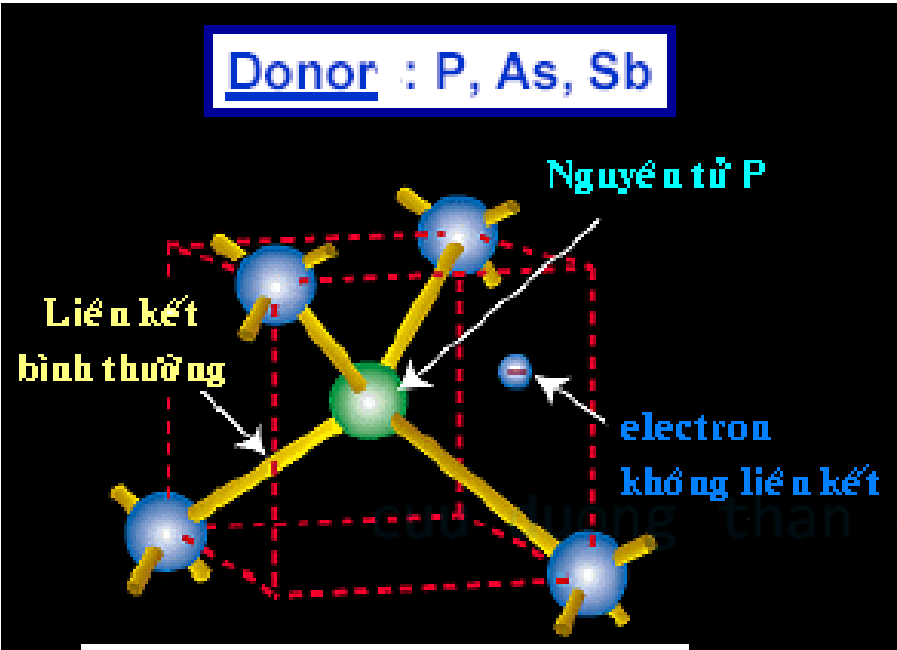
Tạp chất donor và acceptor

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

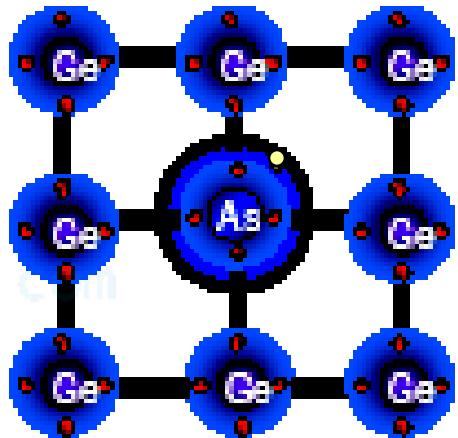
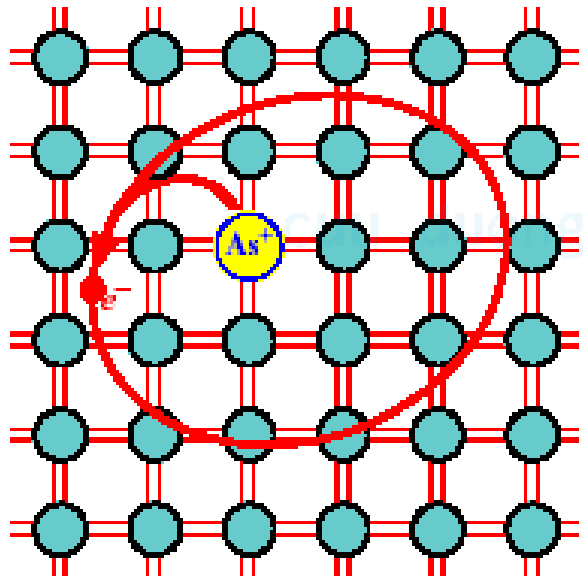
acceptor

Donor

Taịp chaát thuөөc nhóm V trong chaát bầu ấấn nhóm IV



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



- Nguyên tử **As** thế chỗ một nguyên tử **Ge** ở nút:

Bốn hóa trị của **As** liên kết với bốn nguyên tử **Ge** lân cận, electron hóa trị thứ năm của nó liên kết lỏng lẻo với nguyên tử **As** → có thể chuyển động tương đối tự do trong phạm vi rộng xung quanh nguyên tử **As** gốc của nó → hạt tải điện chính là electron → **As** được gọi là **tạp chất cho (Donor)** → bán dẫn này là **bán dẫn loại n**.

Mức năng lượng của electron của tạp chất E_D này nằm trong vùng cấm và gần đáy vùng dẫn.

Chú ý: Các electron nằm ở các mức tạp chất không hoàn toàn tự do như các electron trên vùng dẫn mà phân bố gần các tâm tạp chất → mức tạp là mức định xứ.

Để tách electron thứ 5 khỏi nguyên tử As ta dùng công thức của năng lượng liên kết trong nguyên tử Hydro:

$$E_i = - \frac{m e^4}{2 \cdot 4 \pi \epsilon_0 \hbar^2} = -13,6 \text{ (eV)}$$

Nhưng thay $m \rightarrow m^*$; $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon_0 \epsilon_r$

→ Năng lượng ion của nguyên tử tạp chất As:

$$E_i = 13,6 \frac{m^*}{m \epsilon_r^2}$$

Năng lượng liên kết

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

m_o - khối lượng của electron tự do

e - điện tích của electron

ϵ_o - hằng số điện môi của chân không

\hbar - 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 donor

$$E_i = - \frac{m^* e^4}{2 (4 \pi \epsilon_o \epsilon_r \hbar)^2}$$

$$\text{Ge} : m^* = 0,22 m_o \quad \epsilon_r = 16$$

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

$$\text{Si} : m^* = 0,33 m_o \quad \epsilon_r = 12$$

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

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

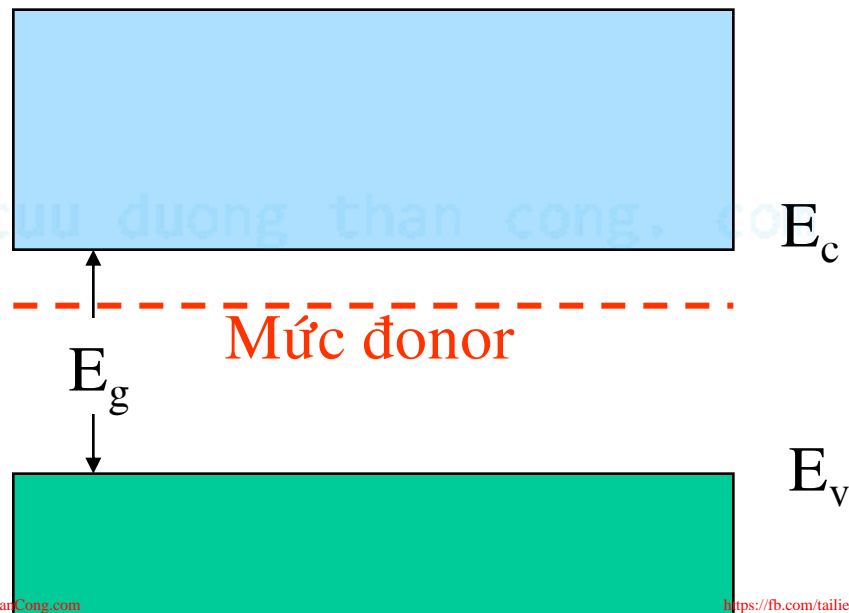
Trên thực tế, năng lượng đó có khác nhau với các tạp chất khác nhau, nhưng sự sai khác đó không lớn lắm.

Chất bán dẫn	E_g (eV) ở 273 K	Khối lượng hiệu dụng m^*/m_0		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

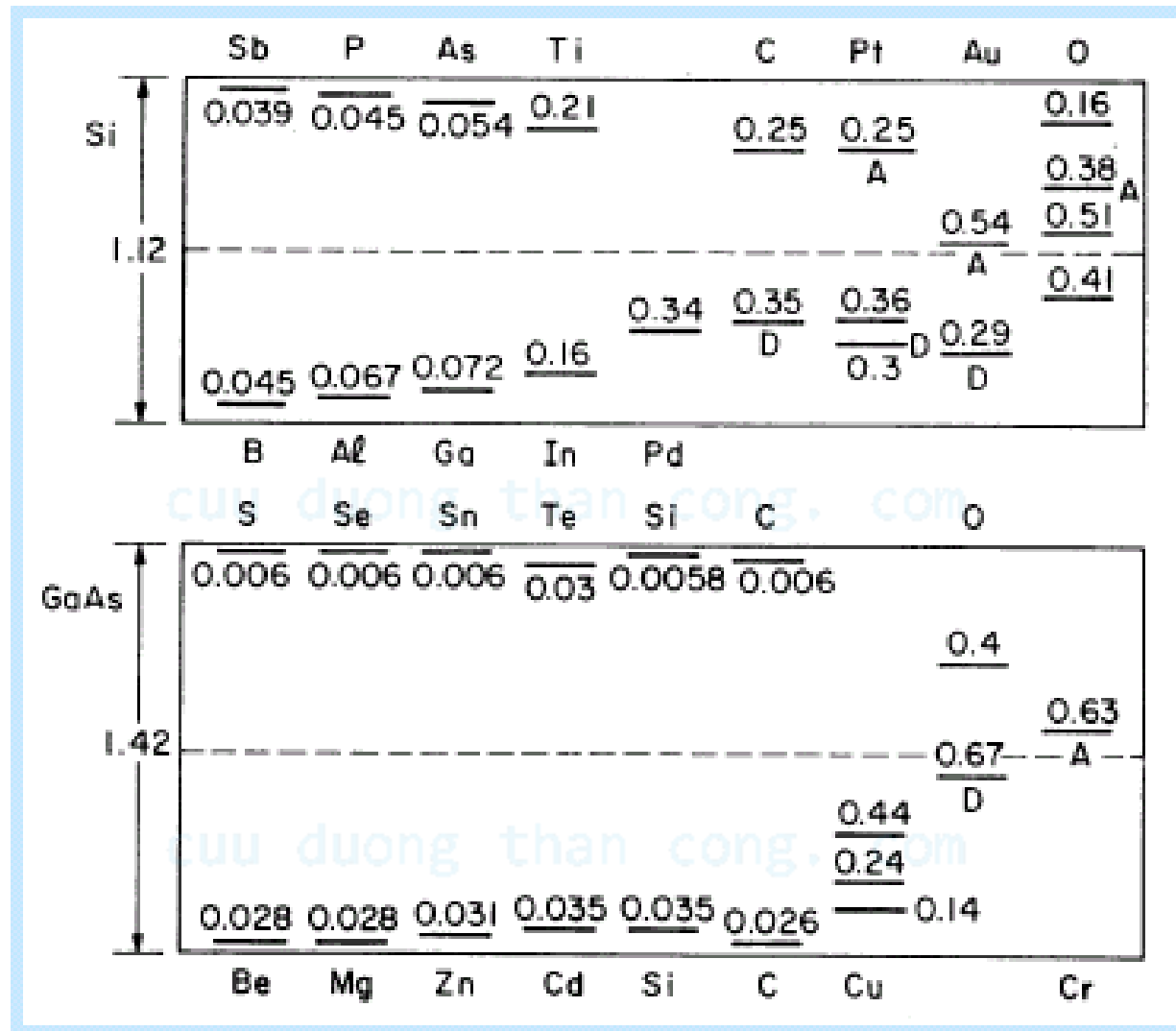
Sự xuất hiện các mức năng lượng tạp chất trong vùng cấm

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 donor* và mức tạp chất được gọi là *mức donor*



Mức năng lượng tạp chất



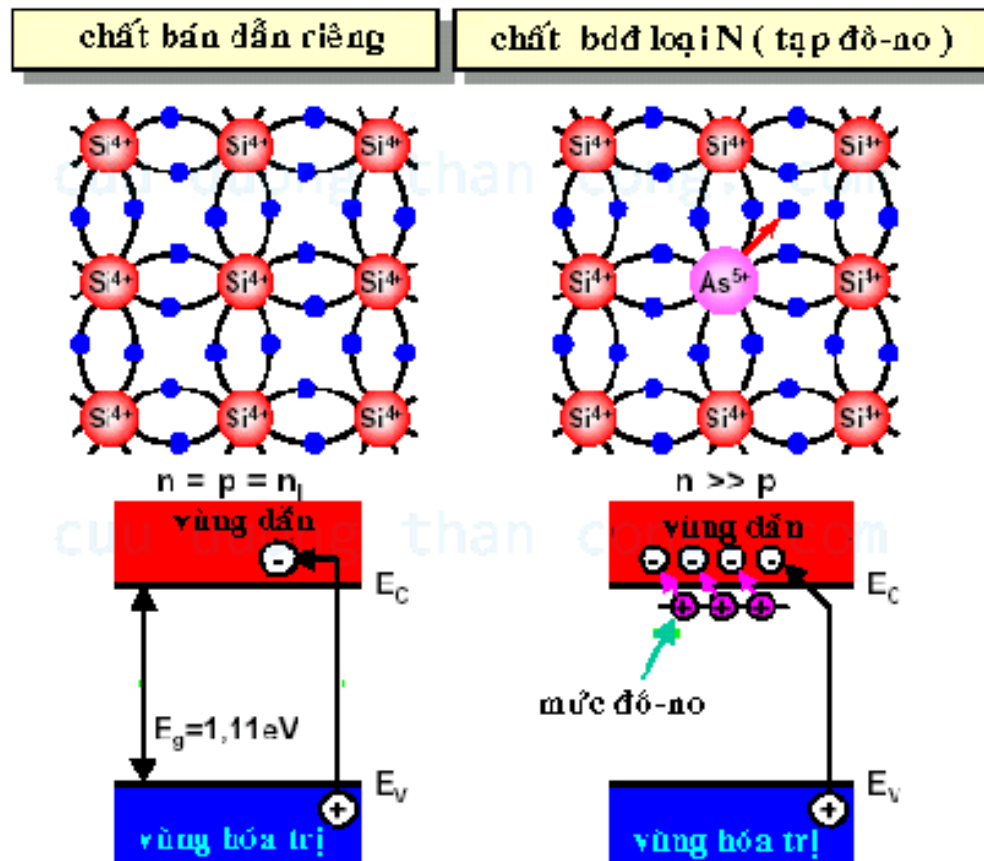
Tạp chất như As và B có mức năng lượng nằm gần các cực trị của vùng năng lượng.

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

$$n \gg p$$

Hạt tải điện cơ bản : electron

Hạt tải điện không cơ bản : lỗ trống



SỰ PHỤ THUỘC CỦA NỒNG ĐỘ ĐIỆN TỬ DẪN VÀO NHIỆT ĐỘ

Nồng độ electron từ mức Donor nhảy lên vùng dẫn:

$$n_D = A_D \exp \left(- \frac{E_D}{2 kT} \right)$$

A_D : hệ số tỉ lệ

E_D : năng lượng ion hóa của nguyên tử tạp chất (lấy gốc năng lượng là đáy vùng dẫn); $E_D \ll E_g$

$$\ln n_D = \ln A_D - \frac{E_D}{2 kT}$$

❖ Ở nhiệt độ T không cao: một số electron ở mức E_D có thể nhảy lên vùng dẫn

→ Các electron trong vùng dẫn chủ yếu là các electron từ mức E_D nhảy lên

→ Mật độ n_e của electron trong vùng dẫn lớn hơn rất nhiều so với mật độ lỗ trống n_p trong vùng hóa trị

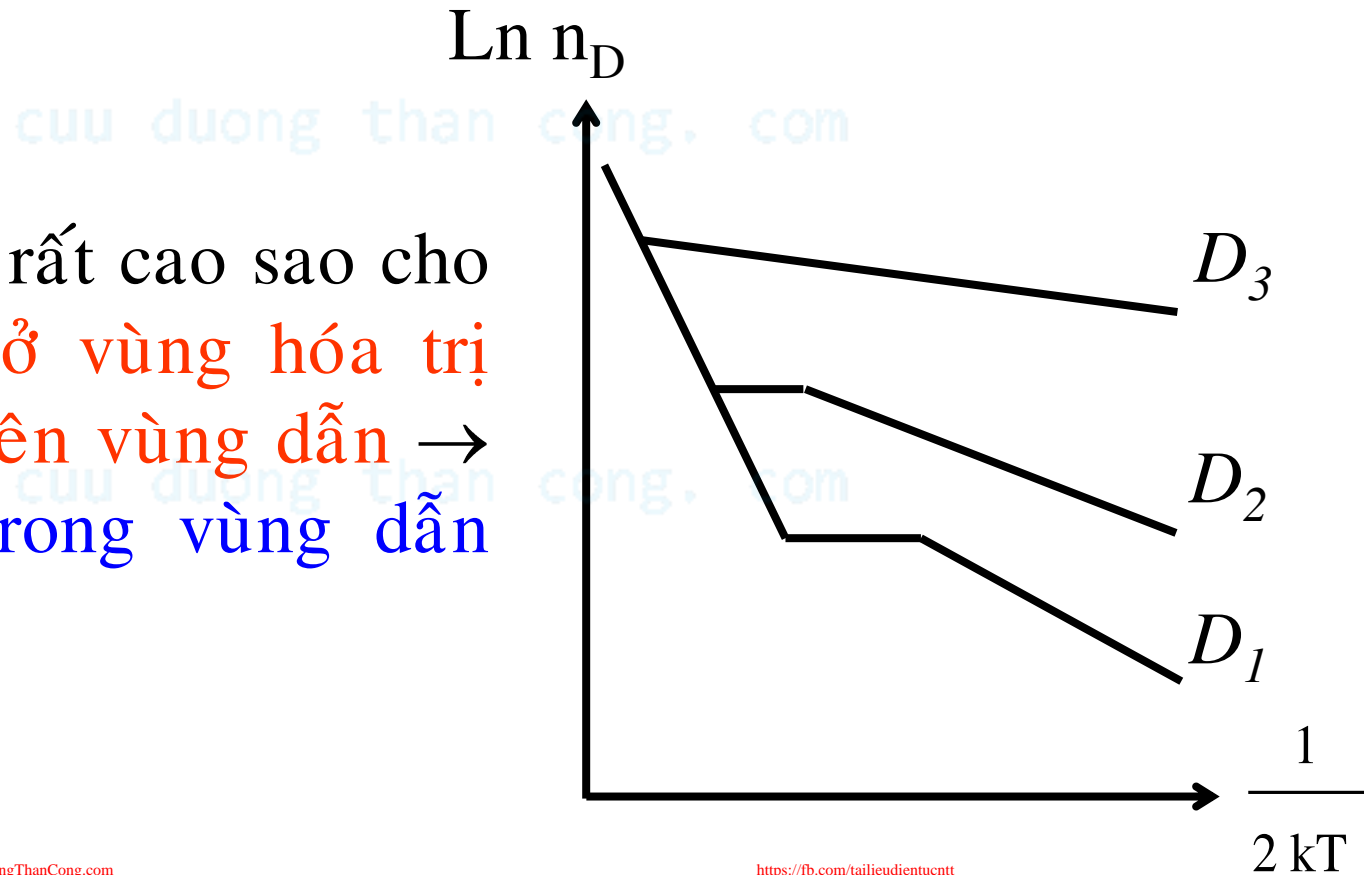
→ Hạt tải điện chủ yếu (cơ bản) là electron

→ Bán dẫn loại N.

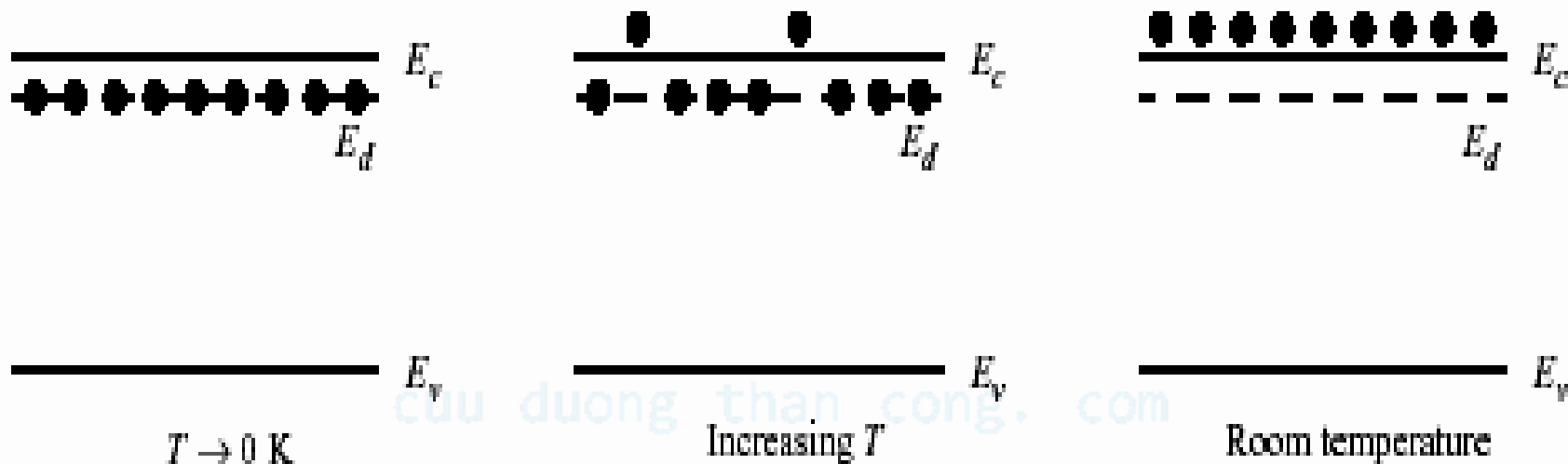
→ Đường biểu diễn của $\ln n_D$ theo E là đường thẳng có độ dốc là E_D .

❖ Ở nhiệt độ T đủ cao sao cho toàn bộ electron ở mức E_D nhảy hết được lên vùng dẫn, khi đó nếu tiếp tục tăng nhiệt độ thì nồng độ electron ở trong vùng dẫn vẫn không tăng nữa \rightarrow đường ngang.

Ở nhiệt độ T rất cao sao cho các electron ở vùng hóa trị có thể nhảy lên vùng dẫn \rightarrow số electron trong vùng dẫn tăng vọt.



Sõi phui thuөөс сuа noаng ñoă ñieăn tồ dăn văo nhieät ñoă

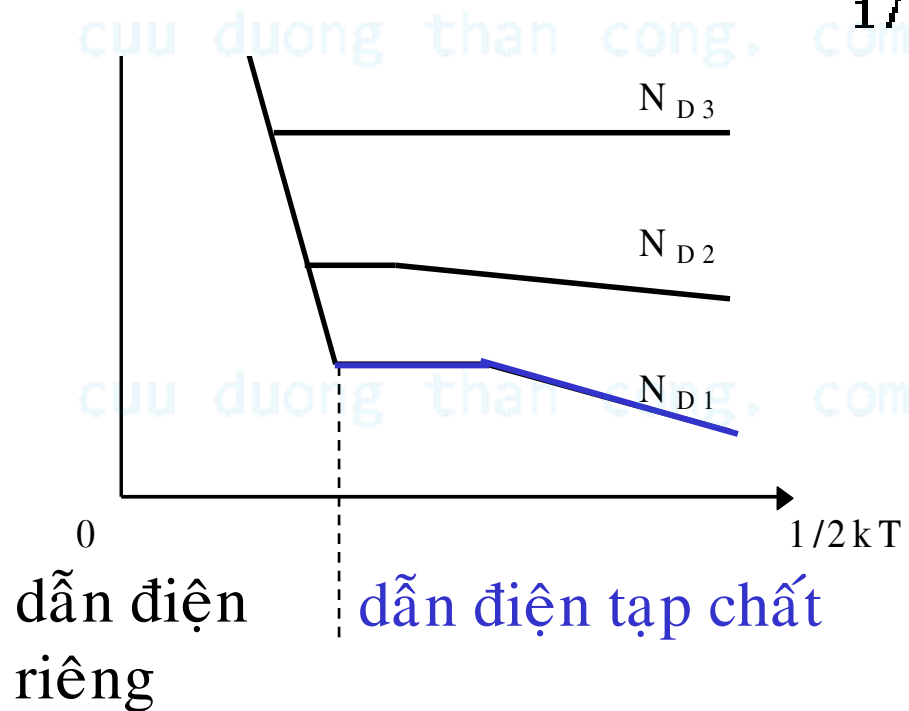
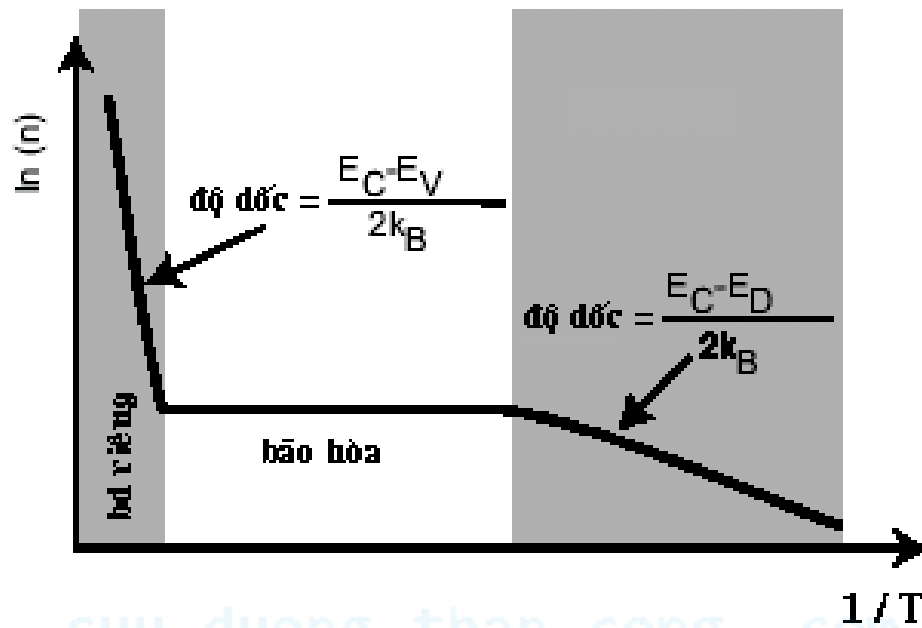


miền dẫn điện tạp chất

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

miền dẫn điện riêng

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



Khi tăng nồng độ tạp chất N_D $N_{D_2} > N_{D_1} \rightarrow$ phần nằm ngang của đường biểu diễn Lnn_D theo $\frac{1}{2kT}$ giảm

và khi đạt tới một nồng độ thích hợp (N_{D_3}) thì đoạn nằm ngang biến mất

→ Chứng tỏ các electron từ vùng hóa trị đã nhảy lên vùng dẫn trước khi hết electron ở mức E_D và năng lượng ion hóa của nguyên tử tạp chất giảm.

GIẢI THÍCH

Khi có **quá nhiều tạp chất** → khoảng cách giữa các nguyên tử tạp giảm → chúng tương tác nhau

→ **các mức năng lượng E_D mở rộng ra thành vùng**. Tối mức vùng này mở rộng và **chạm vào đáy vùng dẫn**

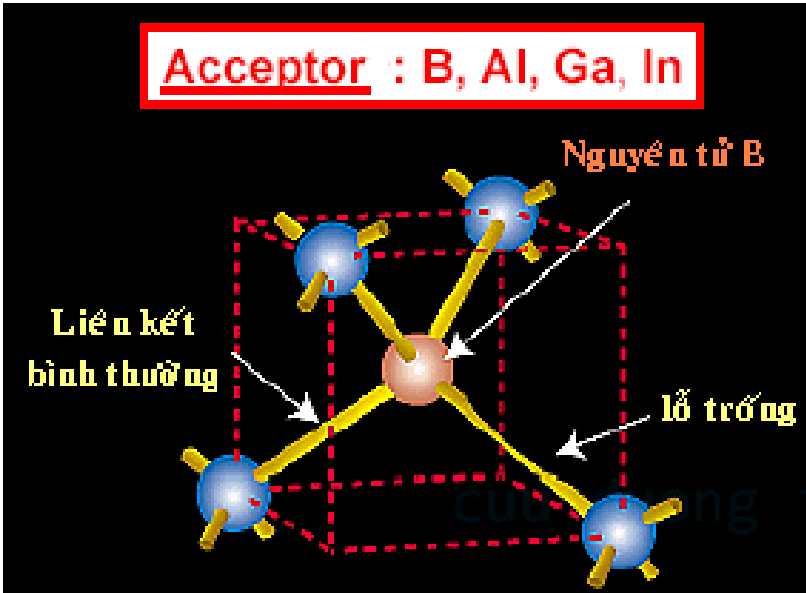
→ năng lượng ion hóa bằng 0 → Nồng độ electron tự do không đổi từ nhiệt độ rất thấp → Nhiệt độ bắt đầu quá trình dẫn điện riêng (đến khi các electron từ vùng hóa trị nhảy lên vùng dẫn)

→ **Chất bán dẫn kim loại.**

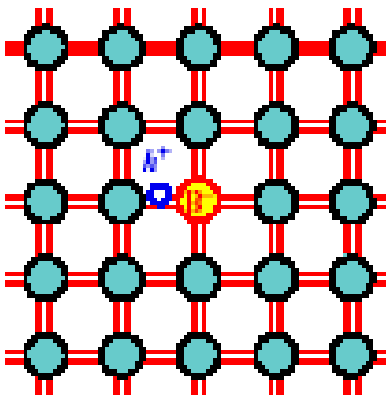
Ở nhiệt độ thấp chúng có tính chất của kim loại $n = \text{const.}$

Ở nhiệt độ đủ cao nồng độ tạp đủ để biến chất bán dẫn thành bán kim loại.

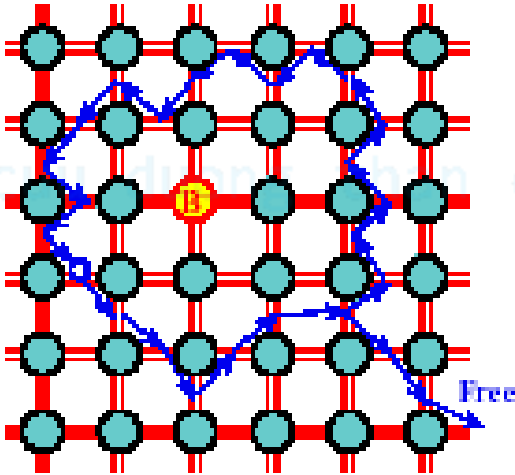
Taịp chaát thuөөc nhóm III trong chaát baùn dẫn nhóm IV



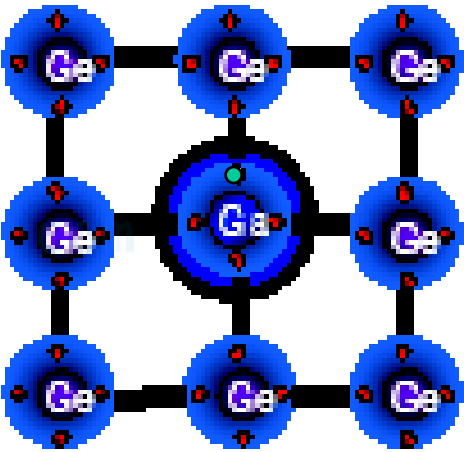
III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb
Tl	Pb	Bi



(a)



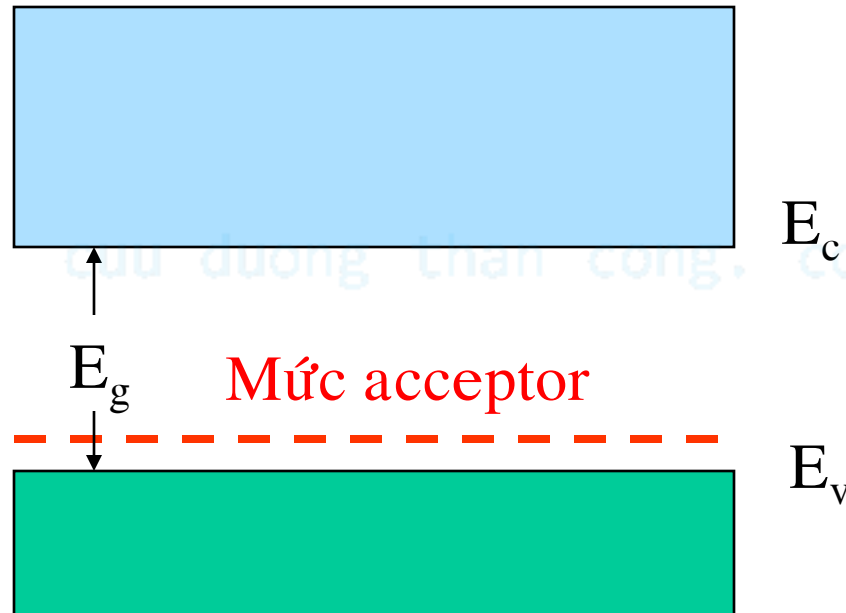
(b)



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 .

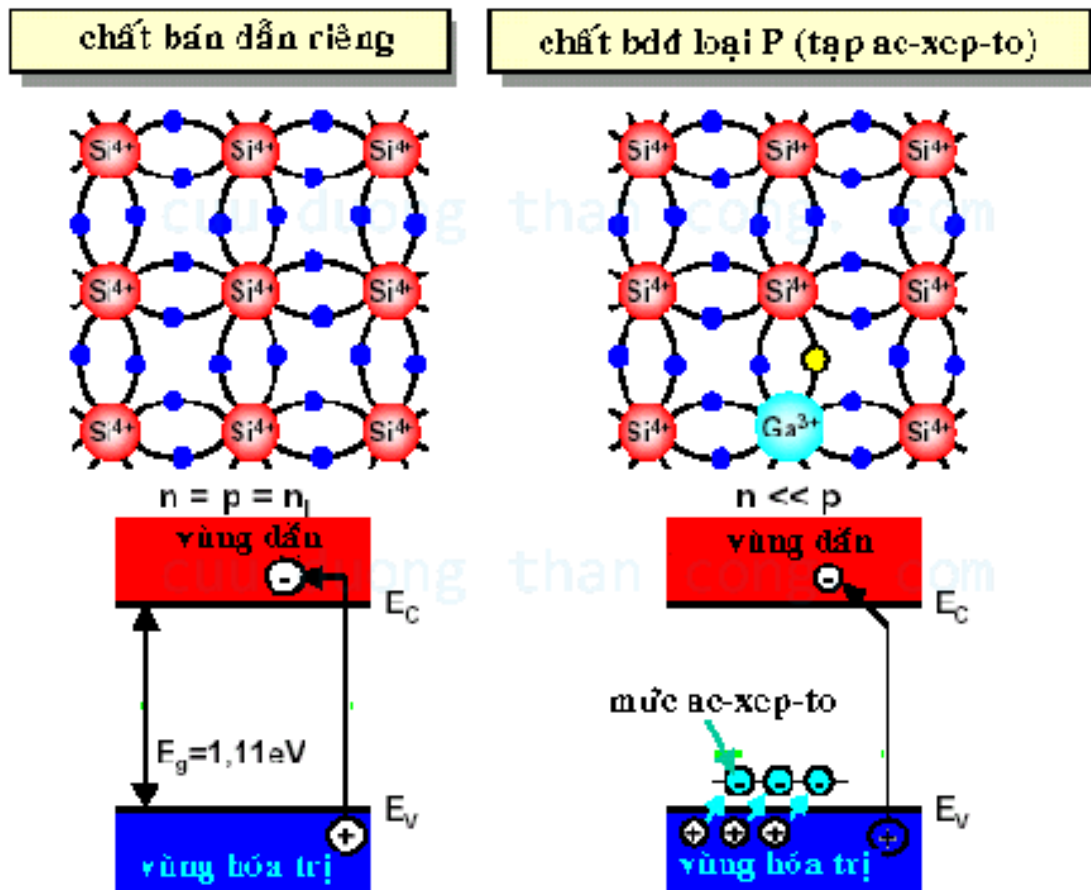
Tạp chất có thể cung cấp lỗ trống dẫn điện : *tạp chất acceptor* và mức tạp chất được gọi là *mức acceptor* .



Chất bán dẫn loại P: chất bán dẫn có chứa tạp chất acceptor.
 $p \gg n$

Hạt tải điện cơ bản : lỗ trống

Hạt tải điện không cơ bản : electron



Một nguyên tử B thay thế một nguyên tử Si ở nút mạng; dùng ba electron hóa trị liên kết với các nguyên tử Si lân cận. Tuy nhiên vì thiếu một electron hóa trị nên nguyên tử B có xu hướng lấy thêm một electron ở các nguyên tử Si lân cận. Năng lượng cần thiết để thực hiện điều đó nhỏ hơn nhiều so với E_g

→ tạo thành mức năng lượng tập E_A trong vùng cấm gần đỉnh vùng hóa trị.

→ nguyên tử Si bị chiếm một electron → thiếu một electron → tạo thành lỗ trống

→ electron của các nguyên tử Si dễ dàng nhảy vào lỗ trống đó và tạo thành một lỗ trống mới → cứ như thế lỗ trống có thể di chuyển dễ dàng trong vùng hóa trị.

SỰ PHỤ THUỘC NỒNG ĐỘ CỦA LỖ TRỐNG VÀO NHIỆT ĐỘ

❖ Ở nhiệt độ thường các electron ở vùng hóa trị lấp đầy mức tạp E_A và bị giữ ở đó; các lỗ trống có thể di chuyển tự do trong vùng hóa trị → hạt tải tự do chủ yếu

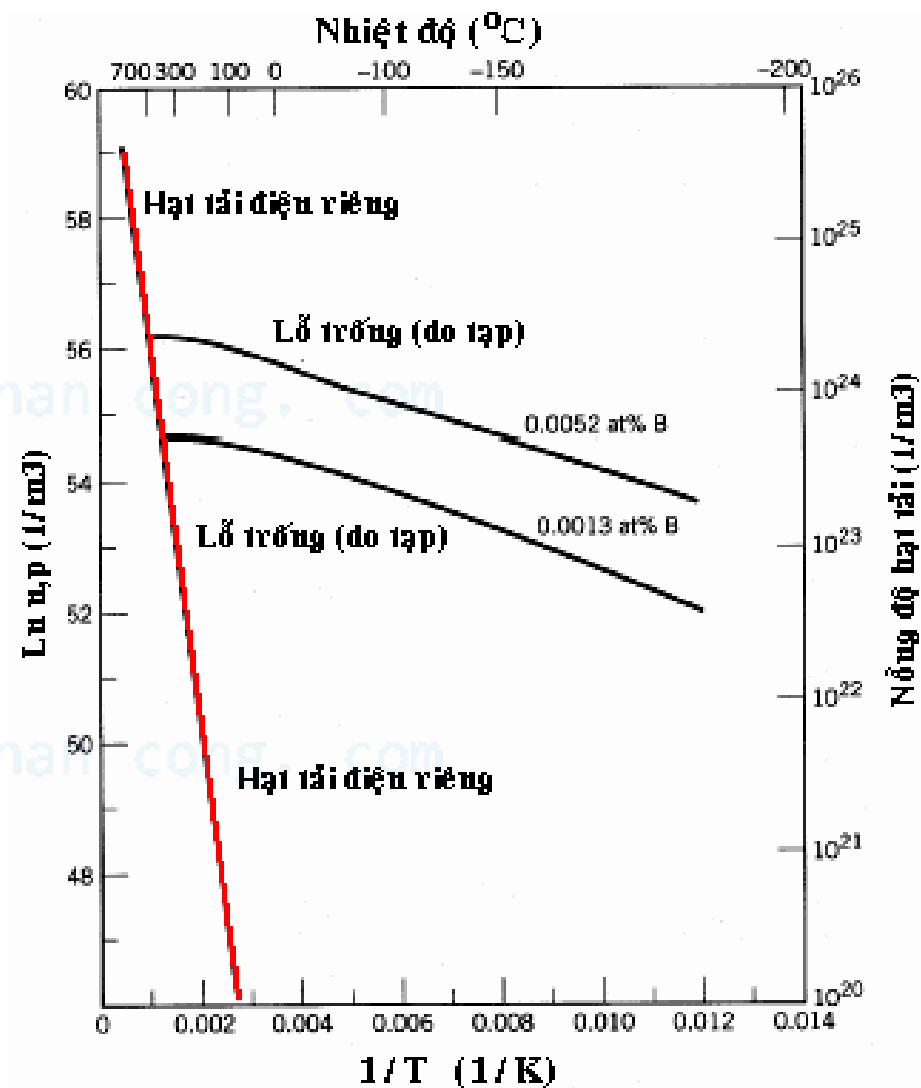
→ Tạp chất nhóm ba này được gọi là **tạp chất nhận (acceptor)** – mức tạp xuất hiện trong vùng cấm E_A gọi là **mức Acceptor** → **Bán dẫn loại P**.

Trong bán dẫn loại P: $n_p \gg n_n$, với n_p là nồng độ lỗ trống trong vùng hóa trị, n_n là nồng độ electron trong vùng dẫn.

Lỗ trống là hạt tải điện chủ yếu trong bán dẫn loại P

Sự phụ thuộc của n_A (nồng độ lỗ trống) ở vùng hóa trị theo nhiệt độ trong bán dẫn loại P tương tự như sự phụ thuộc của n_D ở vùng dẫn trong bán dẫn loại n.

BÁN DẪN LOẠI P



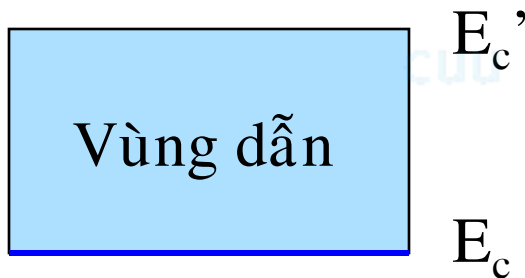
Noàng ñoã caùc haït taùi ñieãn trong chaát baùn daãn

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

Đơn vị của n_o và p_o [cm^{-3}]

□ Nồng độ electron :

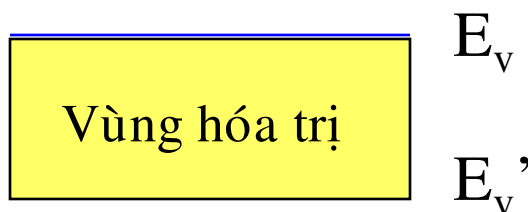


Xác suất lấp đầy trạng thái

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

Số trạng thái trong 1 cm³ trong khoảng dE

□ Nồng độ lỗ trống :



Xác suất trạng thái trống

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

Số trạng thái trong 1 cm³ trong khoảng dE

Noàng ñoă electron trong vương dẫn

$$n_o = \int_{E_c}^{E_{c1}} g(E) f(E) dE$$

$g(E)$ 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.

E_{ci} : năng lượng mức i trên vùng dẫn.

và hàm phân bố Fermi-Dirac:

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

NỒNG ĐỘ ELECTRON TRONG VÙNG DẪN CỦA CHẤT BÁN DẪN KHÔNG SUY BIẾN

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

Có thể dùng các gần đúng sau :

1.
$$f(E) \approx \exp \frac{E_F - E}{kT}$$

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

Chọn $E_C = 0$; $E_{Ci} \rightarrow \infty$, ta có:

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

$$\text{Đặt : } x = \frac{E}{kT}$$

cuu duong than cong. com

Nồng độ electron trong vùng dẫn ở điều kiện cân bằng theo T:

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

Theo định nghĩa và tính chất của hàm Gamma :

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

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

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

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \left(\frac{3}{2}-1\right)\Gamma\left(\frac{3}{2}-1\right) = \frac{1}{2}\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

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

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2} = 4,831 \cdot 10^{15} \left(\frac{m_n}{m_o}\right)^{3/2} T^{3/2} (cm^{-3})$$

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

NỒNG ĐỘ LỖ TRONG VÙNG HÓA TRỊ CỦA CHẤT BÁN DẪN KHÔNG SUY BIẾN

Tương tự: nồng độ lỗ trống trong vùng hóa trị ở điều kiện cân bằng:

$$P_o = N_v \cdot e^{\frac{E_v - E_F}{kT}}$$

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

E_v : năng lượng đỉnh vùng hóa trị

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

$$\Rightarrow n_o p_o = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \left(\frac{m_n m_p}{m} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{E_C - E_v}{kT} \right)}$$

$$n_o p_o = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \left(\frac{m_n m_p}{m} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}} = \text{const}$$

$E_g = E_C - E_v$: độ rộng vùng cấm

Noàng ñoă haít taúi ñieän rieâng

$$n_0 p_0 = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \frac{1}{m_n m_p} e^{-\frac{E_g}{kT}} = \text{const}$$

⇒ Với một chất bán dẫn cho trước và ở nhiệt độ T cố định, tích $n_0 p_0$ là một hằng số :

$$n_0 p_0 = \text{const}$$

Với chất bán dẫn riêng (sạch = tinh khiết): $n_0 = p_0 = n_i$

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

Nếu biết được E_F thì tính được n_o và p_o . Ngược lại: để tính được E_F ta dựa vào điều kiện trung hòa về điện.

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 acceptor và nồng độ ion donor.

Chất bán dẫn riêng : $n_o = p_o$

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

$$\exp\left(\frac{2E_F}{kT}\right) = \frac{N_v}{N_c} \exp\left(\frac{E_c + E_v}{kT}\right)$$

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

❖ Ở $T = 0K$: $E_F = \frac{E_C + E_V}{2} \rightarrow$ đối với bán dẫn riêng ở $0K$ mức Fermi nằm giữa vùng cấm.

❖ Khi $T \neq 0$: Vì $m_p \neq m_n \rightarrow$ mức E_F hơi lệch khỏi tâm vùng cấm.

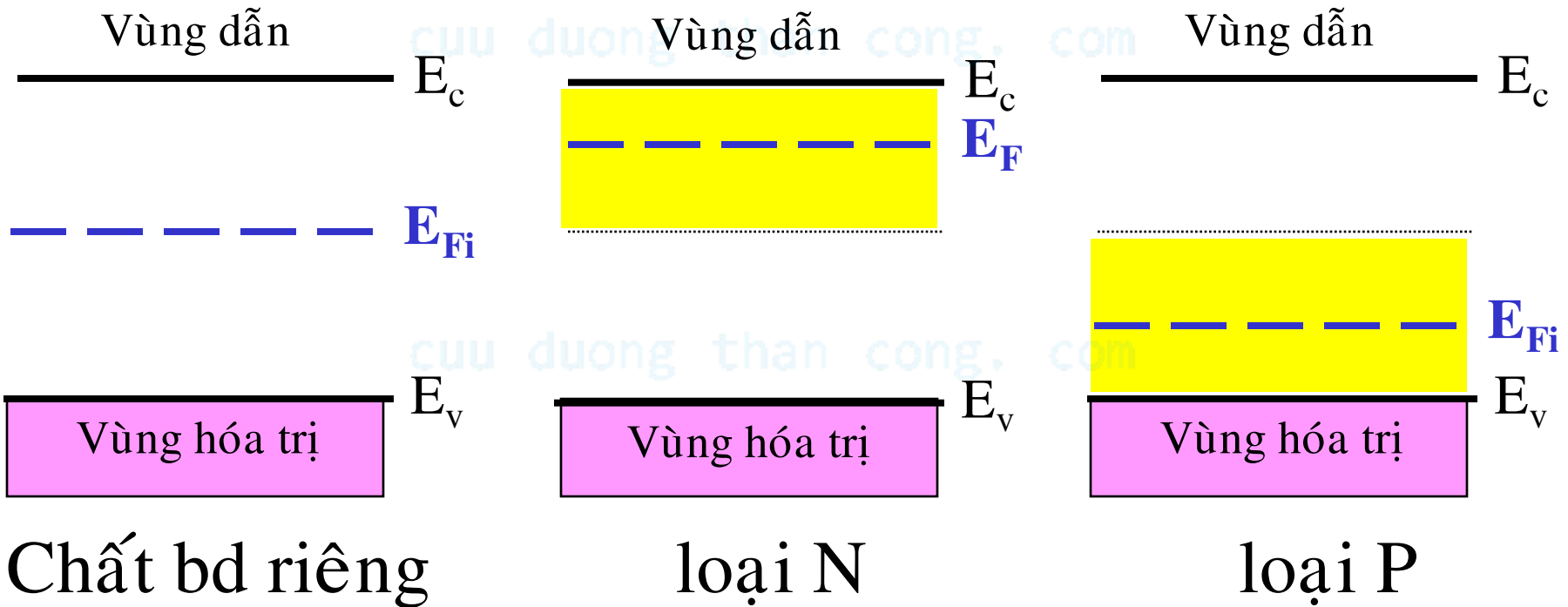
❖ Bán dẫn loại N: mức E_F lệch về nửa trên vùng cấm, nồng độ acceptor càng nhiều, mức E_F càng gần đáy E_C của vùng dẫn.

❖ Bán dẫn loại P : mức E_F lệch về nửa dưới vùng cấm, nồng độ donor càng nhiều, mức E_F càng lệch về đỉnh vùng hóa trị.

Mức Fermi trong các chất bán dẫn

Chất bán dẫn riêng

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



Caùc haït taûi ñieãn khoâng cân baèng

Ở điều kiện cân bằng nhiệt động:

Quá trình sinh = Quá trình tái hợp

$$\rightarrow g_o = r_o = \gamma n_o p_o$$

Với g_o là số cặp điện tử – lỗ trống sinh ra do nhiệt trong một đơn vị thể tích.

cuu duong than cong. com

r_o là số cặp điện tử – lỗ trống bị mất đi do tái hợp trong một đơn vị thời gian.

■ Trong kim loại, trên thực tế ta không thể làm thay đổi nồng độ hạt tải điện trong thể tích.

cuu duong than cong. com

Trong bán dẫn, sự tạo thành các cặp electron – lỗ trống tạo nên một sự thay đổi lớn độ dẫn điện trong thể tích → gọi là các hạt tải điện dư \equiv các hạt tải điện không cân bằng.

Cách tạo các hạt tải điện không cân bằng:

+ Chiếu sáng chất bán dẫn bằng ánh sáng có năng lượng photon:

$$\varepsilon = hf \geq E_g$$

+ Dùng chùm các hạt có năng lượng cao như chùm electron, proton, hạt α , tia X, tia γ , ... chiếu vào.

+ Phân cực thích hợp các lớp chuyển tiếp: kim loại – bán dẫn, hay lớp chuyển tiếp P – N.

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.

cuu duong than cong. com

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.

cuu duong than cong. com

Nồng độ hạt tải điện bằng

$$n = n_0 + \Delta n \quad ; \quad p = p_0 + \Delta p$$

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

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

$f_e(E)$ 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 điện tử 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

Thời gian sống

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

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

❖ 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 điện tử (lỗ trống).

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

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

cuu duong than cong. com

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

cuu duong than cong. com

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

Caùc quaù trình tài hoiù trong caùc chaát baùn daãn

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

+ Tái hợp vùng - vùng

+ Tái hợp thông qua các tâm trong vùng cấm

+ Tái hợp mặt ngoài

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 :

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

Tieáp xuùc kim loãĩ – chaát baùn daãn

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

Điện tử nằm trong tinh thể chịu sự tương tác Coulomb từ phía các ion dương của mạng.

Một điện tử 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 điện tử đi ra chân không trong một đơn vị thời gian qua 1 đơn vị diện tích của vật liệu ở một nhiệt độ T) :

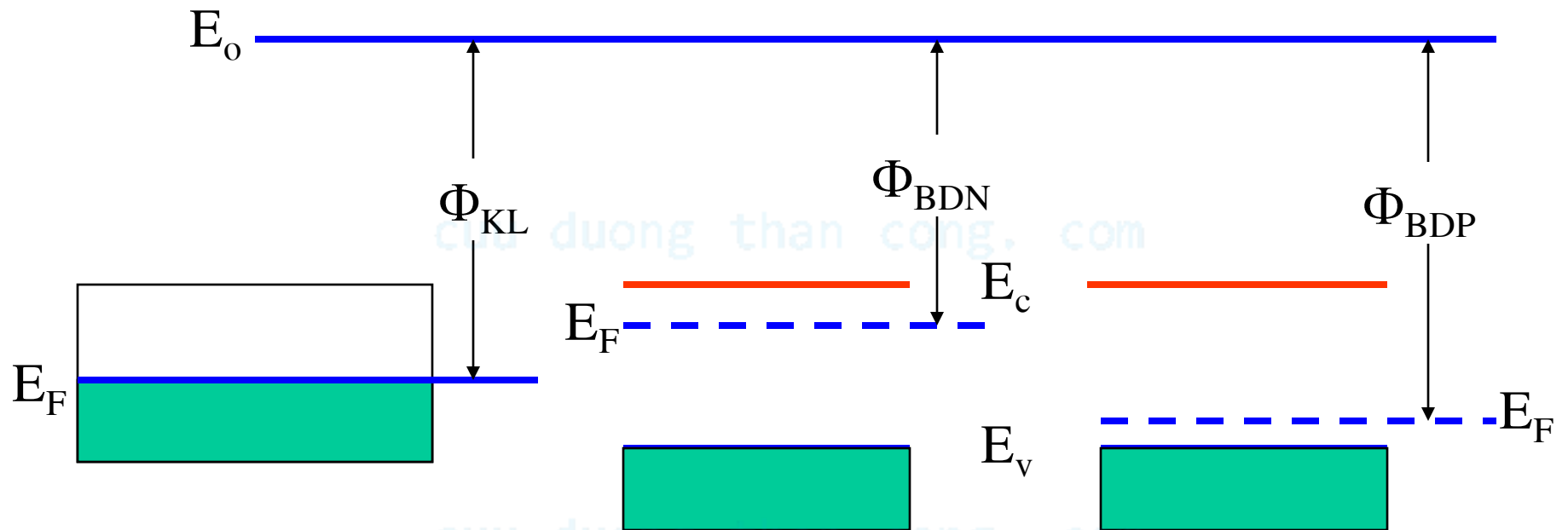
$$j_s = AT^2 \exp - \frac{\Phi}{kT}$$

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 bứt điện tử*

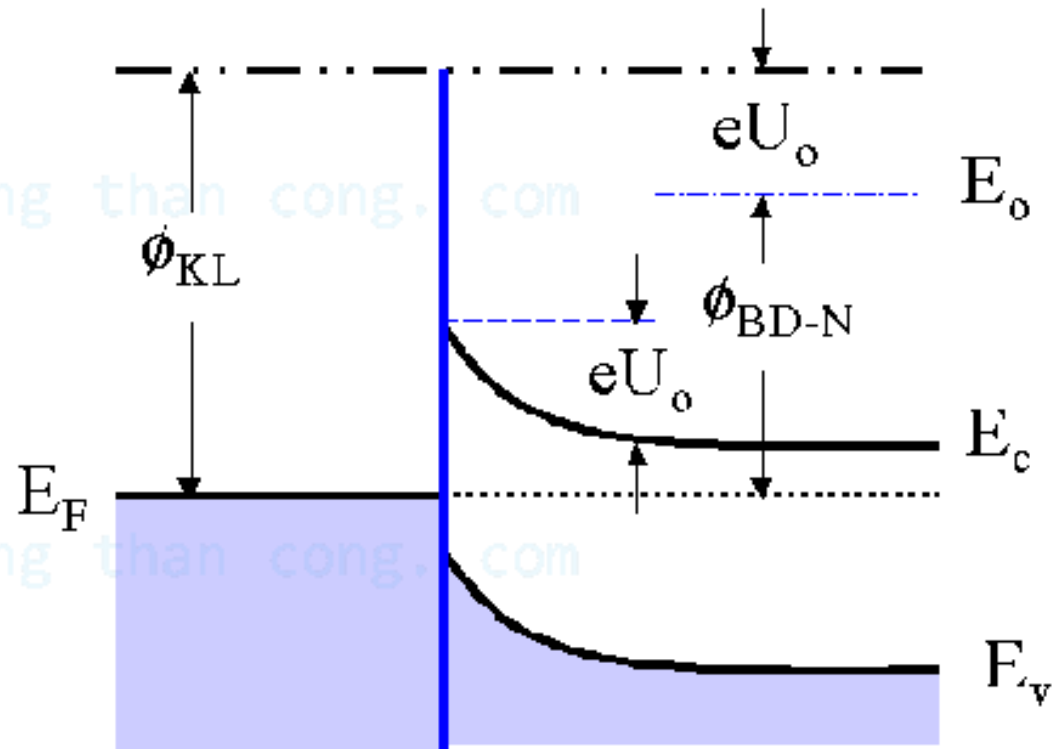


Giaün ñoà vương naêng lööiing cuûa löüp chuyeån tieáp kim loãii -
chaát baùn daãn

Giả sử chất bán dẫn là loại N và có công thoát điện tử

$$\phi_{\text{BdN}} < \phi_{\text{KL}}$$

Số electron thoát
khỏi chất bán dẫn
để sang kim loại
sẽ lớn hơn số
electron chuyển
động theo chiều
ngược lại



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

→ phía kim loại có tích điện âm còn phía chất bán dẫn mất đi một số điện tử để lại các ion donor dương không được trung hòa

→ xuất hiện điện trường ở ranh giới E_0 hướng từ chất bán dẫn sang kim loại.

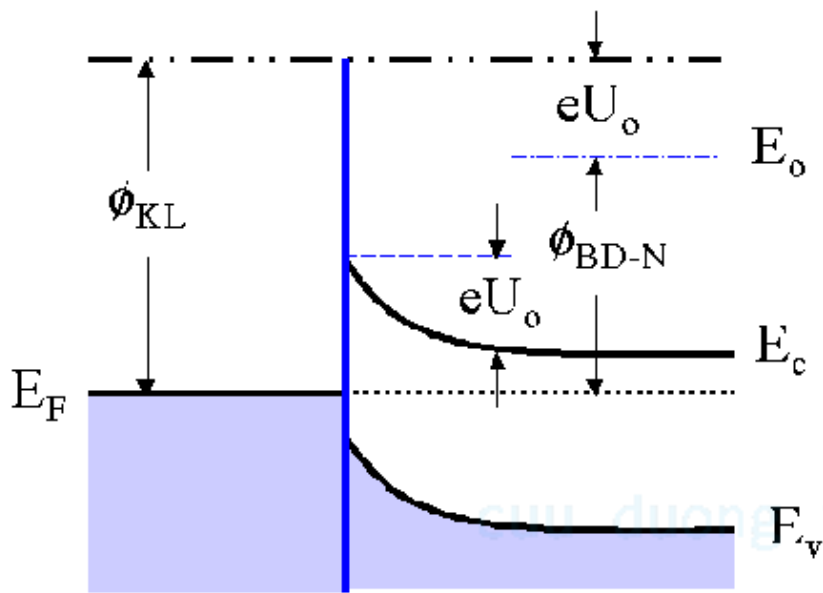
→ Điện trường này ngăn cản sự chuyển động của electron từ chất bán dẫn sang kim loại nhưng không ảnh hưởng đến các electron chuyển động từ kim loại sang chất bán dẫn .

→ Khi cân bằng : ở ranh giới của hai vật liệu xuất hiện một điện trường ổn định 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}

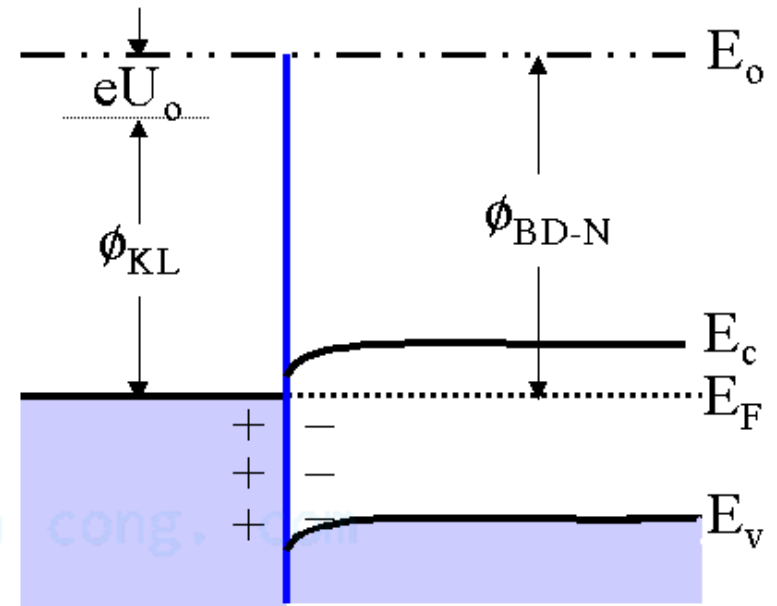
$$j_{BD} = AT^2 \exp \left(- \frac{\phi_{BD} + eU_0}{kT} \right) = j_{KL} = AT^2 \exp \left(- \frac{\phi_{KL}}{kT} \right)$$

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



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

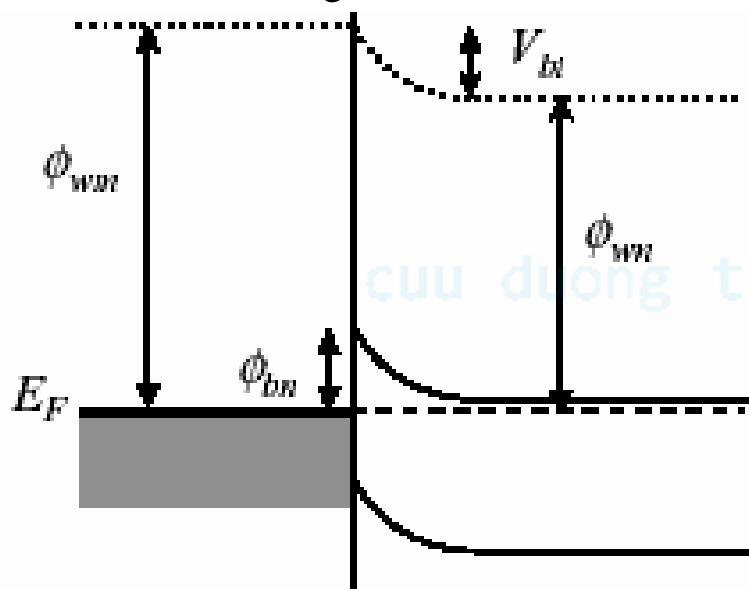
Miền điện tích thể tích w trên mặt chất bán dẫn có điện trở rất lớn so với điện trở của kim loại và của miền bán dẫn trung hòa. Lớp đó thường được gọi là *lớp ngăn*.



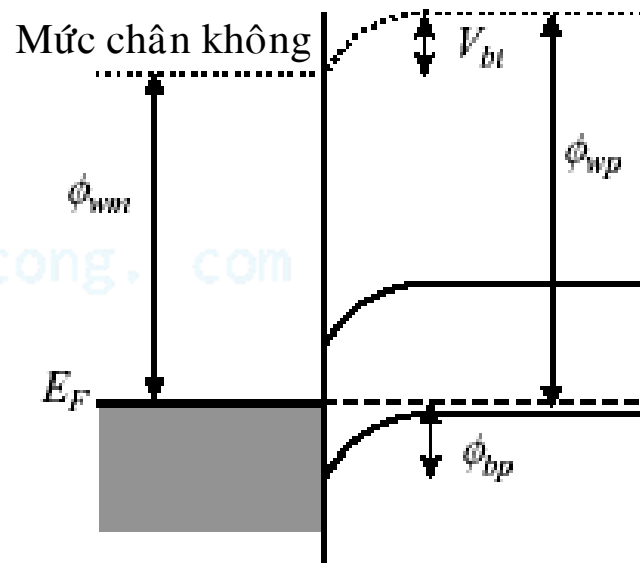
$$\phi_{KL} < \phi_{BD-N}$$

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

Mức chân không



Kim loại - BD loại N



Kim loại - BD loại P

Đặc trưng Volt – Ampere của chuyển tiếp Kim loại – Bán dẫn

❖ Khi chưa đặt điện áp ngoài lên hệ kim loại – bán dẫn:

$$j_{Kl} = j_{Bd} = j_s$$

→ Dòng điện tổng cộng qua lớp tiếp xúc kim loại – bán dẫn:

$$j = j_{Kl} - j_{Bd} = 0$$

❖ Khi đặt điện áp lên hệ hình thành lớp ngăn ($\phi_{Kl} > \phi_{Bd}$) vì điện trở lớp ngăn lớn nên toàn bộ điện áp ngoài coi như sụt tại lớp ngăn đó, bỏ qua sự sinh và tái hợp các hạt tải tại lớp ngăn.

Phân cực thuận

$$V_{\text{ngoài}} = V = \phi_{\text{Bd}} - \phi_{\text{Kl}} > 0$$

Điện áp V tạo nên điện trường ngoài ngược chiều với điện trường tiếp xúc làm giảm hàng rào thế năng đối với các electron chuyển từ bán dẫn sang kim loại $\rightarrow j_{\text{Bd}}$ tăng, $j_{\text{Kl}} = \text{const.}$

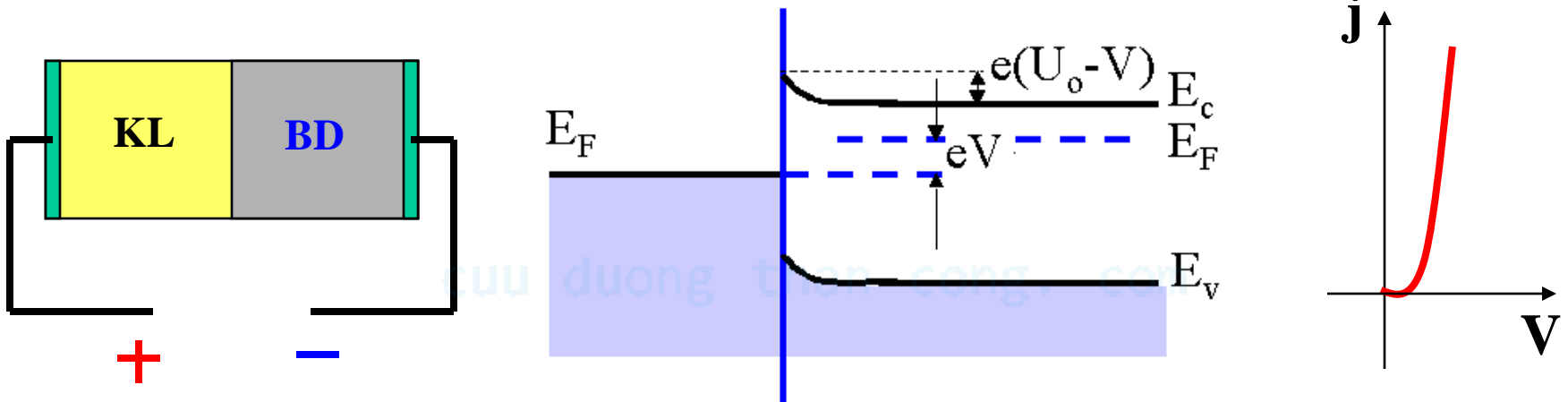
$$j_{\text{Kl}} = j_s$$

$$j_{\text{bd}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{\text{Bd}} + eU_o - eV}{kT}\right) = j_s e^{\frac{eV}{kT}}$$

→ Dòng điện tổng cộng qua lớp tiếp xúc kim loại – bán dẫn:

$$j = j_{bd} - j_{kl} = j_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

cuu duong than cong. com



Phân cực nghịch

$$V_{\text{ngoài}} = V = \phi_{\text{Bd}} - \phi_{\text{Kl}} < 0$$

Điện trường ngoài cùng chiều với điện trường tiếp xúc, làm nâng hàng rào thế năng đối với các electron chuyển động từ bán dẫn sang kim loại.

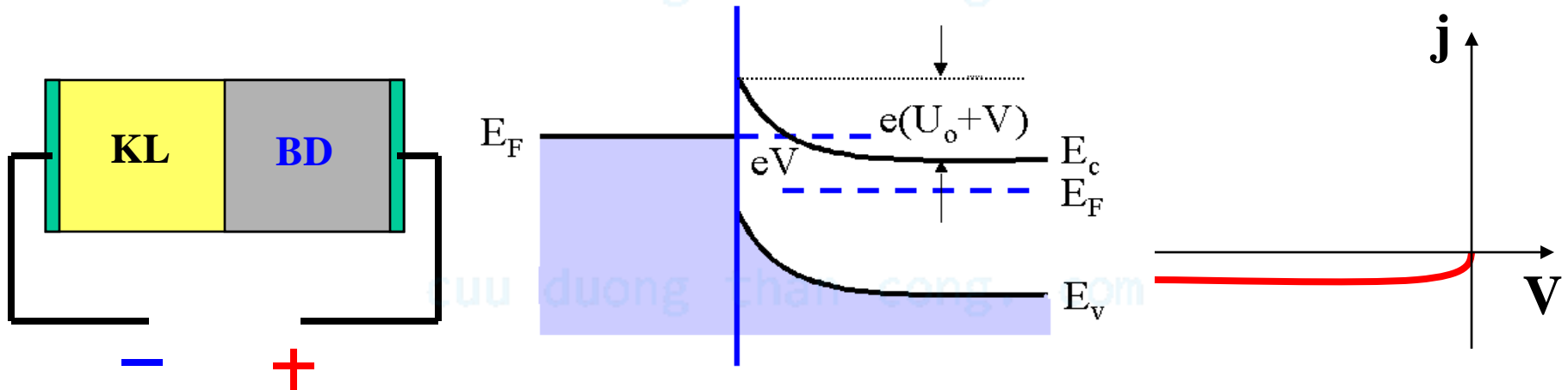
$$j_{\text{Kl}} = j_{\text{s}}$$

$$j_{\text{bd}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{\text{Bd}} + eU_o + eV}{kT}\right) = j_{\text{s}} e^{-\frac{eV}{kT}}$$

→ Dòng điện tổng cộng qua lớp tiếp xúc kim loại – bán dẫn:

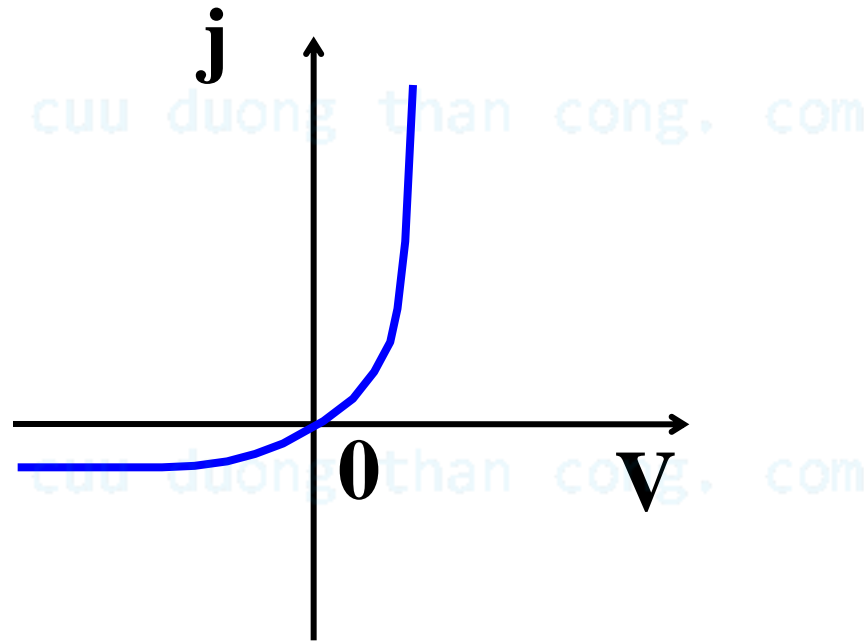
$$j = j_{bd} - j_{kl} = j_s \left(e^{\frac{-eV}{kT}} - 1 \right)$$

cuu duong than cong. com



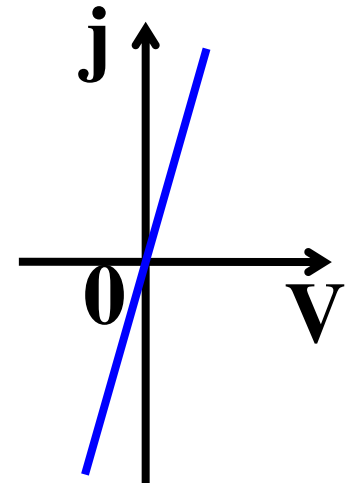
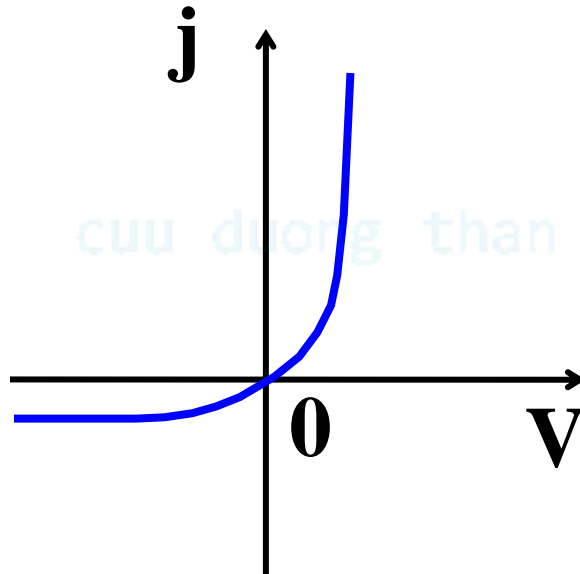
→ Tổng quát của hai trường hợp phân cực thuận và nghịch:

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



❖ Tiếp xúc có $\phi_{\text{Kl}} > \phi_{\text{Bd}} \Rightarrow$ Lớp ngăn \Rightarrow tiếp xúc chỉnh lưu
 \rightarrow diod kim loại – bán dẫn hay diod Schottky.

❖ Trường hợp chọn lớp tiếp xúc có $\phi_{\text{Kl}} < \phi_{\text{BdN}}$ hay $\phi_{\text{Kl}} < \phi_{\text{BdP}} \Rightarrow$ lớp đối ngăn \Rightarrow Dòng điện chạy theo cả hai chiều kim loại sang bán dẫn hay bán dẫn sang kim loại đều có điện trở nhỏ \rightarrow tiếp xúc Omic.



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 cấy ion.

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

Giản đồ vùng năng lượng của lớp chuyển tiếp P - N. Thế hiệu tiếp xúc

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

điện tử khuếch tán từ miền N sang miền P

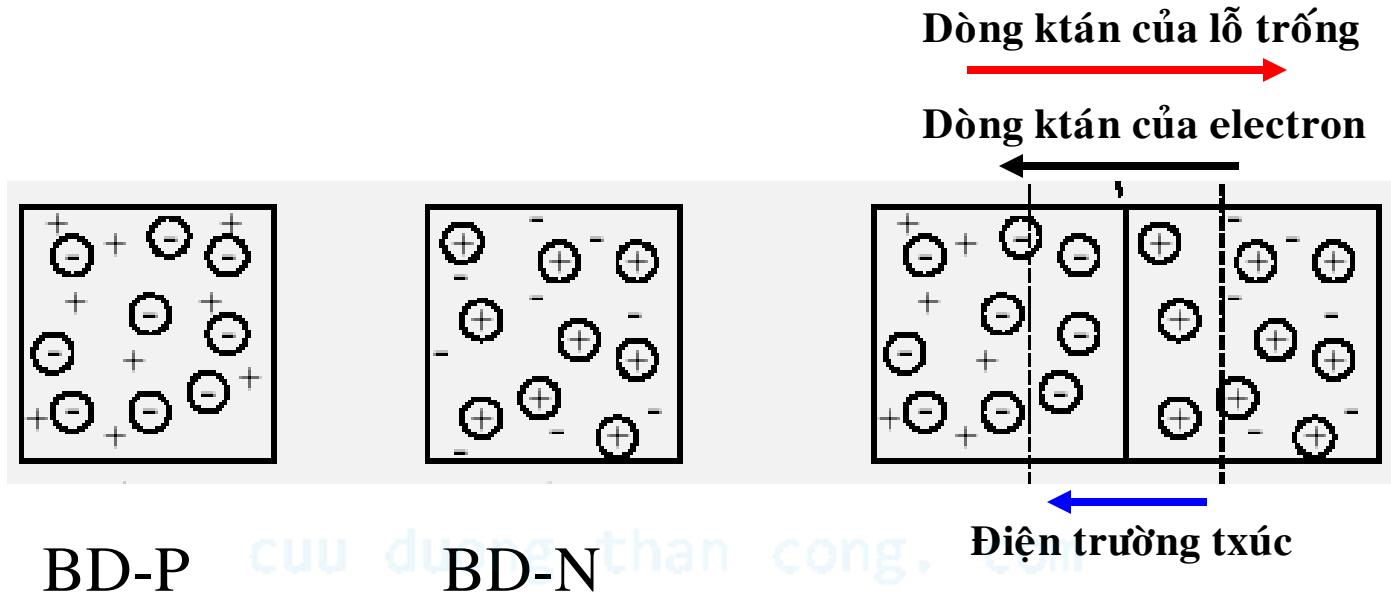
lỗ trống khuếch tán từ miền P sang miền N.

⇒ **bên 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 hạn chế quá trình khuếch tán của các hạt tải điện cho nên đến một lúc nào đó sẽ đạt tới trạng thái cân bằng.

Chuyển tiếp P - N : nhiều 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 E_0 và

dòng điện tử từ N sang P : $j_n = j_{ns}$: dòng điện tử 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 $j = (j_n + j_p) - (j_{ps} + j_{ns}) = 0$

E_{cP} ———

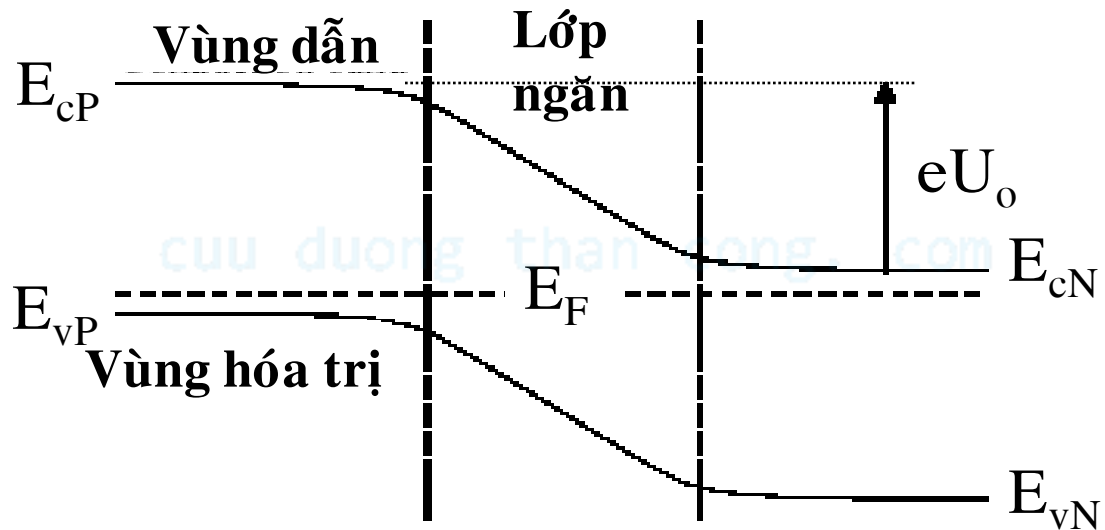
?

E_{vP} ——— E_F ——— E_{cN}

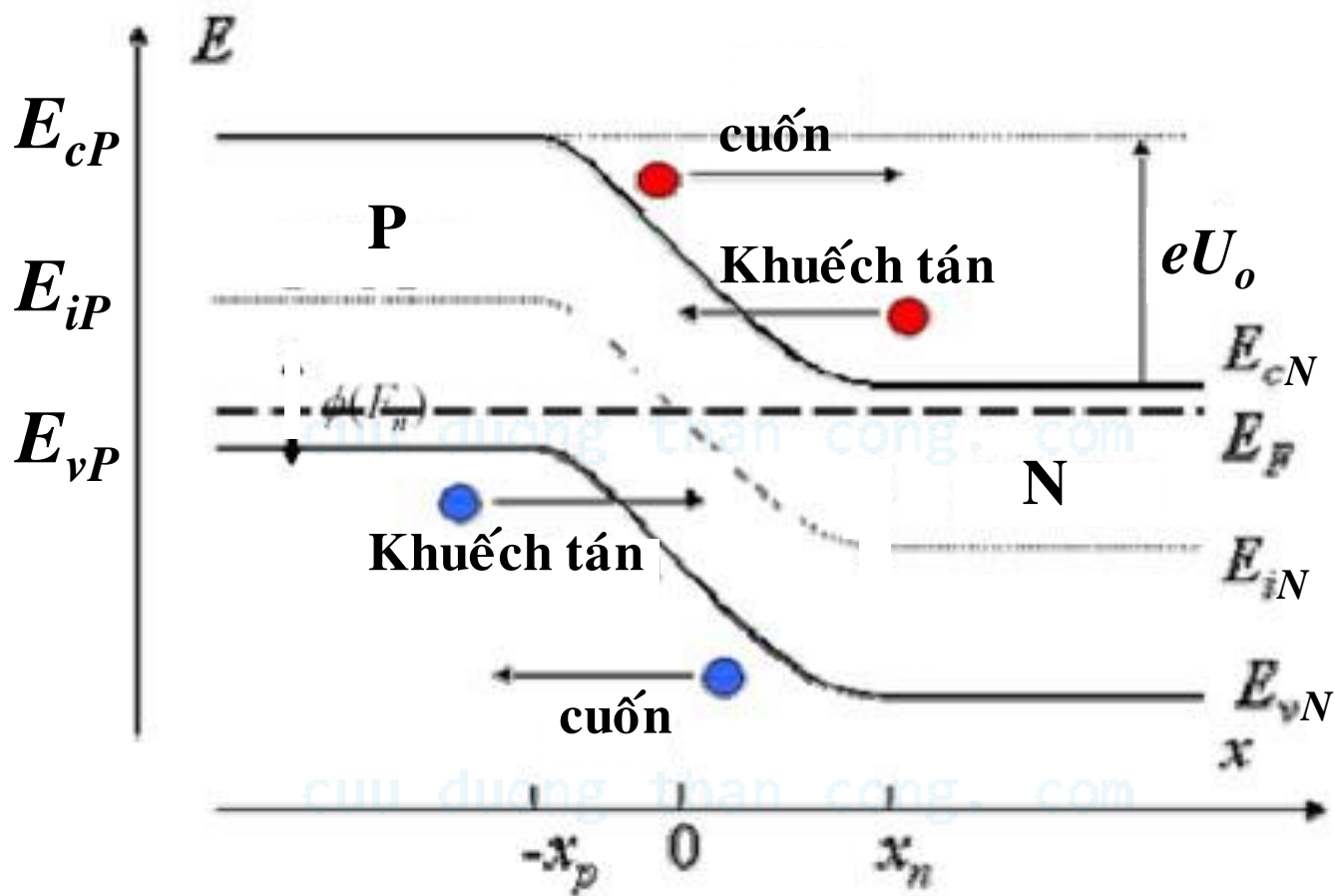


?

cuu duong than cong.com E_{vN}

Chuyển tiếp P – N : ñiều kiện cân bằng



Theá hieäu tieáp xuùc

Miền ñiện tích thể tích chỉ có các ñiện tích cố ñịnh (các ion N_D^+ và các ion N_A^-) nên ñiện trở của miền này rất hơn ñiện 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:

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

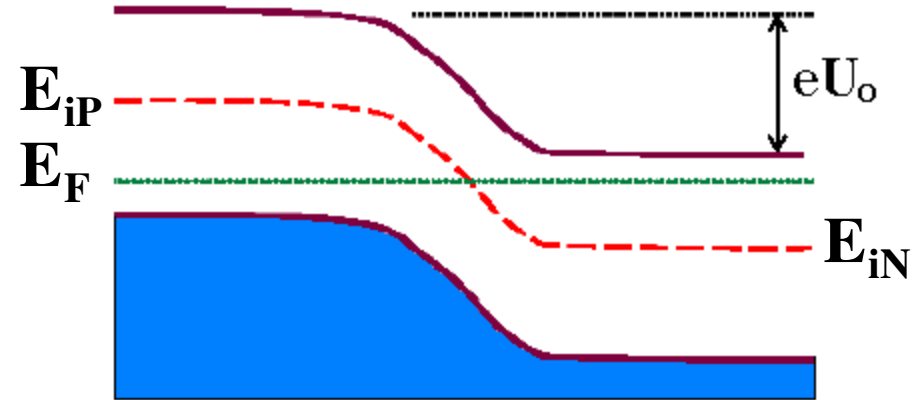
Theá hieäu tieáp xuùc

Trong miền P :

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

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

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



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

Thế hieäu tieáp xúc :

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

Chuyển tiếp P – N : ãăc trông 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 : \mathbf{j}_p
(dòng hạt tải điện cơ bản)

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

+ dòng điện tử từ miền N sang miền P : \mathbf{j}_n
(dòng hạt tải điện cơ bản)

+ dòng điện tử từ miền P sang miền N : \mathbf{j}_{ns}
(dòng hạt tải điện không cơ bản)

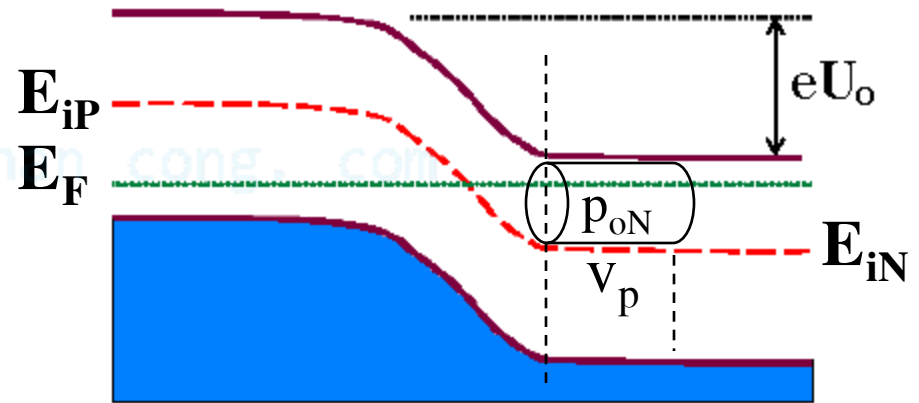
Khi không đặt điện áp ngoài vào, dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

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

trong đó

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

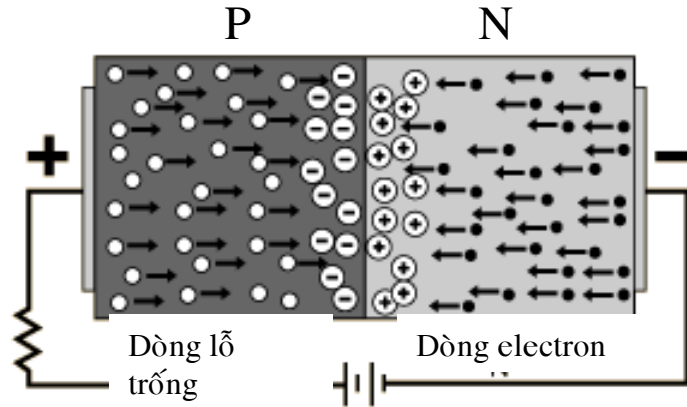
$$j_{ps} = ep_{on} \frac{L_p}{\tau_p}$$



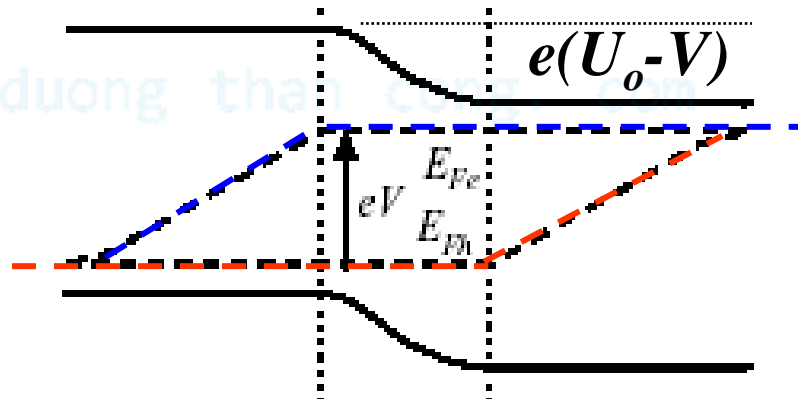
Đặt điện áp V lên hệ P-N.

- 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.

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 :

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

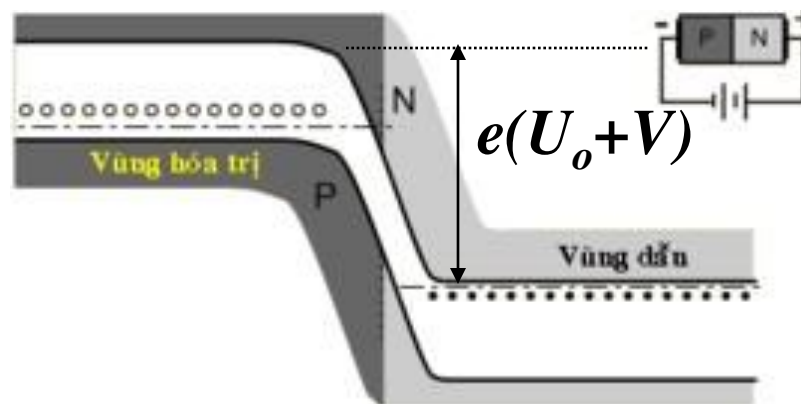
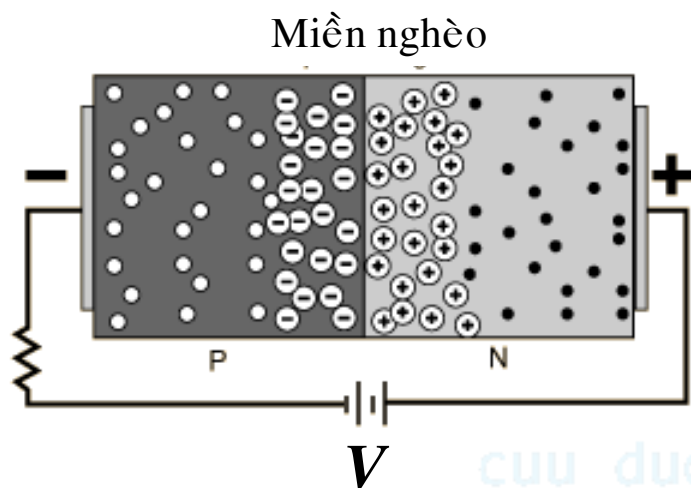
$$j_p = j_{ps} \exp \frac{eV}{kT} = ep_{oN} \frac{L_p}{\tau_p} \exp \frac{eV}{kT}$$

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

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

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

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 :

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

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

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

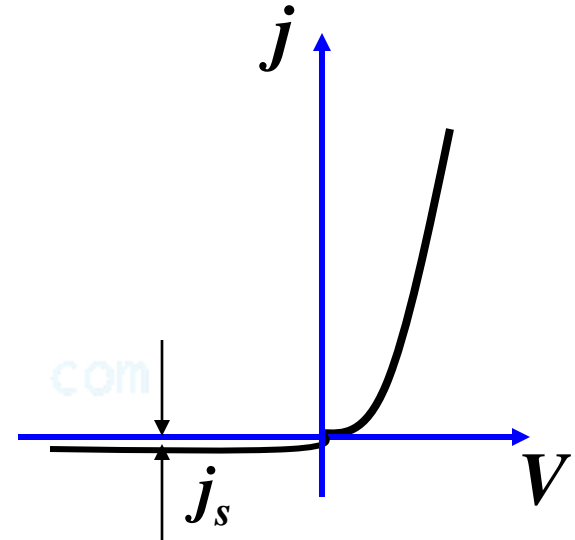
$$j = (j_n + j_p) - (j_{ns} + j_{ps})$$

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

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

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

phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ .

vanthang@hcmut.edu.vn

cuu duong than cong, com