

www.mientayvn.com

Dịch tiếng anh chuyên ngành khoa học tự nhiên và kỹ thuật.

Dịch các bài giảng trong chương trình học liệu mở của học viện MIT, Yale.

Tìm và dịch tài liệu phục vụ cho sinh viên làm seminar, luận văn.

Tại sao mọi thứ đều miễn phí và chuyên nghiệp ???

Trao i tr c tuy n t i:

http://www.mientayvn.com/chat_box_li.html

Chöông VII

Càùc chàát bàùn dàãn ñieän

I. CẤU TRÚC VÙNG NĂNG LƯỢNG CỦA CHẤT BÀN DẪN

Tổ chức năng lượng $E(k)$ có thể xác định nhiều tính chất của vật liệu.

Thức tế các tính chất liên quan tới nhiệt độ (tính chất quang, dẫn nhiệt ...) của các chất bán dẫn hoàn toàn có thể xác định bởi số electron nằm ở vùng dẫn và lỗ trống ở vùng hóa trị

→ để 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 này vùng dẫn. Ta có

$$E(k) = E(k_0) + \frac{\hbar^2 [(k_x - k_{0x})^2 + (k_y - k_{0y})^2]}{2m_1} + \frac{\hbar^2 (k_z - k_{0z})^2}{2m_3}$$

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

Tỷ số $\frac{m_L}{m_T}$: xác định tính dãn nở của mặt năng lượng.

Vùng hóa trị: Các nhánh của cấu trúc năng lượng $E(k)$ của vùng hóa trị đều có giá trị $k = 0 \rightarrow$ nhánh vùng hóa trị ở tâm của vùng Brillouin tại $k = 0$ có sự biến năng lượng; tổng tác spin – quá nặng làm giảm sự biến đổi phần.

*** Trong hai nhánh này:**

+ Trong vùng hóa trị khối lượng hiệu dụng có tính âm:

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

với A, B, C là các hằng số không 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:

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

* Nhanh thôi:

Khoá lỏng của lỗ trống:

$$m_{p3i} = \frac{m}{A}$$

Khoảng cách ngắn nhất giữa này vùng dẫn và vùng
vùng hóa trị bằng **đường vùng cấm Eg**.

Các chất có này vùng dẫn và vùng hóa trị nằm
cùng một vùng B (cùng k) → **chất có
vùng cấm thẳng hay trực tiếp**.

VD: GaAs.

Ngược lại: các chất có này vùng dẫn và vùng hóa trị
nằm cùng một vùng B (khác k) → **chất
có vùng cấm nghiêng hay gián tiếp**.

VD: GaP.

II. BÀN DẪN TINH KHIẾT

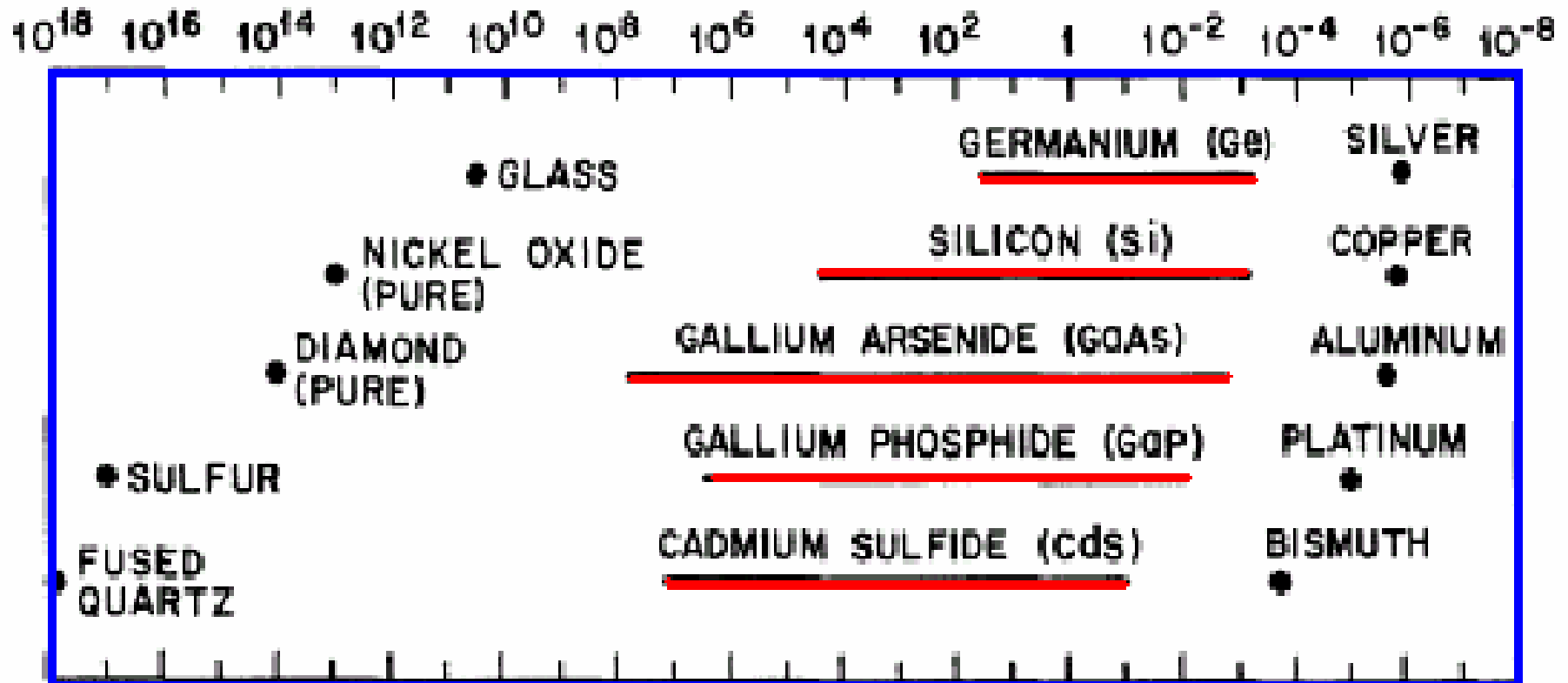
BÀN DẪN TẬP CHẤT

Nhị nghĩa

Chất bán dẫn là các chất có độ dẫn điện σ nằm trong khoảng:

Tiểu	$10^{-10} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$	(điện môi)
đến	$10^4 \div 10^6 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$	(kim loại)

Điện trở suất ρ ($\Omega\text{-cm}$)



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, niên trường, tốc độ trường, tạp chất ...

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

Pha tạp vào chất bán dẫn làm nó dẫn niên của nơi thay nó mạnh \Rightarrow Bán dẫn tạp chất.

VÍ DỤ

Pha B vào Si theo nông ñoã1:105 → ñoãdañ ñieñ
tañg theâm 103 lañ.

Pha taip vô ñoãthích hôip còitheañat ñoôic:

- + Chạt bañ dañ cò ñoãdañ ñieñ mong muoñ.
- + Chạt bañ dañ loa ñ hay p.

Khi ñoã taip chạt vào tinh theãbañ dañ: taip còitheã
theãchoãcaic nguyeañ töũgoãc ôũnut maing → taip
chạt thay theã

hay nañ xen keõvao giõã caic nut maing → taip
chạt ñieñ khích.

Các chất bán dẫn nguyên tử

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

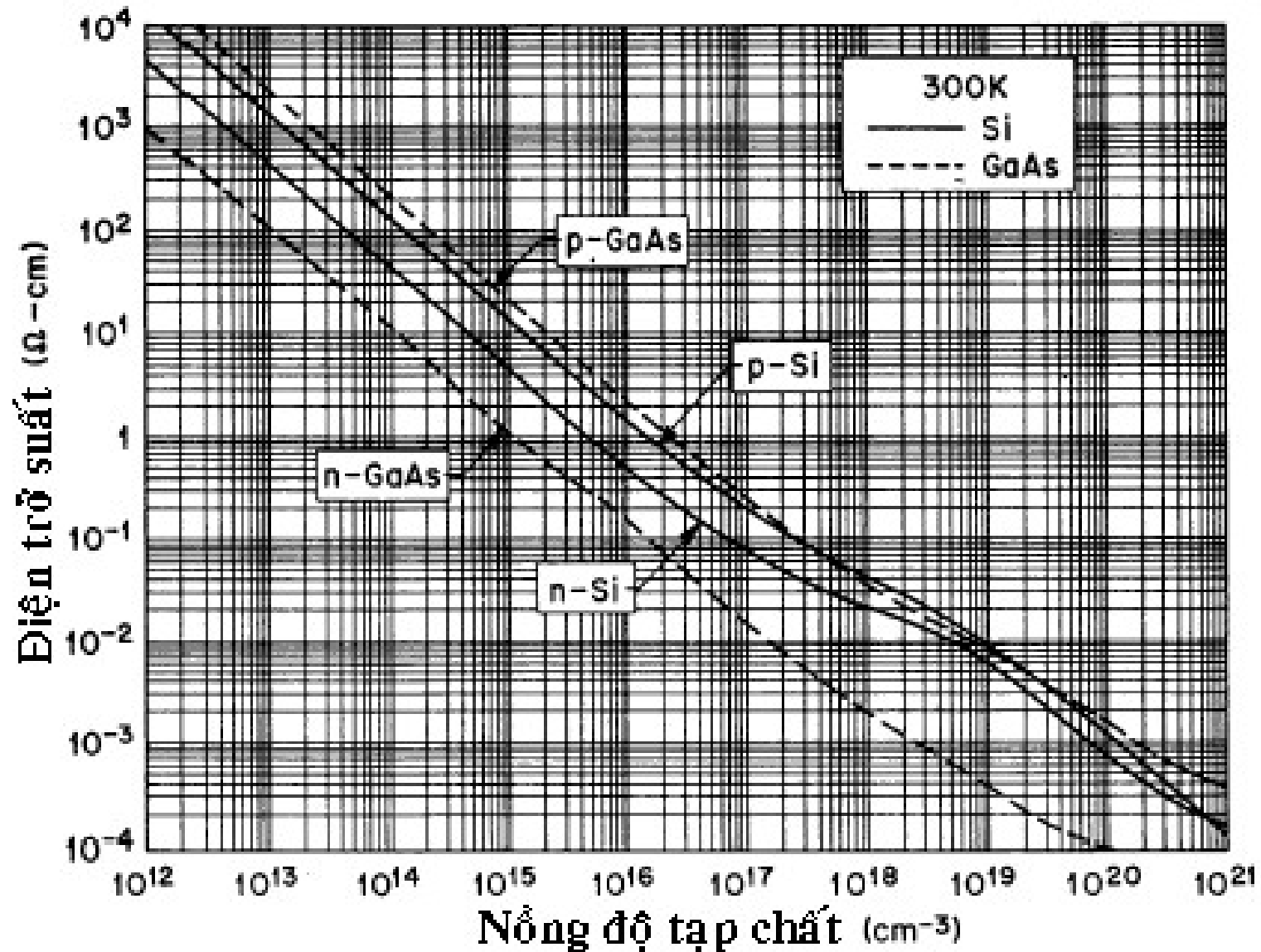
Tạp chất làm thay đổi rất nhiều nồng độ dẫn điện của các chất bán dẫn .

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

Sôi phụ thuộc của điện trở suất ρ (Ωcm) của Si vào 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}	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$

Sõi phũi thũc củi nĩn trũi suĩt vĩo nũng nũĩ tĩp chĩt



Số phụ thuộc của nhiệt trở vào nhiệt độ

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

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha_t (t - t_0)]$$

với ρ_t = nhiệt trở suất ở nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)

ρ_0 = nhiệt trở suất ở một nhiệt độ nào đó (thường là 0 hoặc 20°C) và

α_t = hệ số nhiệt của nhiệt trở suất.

Số biến thiên của nhiệt trở theo nhiệt độ

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_t (t - t_0)]$$

Vật liệu	Điện trở suất ρ (Ωm)		Hệ số nhiệt trên $^{\circ}\text{C}$	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

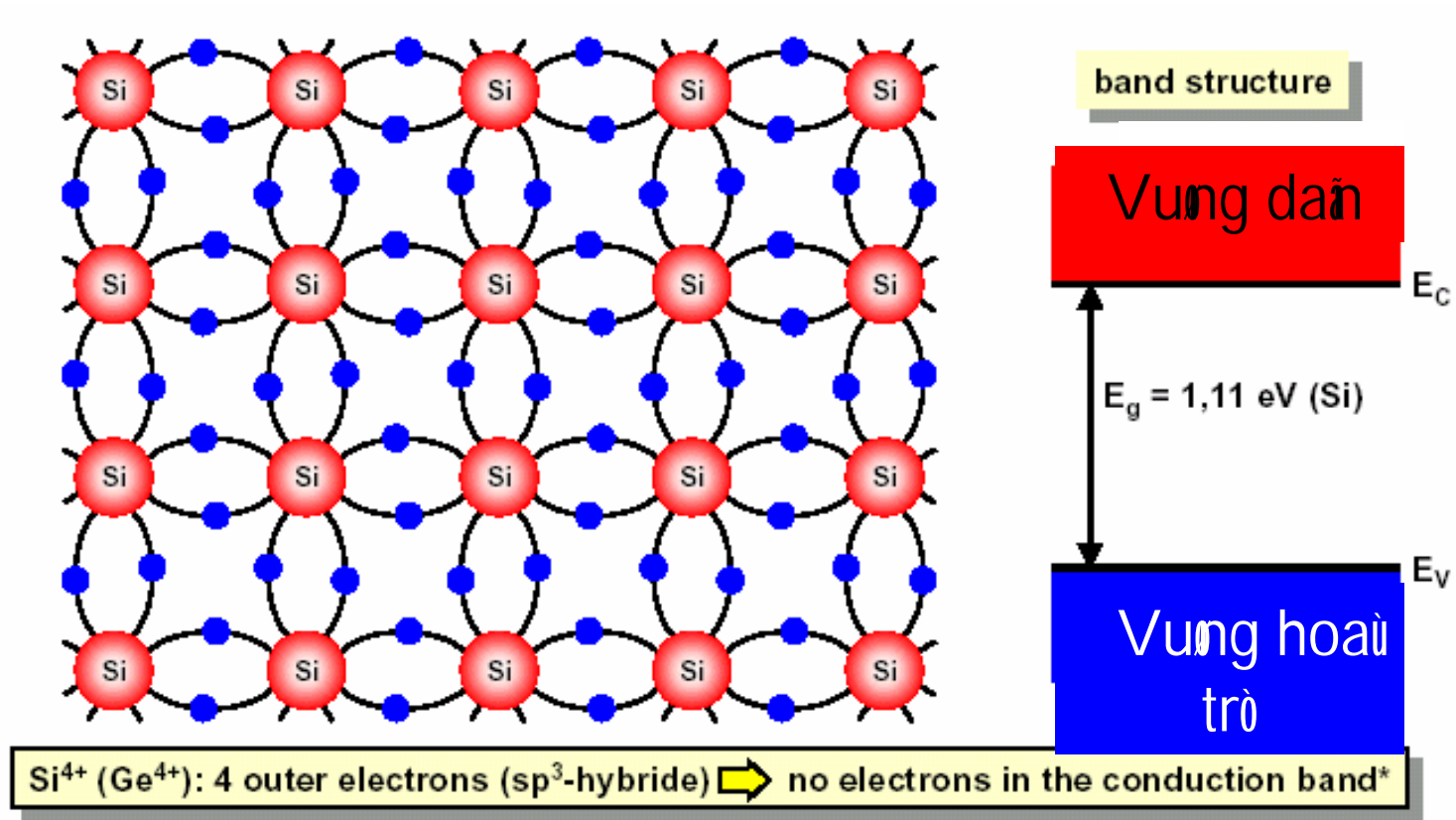
Sôi phụ thuộc của nien trôu vào nhiệt ñoã

Chất bán dẫn :

Nien trôu suất phụ thuộc nhiệt ñoã theo hàm mũ: giảm khi nhiệt ñoã tăng.

$$\rho_T = \rho_0 \exp\left(\frac{A}{kT}\right)$$

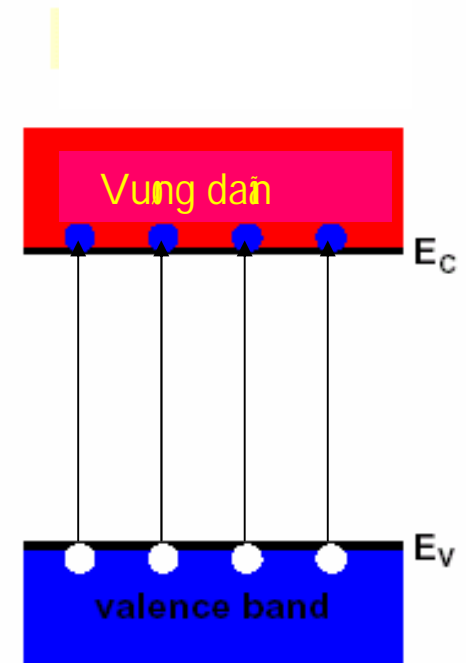
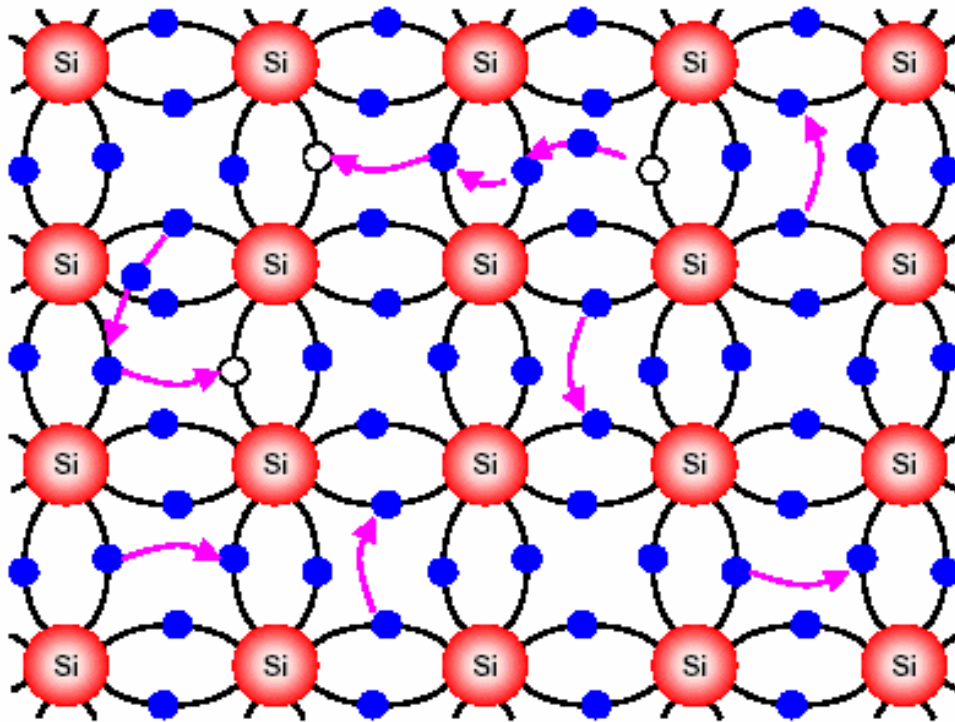
Sõi dẫn ñiẽn trong Si saõch õu nhieät ñõa $T = 0\text{ K}$



Si^{4+} (Ge^{4+}) : 4 electron ngoaì (liên kết lai sp^3)

Không có electron trong vùng dẫn

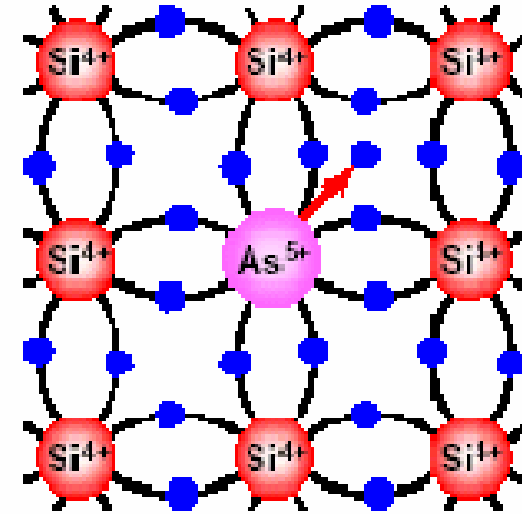
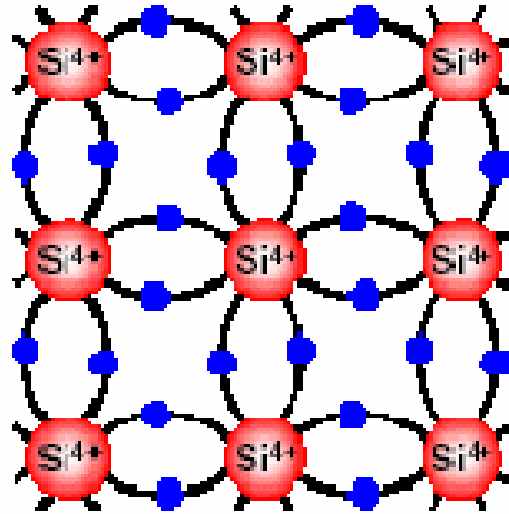
Sự dẫn điện trong Si sạch ở nhiệt độ $T > 0$ K



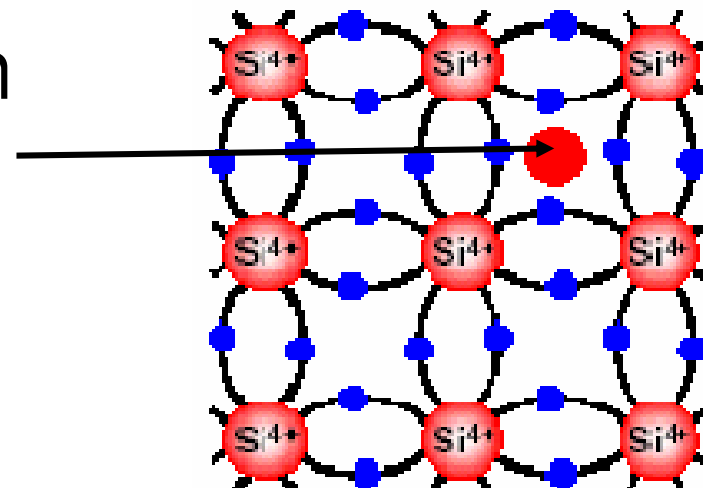
$T > 0$: electron trong vùng dẫn
lỗ trống trong vùng hóa trị

Tạp chất trong các chất bán dẫn

❖ Tạp chất thay thế



❖ Tạp chất ãièn khích

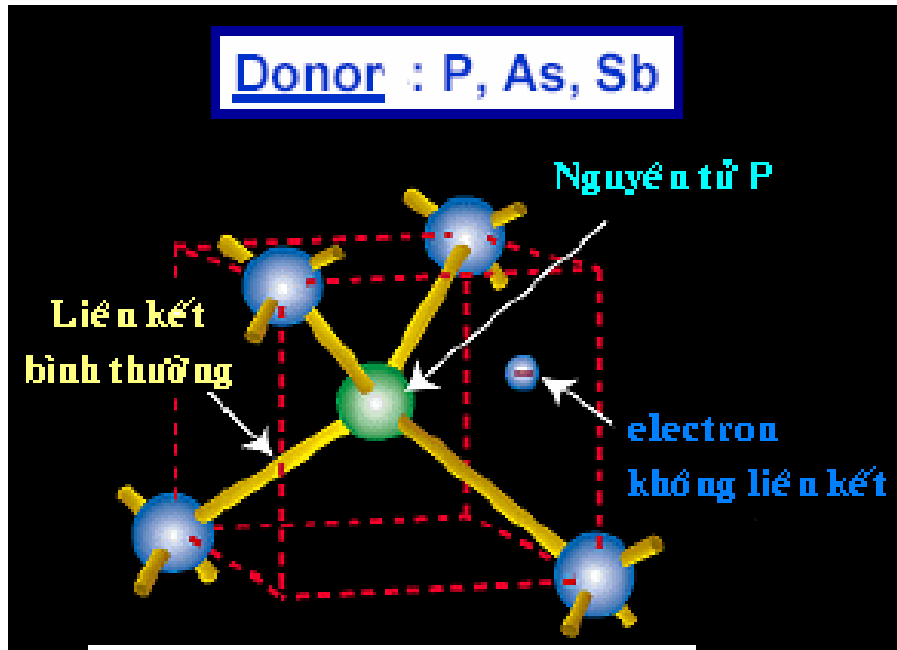


Tạp chất trong các chất bán dẫn

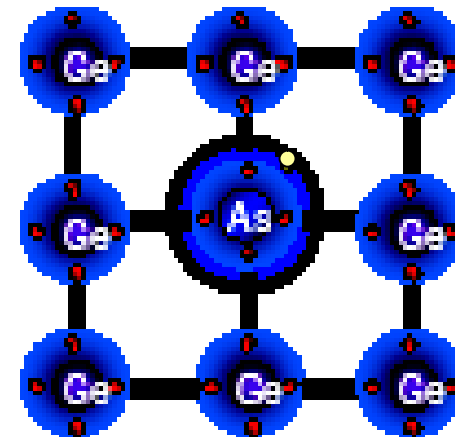
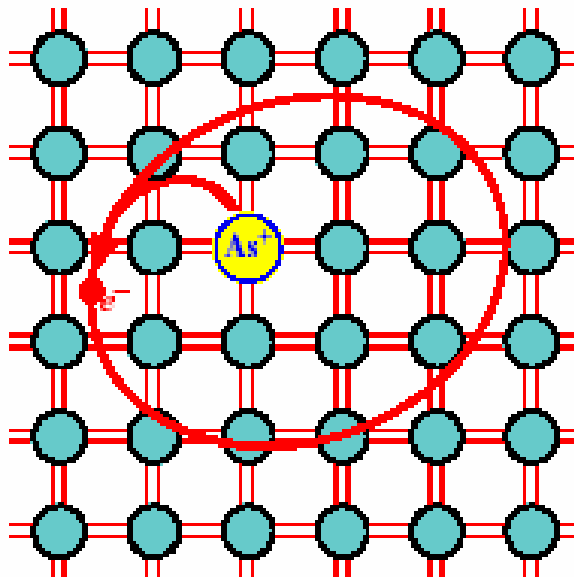
Tạp chất ñoà no vaøac-xep-to

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

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



Nguyên tử As thế cho một nguyên tử Ge ô nư t:

 bốn hơ t rờ cườ As liên kết vớ bốn nguyên tử Ge

 lân cầ n

 electron hơ t rờ thờ nằ m cườ nồ liên kết lờ ng lờ

 vớ nguyên tử As \rightarrow cồ thế chuyể n ñờ ng tồ ng

 ñỏ tồ do trong phẩ m vi rờ ng xung quanh nguyên tử

 As gồ c cườ nồ \rightarrow hầ t tấ ñiể n chớ nh là electron

 \rightarrow As ñồ c gồ i là tấ p chấ t cho (Donor)

 \rightarrow bả n dẫ n nằ y là bả n dẫ n loạ i n.

 Mồ c nằ ng lờ ng cườ electron cườ tấ p chấ t E_D nằ y

 nằ m trong vung cầ m vầ gầ ñầ y vung dẫ n.

Chú ý Các electron nằm ở các mức tạp chất không hoàn toàn tự do nhờ các electron trên vùng dẫn mà phân bố gần các tâm tạp chất → mức tạp là mức ãnh xõu

Nếu tách electron khỏi 5 khối nguyên tử As ta dùng công thức của năng lượng liên kết trong nguyên tử

Hydro:

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

Nhõng 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

$$E_H = -\frac{m_0 e^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)}$$

m_0 - khối lượng của electron tự do

e - điện tích của electron

ϵ_0 - 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 tại chất bán dẫn

$$E_i = -\frac{m^* e^4}{2(4\pi\epsilon_0\epsilon_r\hbar)^2}$$

$$\text{Ge : } m^* = 0,22 m_0 \quad \epsilon_r = 16$$

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

$$\text{Si : } m^* = 0,33 m_0 \quad \epsilon_r = 12$$

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

Với phép gần đúng bán dẫn, năng lượng ion hóa nhỏ nhau cho mỗi nguyên tử tại chất thuộc nhóm V.

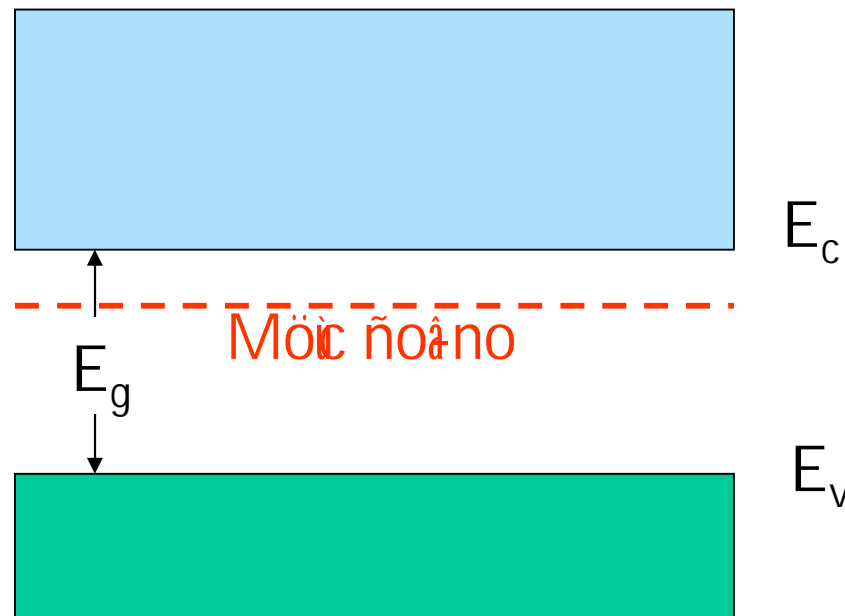
Tren thực tế năng lượng này khác nhau với các tạp chất khác nhau, những số sai khác này không lớn lắm.

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

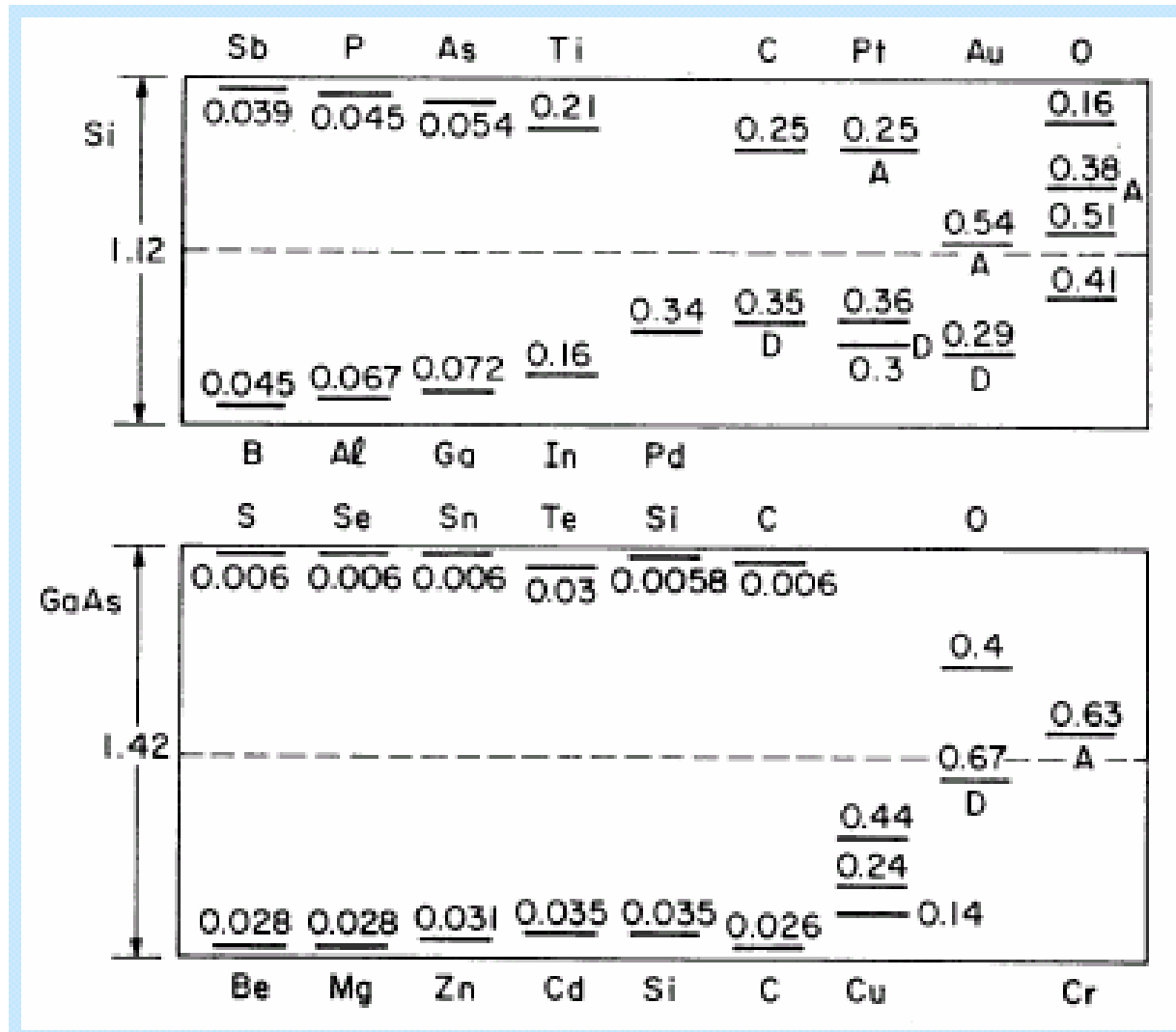
Sự xuất hiện các mức năng lượng tạp chất trong vùng cấm

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 lắm của vùng dẫn.

Tạp chất có thể cung cấp điện tử dẫn nên : **tạp chất n-ô** và mức tạp chất n-ô gọi là **mức n-ô**



Mức năng lượng tạp chất



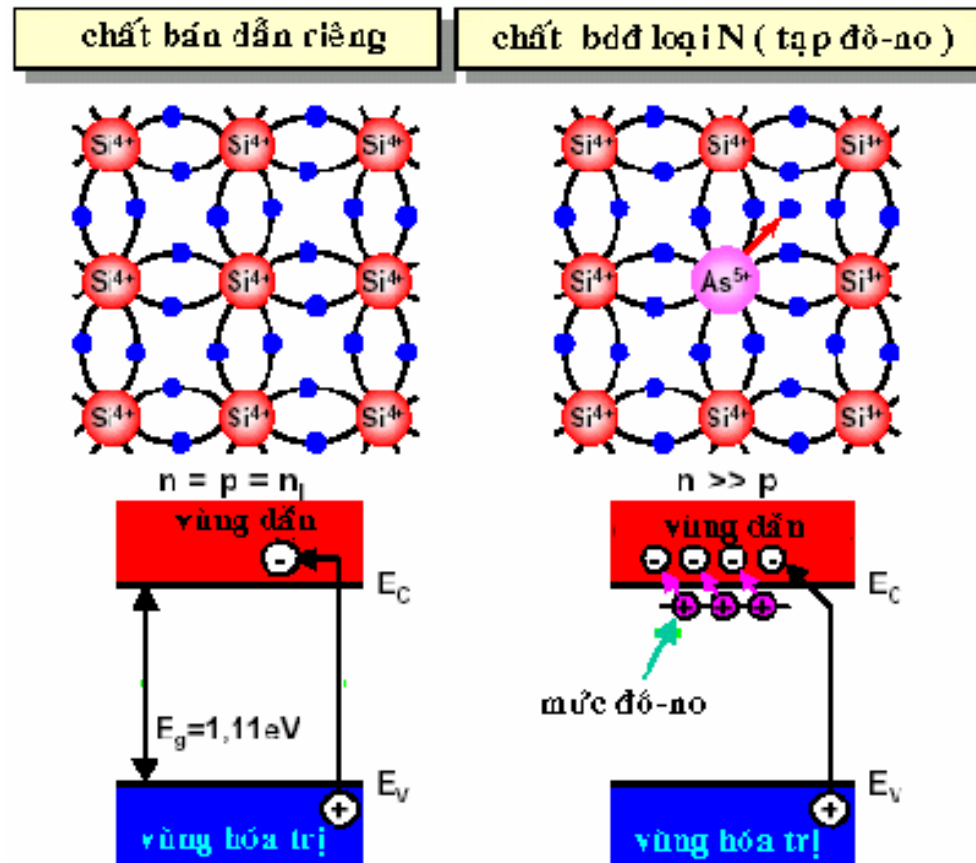
Tạp chất nhỏ As và B có mức năng lượng nằm gần các cực trò của vùng năng lượng.

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

$$n \gg p$$

Hạt tải ãi ãn cô bán : electron

Hạt tải ãi ãn không cô bán : lỗ trống



SÖI PHUÏ THUOC CUA NOÀNG ÑOÀÑIEÑ TÖÛ DAÑ VAO NHIEÁT ÑOÀ

Ngang ñoà electron tö möc Donor nhät leñ vung
dañ:

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

A_D : heäsoátæ leä

E_D : nang löông ion hoä của nguyên töü taíp chaät
(läý góç nang löông läñhät vung dañ); $E_D \ll E_g$

$$\text{Lnn}_D = \text{Ln}A_D - \frac{E_D}{2kT}$$

❖ 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

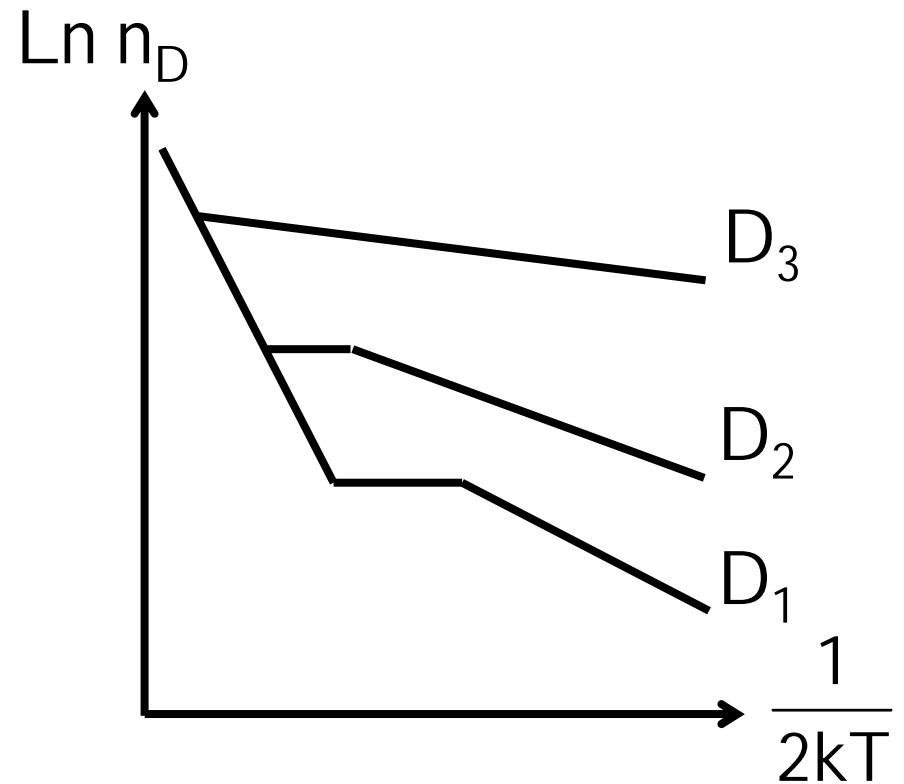
→ Hạt tải điện chủ yếu (cơ bản) là electron

→ Bán dẫn loại N.

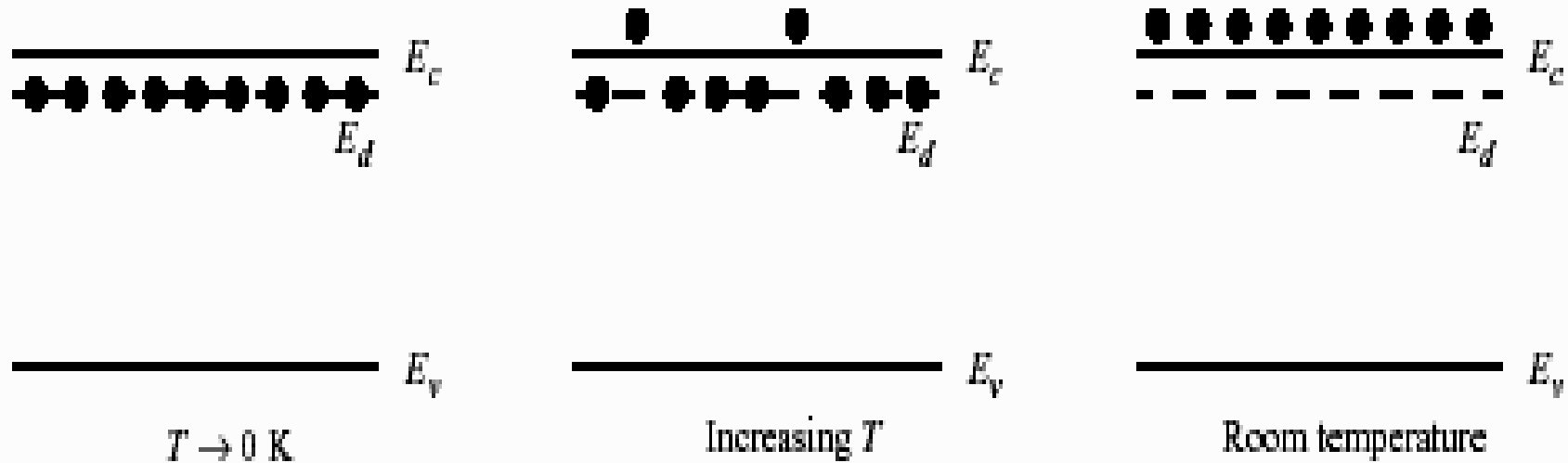
→ Công biểu diễn của $\ln n_D$ theo \ln công suất có thể viết là $\ln E_D$.

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

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



Sõi phui thuoc cuõa nõng ñoã ñieãn töü daãn vaøo nhieät ñoã

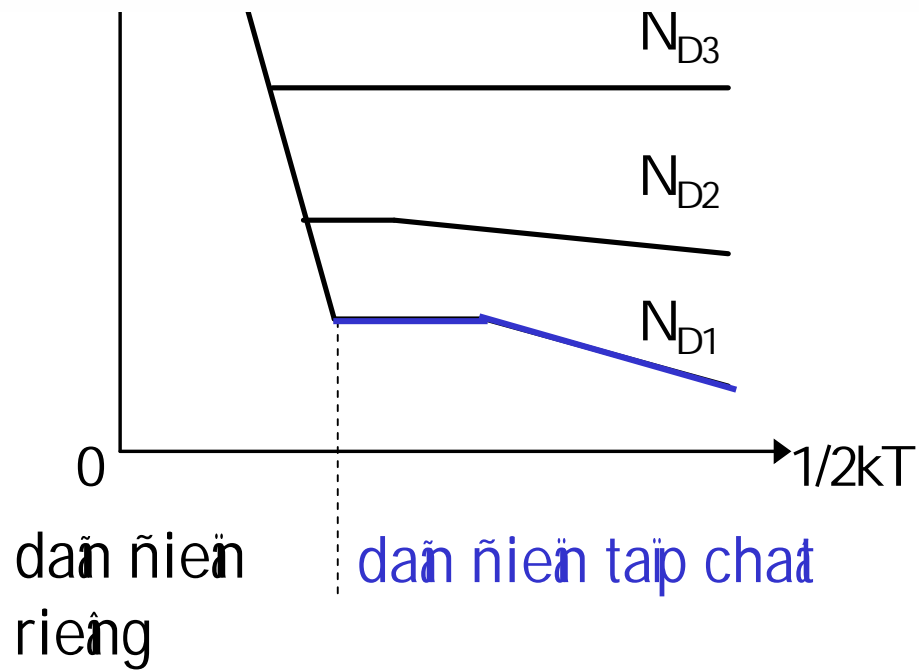
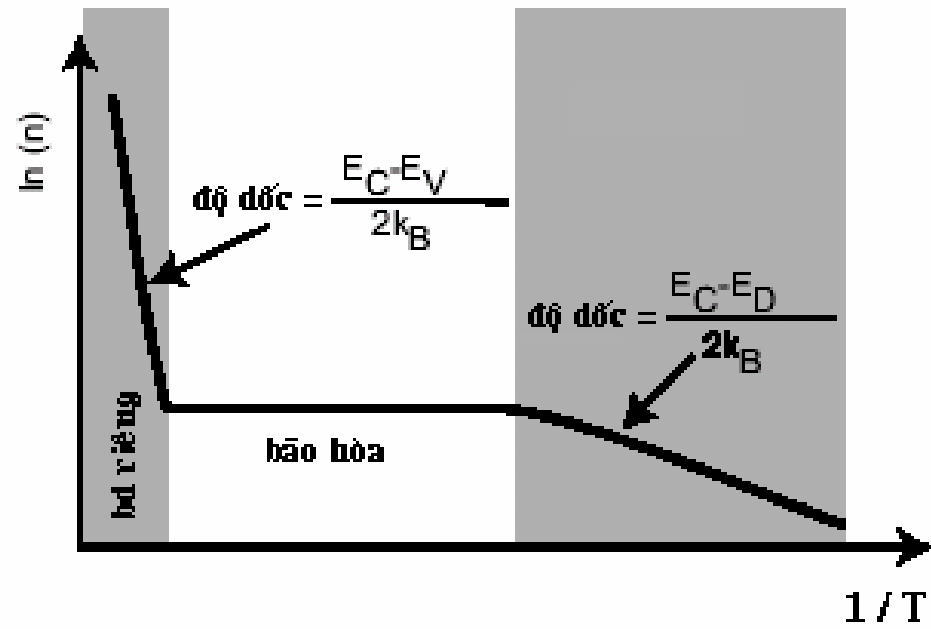


miền dẫn ñieãn tạp chất

$$n \sim \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right)$$

miền dẫn ñieãn riêng

$$n \sim \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$



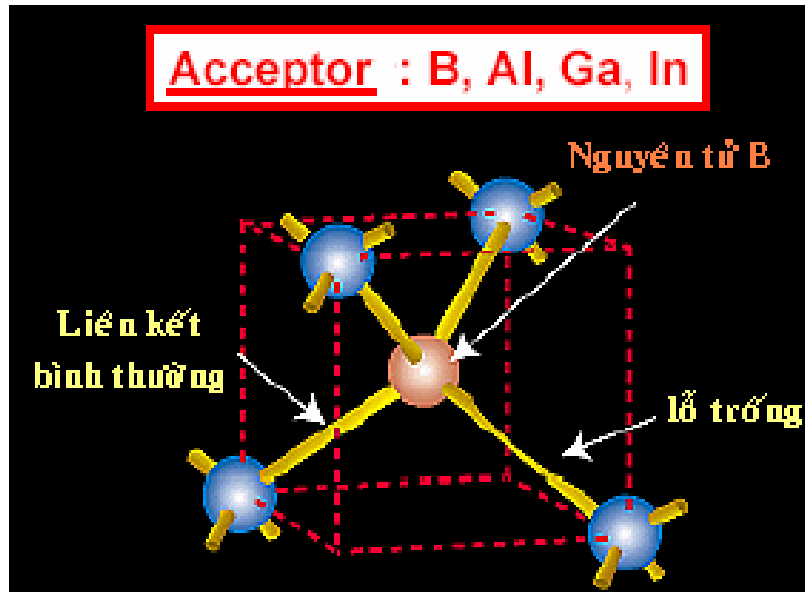
Khi tăng nồng độ tạp chất N_D ($N_{D_2} > N_{D_1}$) \rightarrow phân rã
ngang của vùng biểu diễn L_{nn_D} theo $\frac{1}{2kT}$ giảm
và khi đạt tới một nồng độ thích hợp (N_{D_3}) thì phân rã
ngang biến mất

\rightarrow chùng tối các electron tồn tại ở mức năng lượng gần
vùng dẫn trước khi hết electron ở mức E_D và năng lượng
ion hóa của nguyên tử tạp chất giảm.

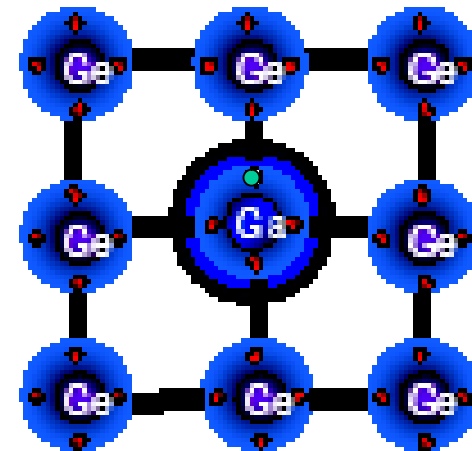
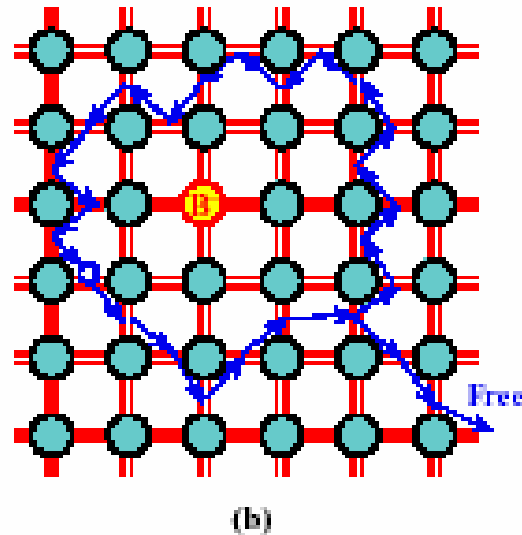
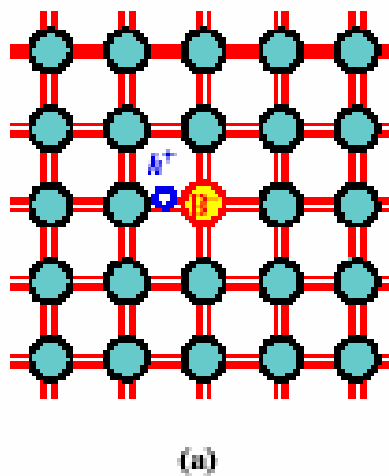
• GIAI THÍCH

- 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**. Tất cả mức vùng này mở rộng và **chạm vào vùng dẫn**
 - → năng lượng ion hóa bằng 0 → Năng lượng electron tối đa không nhỏ nhiệt độ rất thấp → Nhiệt độ bất kỳ quá trình dẫn điện riêng (nếu 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 năng lượng tạp nếu biến chất bán dẫn thành bán kim loại.

Tạp chất thuộc nhóm III trong chất bán dẫn nhóm IV



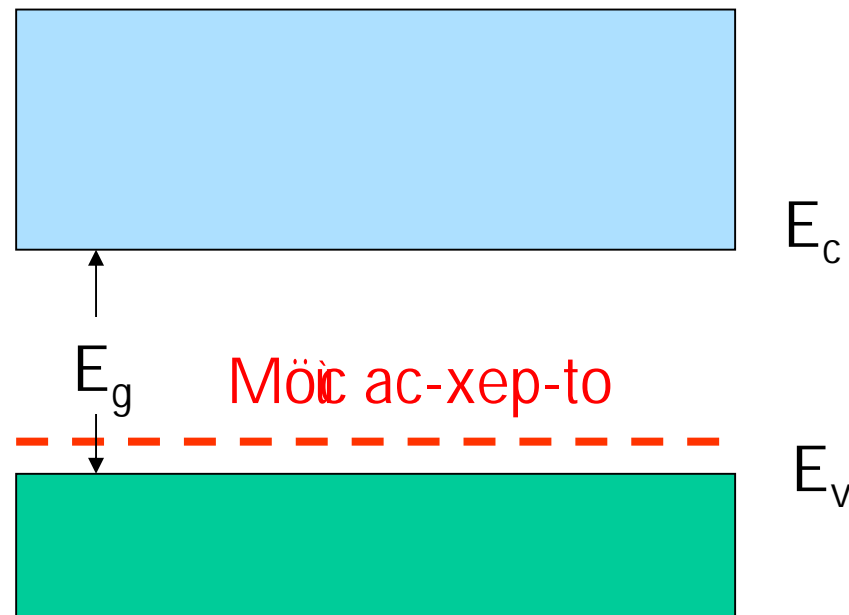
III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb
Tl	Pb	Bi



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

Khi nãa các nguyên tử tạp chất thuộc nhóm III vào Ge hay Si, trong vùng cấm xuất hiện các mức năng lượng nằm không xa ãnh vùng hoĩa trõ .

Tạp chất có thể ãcung cấp lỗ trống dẫn ãi : **tạp chất ac-xep-to** và mức tạp chất ãõõ gọi là **mức ac-xep-to** .

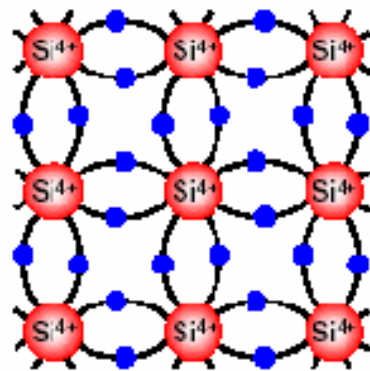


Chất bán dẫn loại P : chất bán dẫn có chứa tạp chất ac-xep-to.
 $p \gg n$

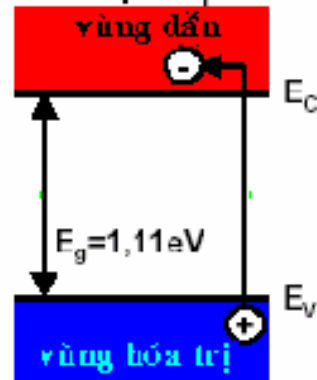
Hạt tải điện cơ bản : lỗ trống

Hạt tải điện không cơ bản : electron

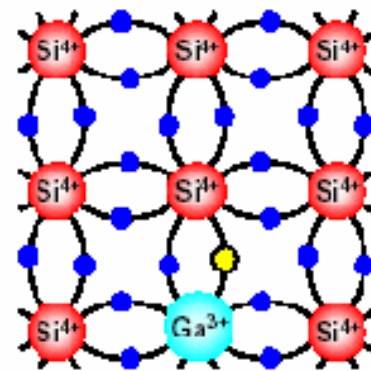
chất bán dẫn riêng



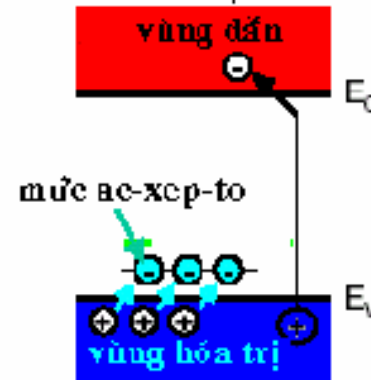
$$n = p = n_i$$



chất bdd loại P (tạp ac-xep-to)



$$n \ll p$$



Một nguyên tử B thay thế một nguyên tử Si ô nư t m ả ng; dung ba electron h ả tr ả li ề n k ết v ớ i c ả c nguyên tử Si l ầ n c ả n

nh ồ ng v ớ i thi ế u m ộ t electron h ả tr ả n ề n nguyên tử B c ầ u x u h ồ i ề ng l ấ y th ề m m ộ t electron ồ c ả c nguyên tử Si l ầ n c ả n. N ằ ng l ồ i ề ng c ầ n thi ế t n ằ n th ờ c hi ể n n ằ u n ằ u n ằ u h ồ n n ằ u s ố v ớ i E_g

→ t ả o th ằ n m ộ c n ằ ng l ồ i ề ng t ả p E_A v ườ ng c ầ m g ầ n n ằ n v ườ ng h ả tr ả .

→ nguyên tử Si b ằ chi ế m m ộ t electron → thi ế u m ộ t electron → t ả o th ằ n l ồ t r ồ n ằ g

→ electron c ầ c ả c nguyên tử Si đ ể d ằ n ằ y v ằ o l ồ t r ồ n ằ g n ằ u v ằ o t ả o th ằ n m ộ t l ồ t r ồ n ằ g m ộ i → c ồ n h ồ th ể l ồ t r ồ n ằ g c ồ t h ể đ ể ch ườ n đ ể d ằ n ằ g t r ồ n ằ g v ườ ng h ả tr ả .

SỞ PHỤ THUỘC SỐNG NHIỆT CỦA LỖ TRONG VÀO NHIỆT ĐỘ

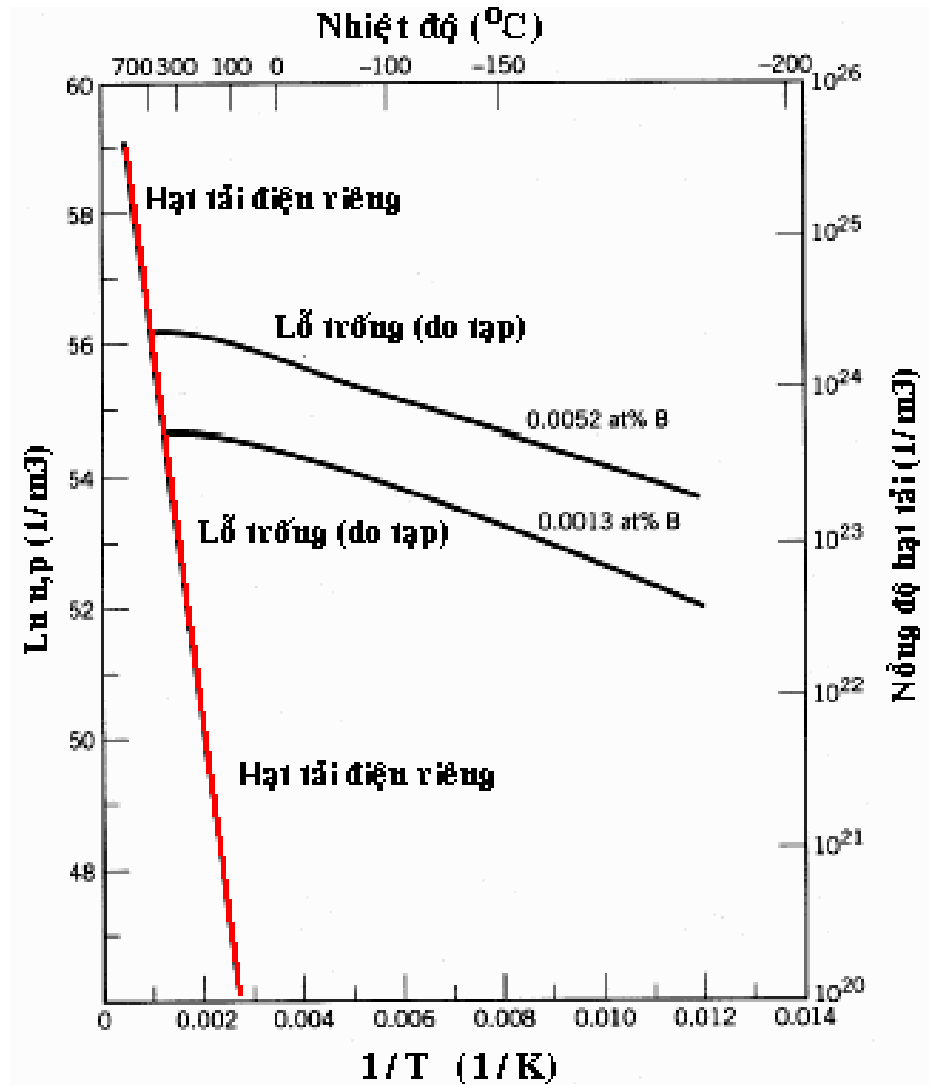
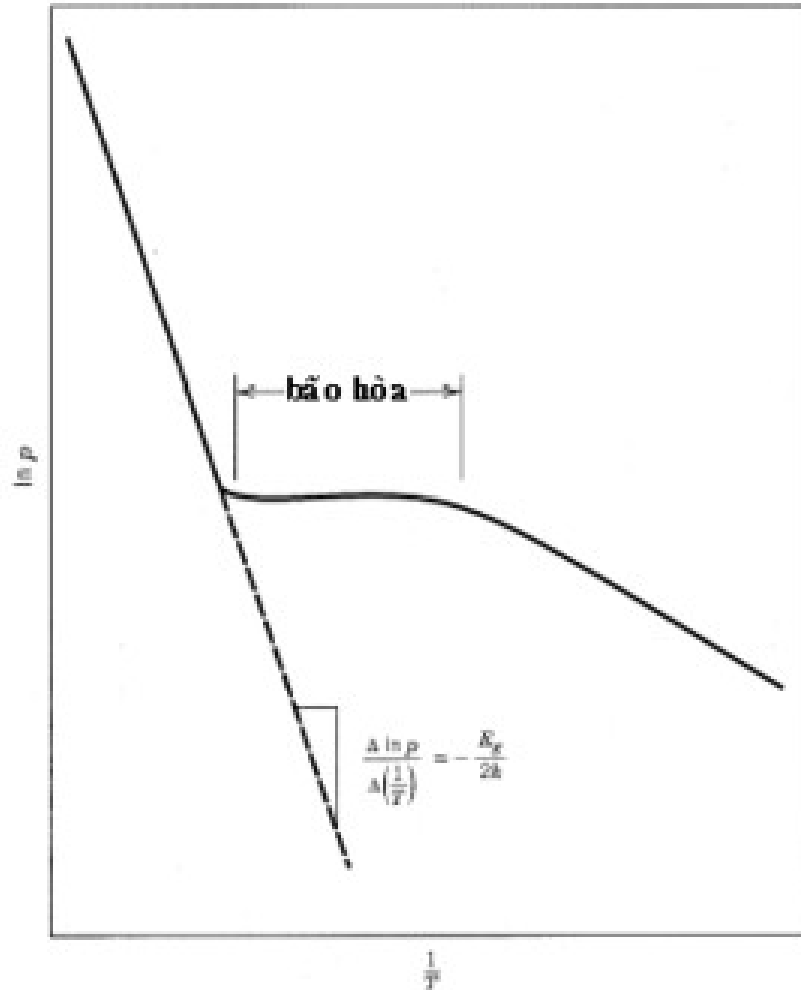
❖ Ở nhiệt độ thường các electron ở vùng hóa trị lấp đầy mức tại E_A và ở giới hạn của lỗ trống có thể di chuyển tự do trong vùng hóa trị → hạt tải tự do chủ yếu → Tạp chất nhóm ba này được gọi là **tạp chất nhận (acceptor)** – mức tạp xuất hiện trong vùng cấm E_A gọi là **mức Acceptor** → **Bản dẫn loại P**.

Trong bản 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 chính chủ yếu trong bản dẫn loại P

Sở phụ thuộc của n_A (nồng độ lỗ trống) ở vùng hóa trị theo nhiệt độ trong bản dẫn loại P tổng thì nhỏ sở phụ thuộc của n_D ở vùng dẫn trong bản dẫn loại n.

BAI DAI LOAI P



Noàng ñoã caùc haít taúi ñieän trong chaát baùn

daãn
 Noàng ñoã haít taúi ñieän (n_o vaø p_o) trong ñieàu kieän cân baèng.

Vôùi chaát baùn daãn ñieän baát kyø (rieäng hoaïc taíp chaát) trong ñieàu kieän cân baèng ôùnhieät ñoã T

Ñôn vò của n_o vaø p_o [cm^{-3}]

□ Noàng ñoã electron :



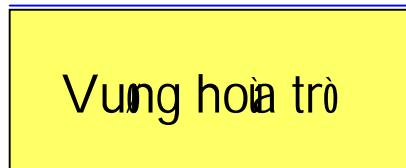
E_c'

E_c

Sắc suất lớp dẫn trạng thái

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

□ Noàng ñoã lỗ trống :



E_v

E_v'

Sắc suất trạng thái trống

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

Noàng ñoã electron trong vùng dẫn

$$n_0 = \int_{E_c}^{E_{c1}} g(E) f(E) dE$$

$g(E)$ 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 ô nhiễm của vùng dẫn.

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

và hàm phân bố Fermi-Dirac: $f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}$

NOÏNG ÑOÄELECTRON TRONG VUNG DÃN CUA CHÃT BÃN DÃN KHOÏNG SUY BIËN

Vôïi chãt bãn dãn khoÏng suy biËn : $E_C - E_F \gg kT$

Cõitheãdung cãc gãn ñuïng sau :

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

2. môûroãg giõï hãï lãý tích phãï ra ñeãn võacung
(khi E lõn , f(E) tiãï ñeãn 0).

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

$$n_0 = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F}{kT}} \int_0^{\infty} E^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

$$\text{Đặt : } x = \frac{E}{kT}$$

Động năng electron trong vùng dẫn ở nhiều điều kiện cân bằng theo T:

$$n_0 = 4\pi \left(\frac{2m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F}{kT}} \int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx$$

Theo ñình nghĩa và tính chất của hàm Gamma :

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

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

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

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

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \text{ mật ñoãtraing thài rút goãn của vùng ðãñ}$$

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

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

NOÀNG ÑOÀLOÀTTRÖNG TRONG VUNG HOÀ TRÒ CỦA CHẤT BÀN DẪN KHÔNG SUY BIẾN

Töông töi: noàng ñoàloàttröng trong vung hoà trò ôũnieu kieän cân baèng:

$$P_o = N_V \cdot e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$$

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

E_V : naêng lööing ñaènh vung hoà trò

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ maø ñoàtraäng thaøi ruøt goän của vung hoà trò}$$

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

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

$E_g = E_C - E_V$: ñoàroàng vung caám

Noàng ñoã haït taûi ñieän
rieâng

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

⇒ Vôùi moät chaát baïn daãn cho tröôïc vaø ôû nhieät ñoã T coá ñònh, tích $n_0 p_0$ laø moät haøng soá:

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

Vôùi chaát baïn daãn rieâng (saïch = tinh khiết): $n_0 = p_0 = n_i$

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

Niveau kien trung hoa nien trong chaat baun daan Mouc Fermi

Neu biet niooc E_F thi tinh niooc n_o va p_o . Ngooc lai: nea tinh niooc E_F ta dua vao nien kien trung hoa ve nien.

Voi mot chaat baun daan bat ky, nien kien trung hoa nien

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

N_A^- , N_D^+ tong ong la tong noa ion acxepo va tong noa ion noa.

Chaat baun daan rieng : $n_o = p_o$

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

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

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

❖ Ô \hat{U} T = 0K : $E_F = \frac{E_C + E_V}{2}$ → ñoá v \hat{u} i b \hat{a} n d \hat{a} n ri \hat{e} ng \hat{u} 0K
m \hat{o} c Fermi nằm gi \hat{o} a v \hat{u} ng c \hat{a} m.

❖ Khi T \neq 0 : Vì $m_p \neq m_n$ → m \hat{o} c E_F h \hat{o} i l \hat{e} ch kho \hat{i} t \hat{a} m
v \hat{u} ng c \hat{a} m.

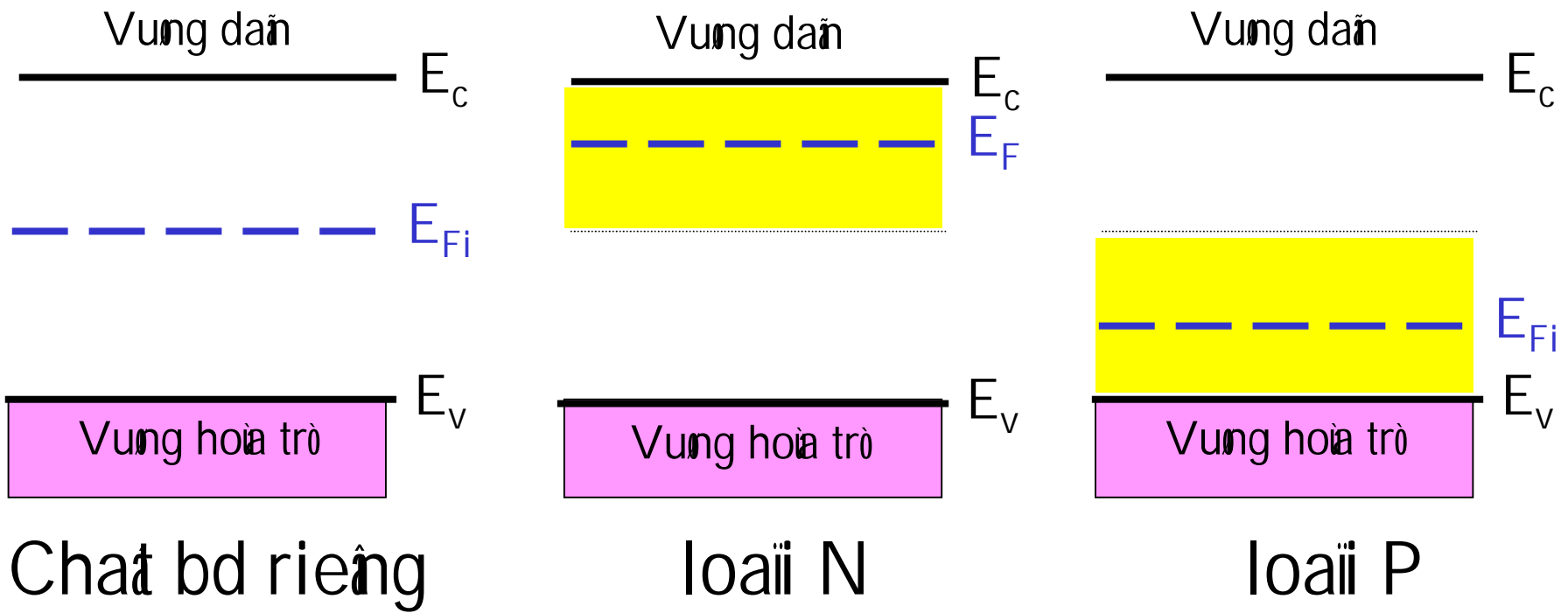
❖ B \hat{a} n d \hat{a} n lo \hat{a} i N : m \hat{o} c E_F l \hat{e} ch ve \hat{a} ñ \hat{o} a tr \hat{e} n v \hat{u} ng c \hat{a} m,
n \hat{o} ng ñ \hat{o} a acceptor c \hat{a} ng nh \hat{i} eu, m \hat{o} c E_F c \hat{a} ng g \hat{a} n ñ \hat{a} y E_C
c \hat{u} a v \hat{u} ng d \hat{a} n.

❖ B \hat{a} n d \hat{a} n lo \hat{a} i P : m \hat{o} c E_F l \hat{e} ch ve \hat{a} ñ \hat{o} a d \hat{o} u \hat{i} v \hat{u} ng c \hat{a} m,
n \hat{o} ng ñ \hat{o} a donor c \hat{a} ng nh \hat{i} eu, m \hat{o} c E_F c \hat{a} ng l \hat{e} ch ve \hat{a} ñ \hat{a} nh
v \hat{u} ng ho \hat{a} tr \hat{o} .

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 taú ñieän khoâng caân

Ôû ñieäu kieän caân baèng nhieät ñoàng:
baèng

Quaù trình sinh = Quaù trình taú hoïp

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

Vôû g_o laø soá caùp ñieän töû – loã troàng sinh ra do nhieät trong moät ñôn vò theátích.

r_o laø soá caùp ñieän töû – loã troàng bò maät ñi do taú hoïp trong moät ñôn vò thôï gian.

- Trong kim loaïi, trên thöïc teátá **khöng theám thay ñoã ñoàng ñoã haït taú ñieän** trong theátích. Trong baïn daïn, söï taïo thanh caùc caùp electron – loã troàng taïo neän moät söï thay ñoã löün ñoã daïn ñieän trong theátích \rightarrow **goïi laø caùc haït taú ñieän dö \equiv caùc haït taú ñieän khoâng caân baèng.**

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 môi trường tạo thành, nồng độ của các hạt tải điện không cân bằng có thể vượt xa nồng độ nhiệt trung bình của các hạt tải điện cân bằng.

Những do tảo sai với mạng tinh thể chuỗi nhanh chóng không nồng độ vượt trở lại vào không còn phân biệt môi trường với các hạt tải điện cân bằng.

Nồng độ hạt tải điện bằng

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

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

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

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

$$n = n_0 \exp \frac{E_{Fn} - E_F}{kT}$$

$$p = p_0 \exp \frac{E_F - E_{Fp}}{kT}$$

E_{Fn} và E_{Fp} tổng cộng luôn gọi là **chua Fermi** của **niên tởu** và **loã trõng**

$$np = n_0 p_0 \exp \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}$$

Hieu năng lõõng $E_{Fn} - E_{Fp}$ ãc trõng cho ãõ
leõ khõ trõng thõ cõn bõng

Thời gian sống

❖ Với chất bán dẫn ãiãn riãn $\Delta n = \Delta p$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = g_0 - \gamma_r np = -\gamma_r (n_0 \Delta p + p_0 \Delta n + \Delta n \Delta p) = \gamma_r \Delta n (n_0 + p_0)$$

❖ Trường hợp kích thích yếu $\Delta n \ll n_0 + p_0$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}$$
$$\tau = \frac{1}{\gamma_r (n_0 + p_0)}$$

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

τ là thời gian mà sau ãiãn nồng ãiãn hạt tải ãiãn không cân bằng giảm ãi e là ãi - thời gian sống của ãiãn tũ (loãt rã).

❖ 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 $\tau_n \neq \tau_p$

Caùc quaù trình taù hõp trong caùc chaát baùn daãn

Thõ i gian soáng τ của caùc haít taù ñieãn do caùc quaù trình taù hõp xaãy ra beãn trong chaát baùn daãn quy ñõnh.

Coù theã phaân loaïi caùc quaù trình taù hõp thaàn

- + Taù hõp vung - vung
- + Taù hõp thoáng qua caùc taím trong vung caám
- + Taù hõp maét ngoaï

Neáu trong chaát baùn daãn ñõng thõ i xaãy ra caùc 3 quaù trình taù hõp noùi treãn thì thõ i gian soáng τ của caùc haít taù ñieãn ñõõc tính theo coáng thõ i :

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i} = \frac{1}{\tau_{\text{vung-vung}}} + \frac{1}{\tau_{\text{baãy}}} + \frac{1}{\tau_{\text{maét}}}$$

Tiếp xúc kim loại - chất bán dẫn

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

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

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

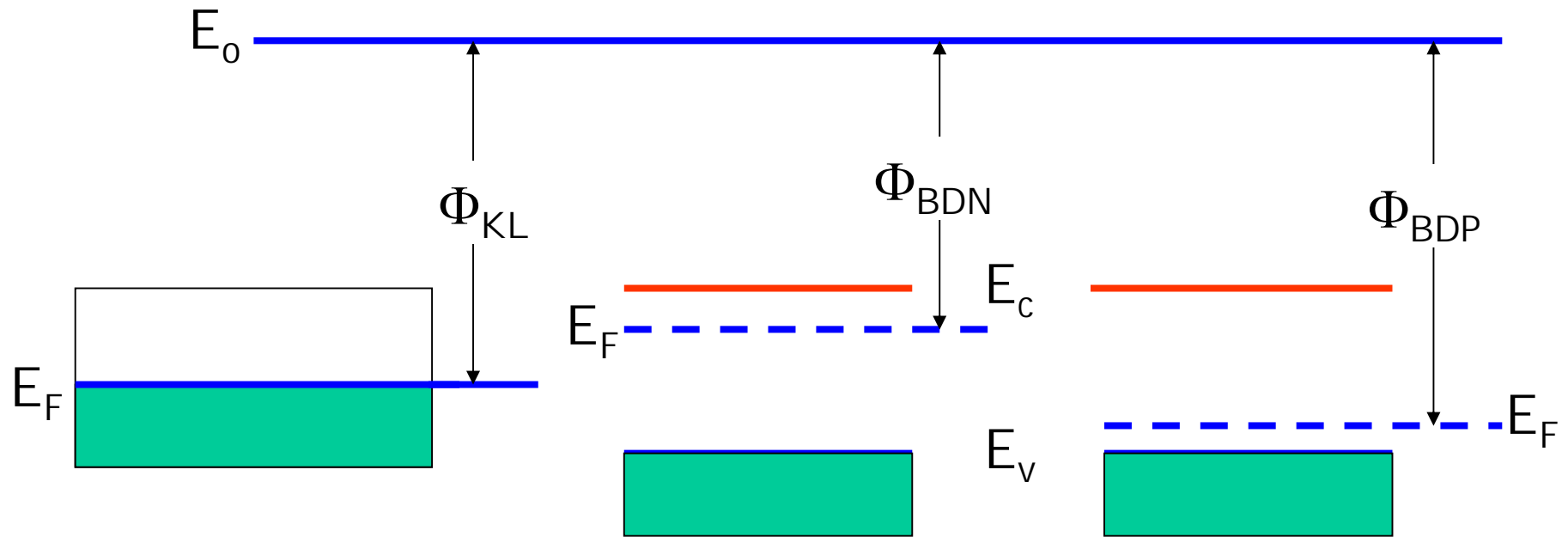
$$j_s = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right)$$

hệ số gọi là **dòng phát xạ nhiệt điện tử**.

A là một hằng số không phụ thuộc vào vật liệu

$$A = \frac{4\pi m_0 e k^2}{h^3}$$

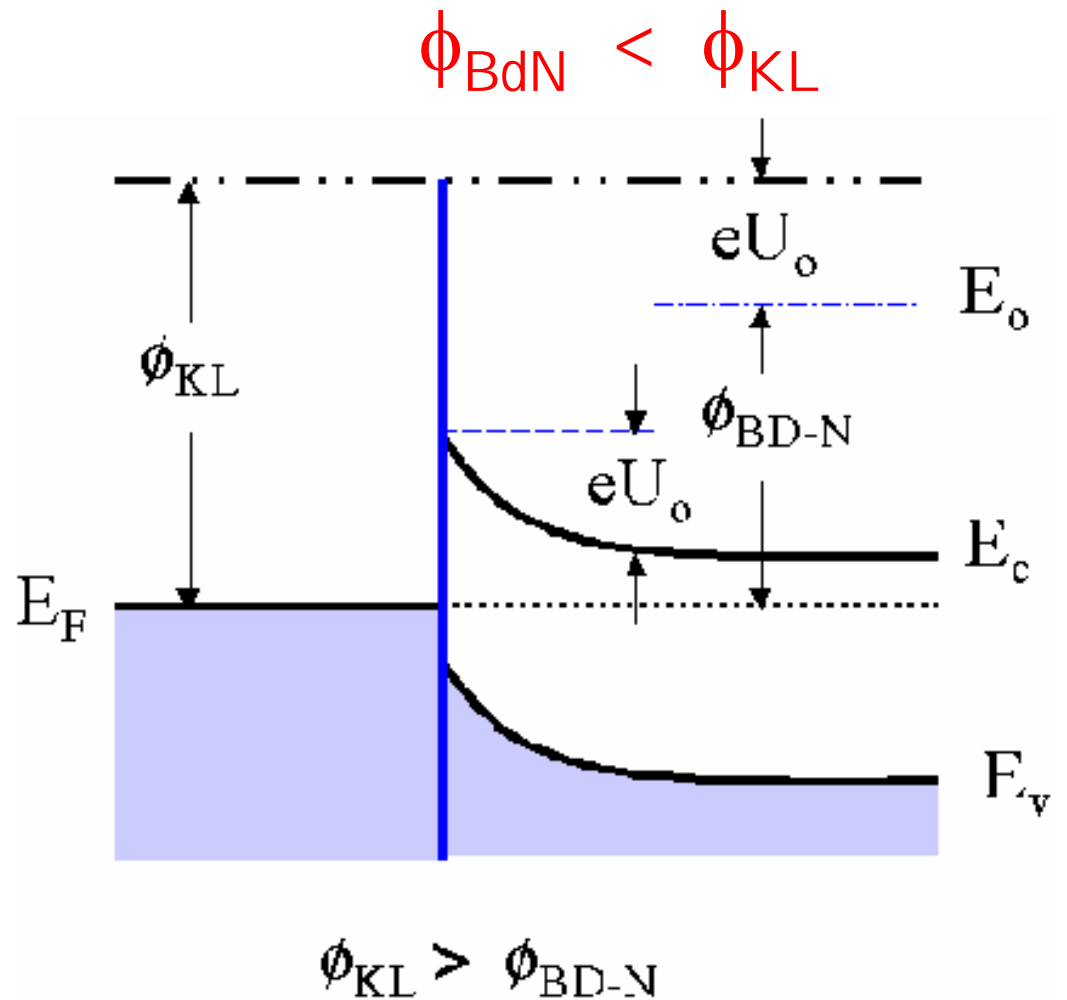
$$\Phi = E_0 - E_F \text{ là công thoát điện tử}$$



Giaûn ñoà vuøng naêng löông cuûa löüp chuyeån tieáp kim loaïi - chaát baøn daãn

Giaû söû chaát baøn daãn laø loaïi N vaø coù coâng thoait ñieän töû

Soá electron thoait khoûi chaát baøn daãn ñeå sang kim loaïi seõ löün hôn soá electron chuyeån ñoäng theo chieàu ngöôïc laïi



→ phía kim loại có tích điện âm còn phía chất bán dẫn mặt thì một số điện tử sẽ lại các ion dương không có trung hòa

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

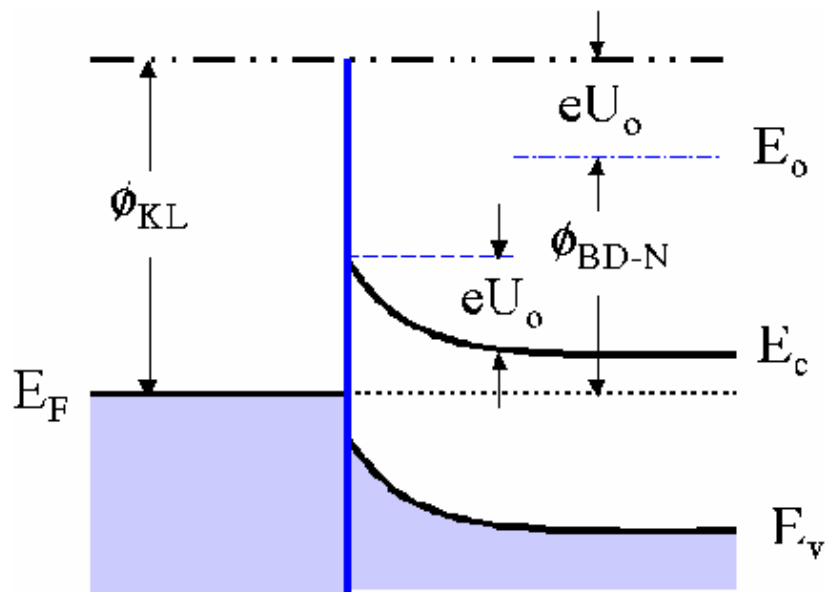
→ Điện trường này ngăn cản sự chuyển động của electron từ chất bán dẫn sang kim loại nhưng ảnh hưởng đến các electron chuyển động từ kim loại sang chất bán dẫn.

→ Khi cân bằng : ô-ranh giới của hai vật liệu xuất hiện một điện trường ổn định E_0 , nó gọi là điện trường tiếp xúc.

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

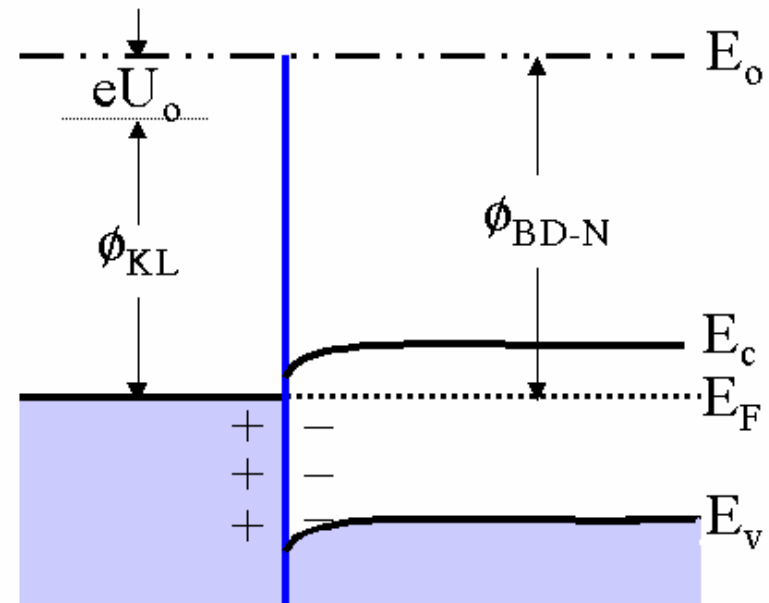
$$j_{BD} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{BD} + eU_0}{kT}\right) = j_{KL} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{KL}}{kT}\right)$$

Từ những nhận xét về các lớp điện tích không gian và tính hiệu ứng nhiễu xạ khi khe hẹp ta có thể vẽ giản đồ năng lượng cho lớp chuyển tiếp kim loại - bán dẫn trong điều kiện cân bằng



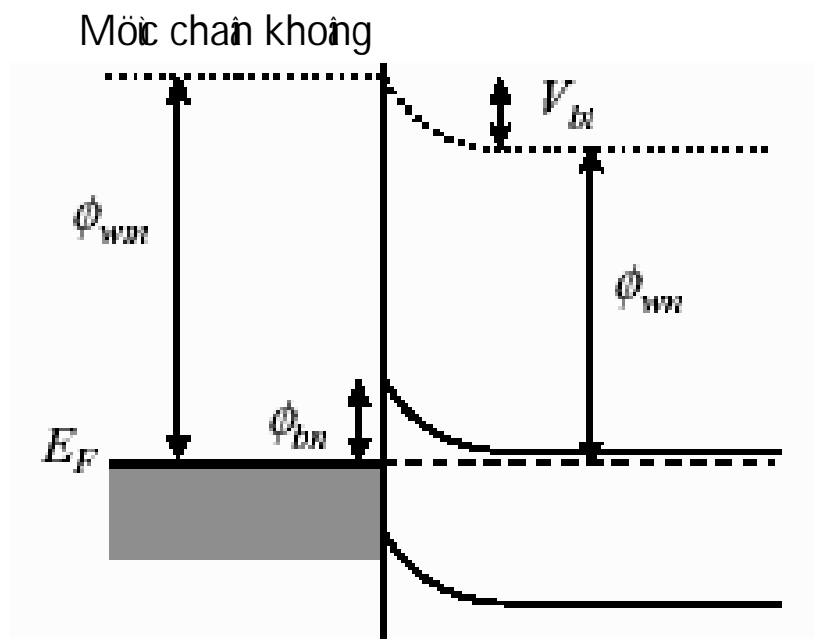
$$\phi_{KL} > \phi_{BD-N}$$

Miền tiếp xúc tiếp xúc ở trên mặt chất bán dẫn có điện trở rất lớn so với miền tiếp xúc kim loại và miền bán dẫn trung hòa. Lớp nghèo nên nó gọi là **lớp nghèo**.

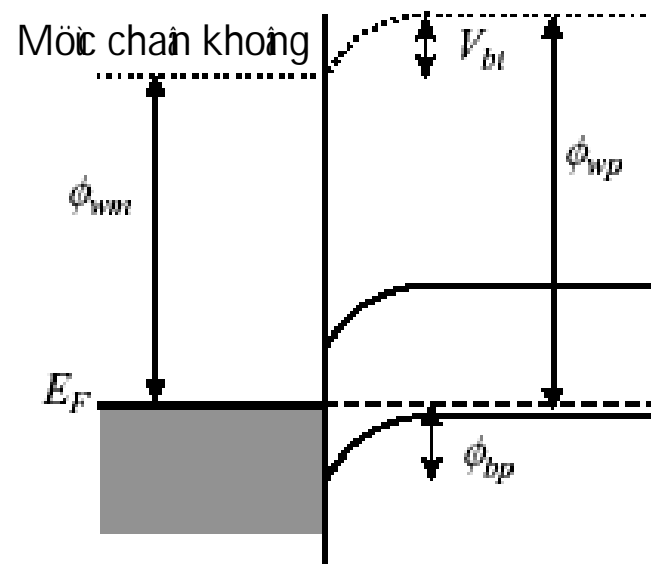


$$\phi_{KL} < \phi_{BD-N}$$

Trong trường hợp $\phi_{KL} < \phi_{BD-N}$, miền tiếp xúc tiếp xúc có điện trở rất nhỏ nên nó gọi là **lớp giàu**.



Kim loại - BD loại N



Kim loại - BD loại P

Nguồn dòng Volt – Ampere của chuyển tiếp Kim loại – Bán dẫn

❖ Khi chưa nối mạch ngoài lên hệ kim loại – bán dẫn:

$$j_{KI} = j_{Bd} = j_s$$

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

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

❖ Khi nối mạch ngoài lên hệ hình thành lớp ngăn ($\phi_{KI} > \phi_{Bd}$) vì điện trở lớp ngăn lớn nên toàn bộ điện áp ngoài rơi xuống tại lớp ngăn nhờ vậy sinh ra tại lớp tiếp xúc hai đầu tại lớp ngăn.

Phân cực thuận

$$V_{\text{ngoại}} = V = \phi_{\text{Bd}} - \phi_{\text{KI}} > 0$$

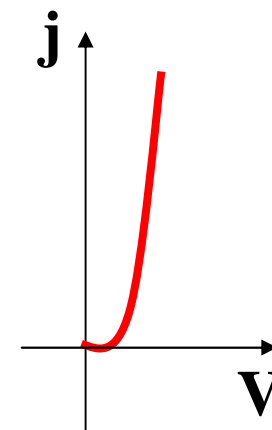
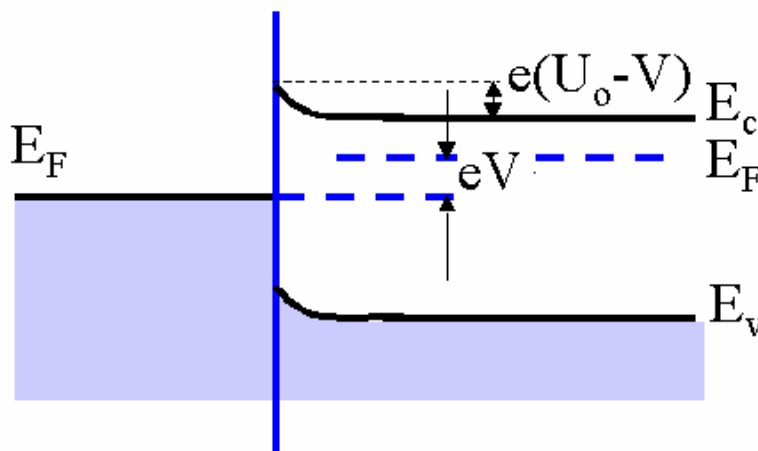
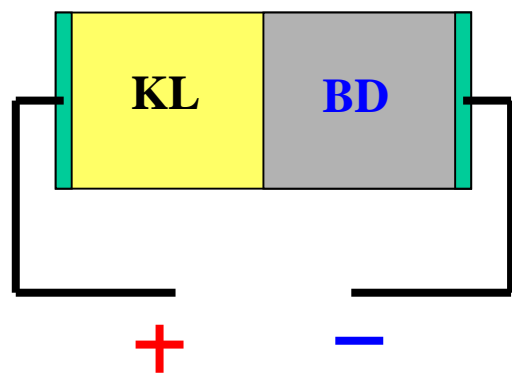
Niên áp V tạo nên niền trường ngoài ngược chiều với niền trường tiếp xúc làm giảm hàng rào thế năng nối với các electron chuyển từ bán dẫn sang kim loại $\rightarrow j_{\text{Bd}}$ tăng, $j_{\text{KI}} = \text{const.}$

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

$$j_{\text{bd}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{\text{Bd}} + eU_0 - eV}{kT}\right) = j_s e^{\frac{eV}{kT}}$$

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

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



Phân cực ngược

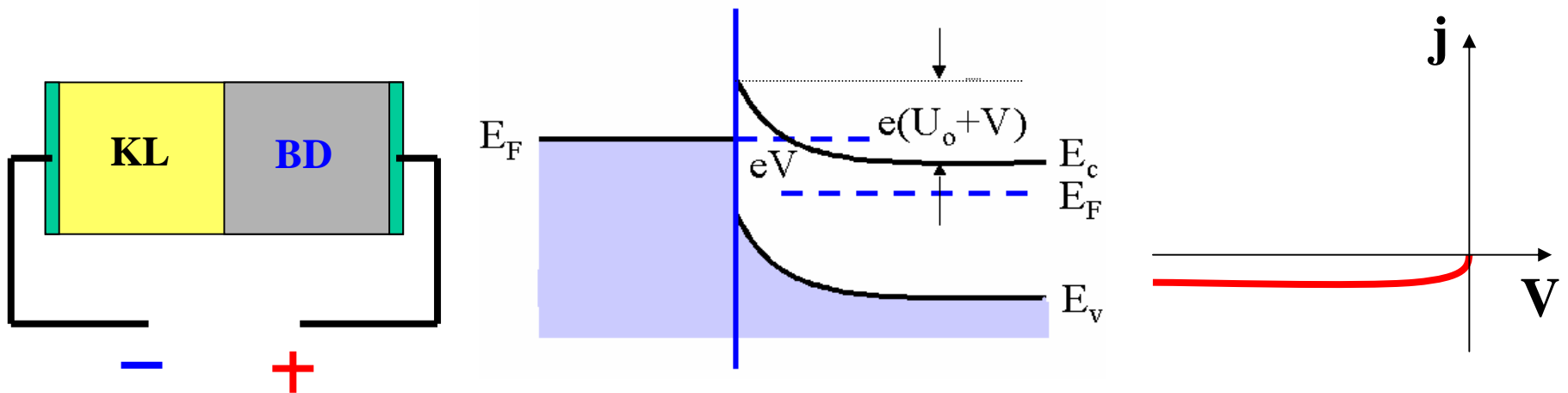
$$V_{\text{ngoại}} = V = \phi_{\text{Bd}} - \phi_{\text{Kl}} < 0$$

Nhiên trường ngoài cùng chiều với nhiên trường tiếp xúc, làm tăng hàng rào thế năng nên với các electron chuyển động từ bán dẫn sang kim loại.

$$j_{\text{Kl}} = j_s$$
$$j_{\text{bd}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{\text{Bd}} + eU_0 + eV}{kT}\right) = j_s e^{-\frac{eV}{kT}}$$

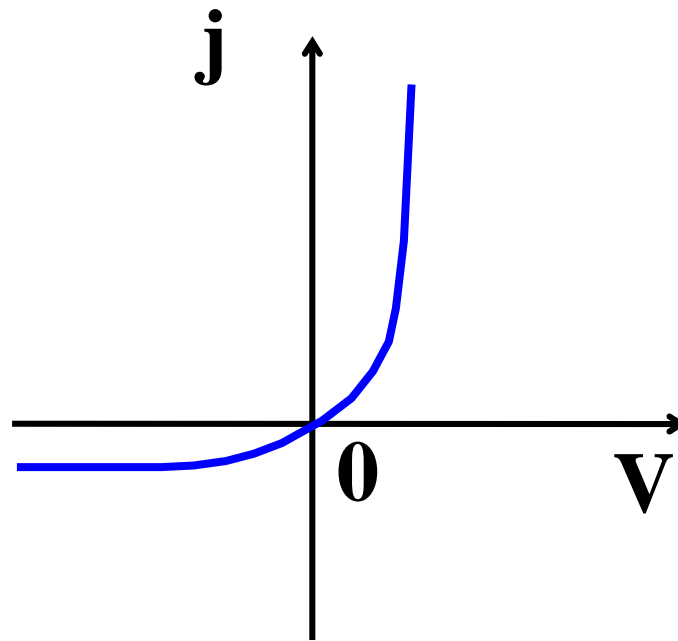
→ Dòng điện tổng cộng qua lớp tiếp xúc kim loại
 – bán dẫn:

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



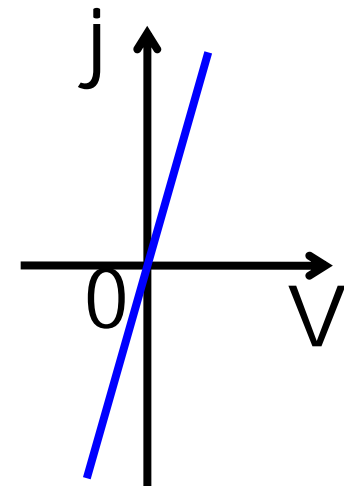
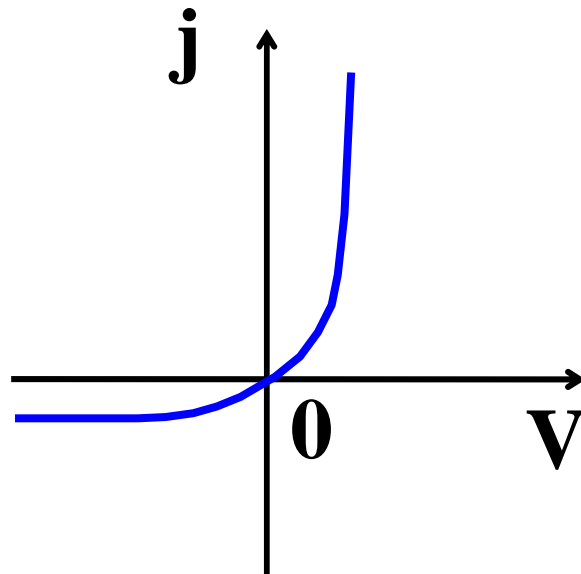
→ Tổng quát của hai trường hợp phân cực thuận và ngược:

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



❖ Tiếp xúc có $\phi_{KI} > \phi_{Bd} \Rightarrow$ Lớp nghèo \Rightarrow tiếp xúc chẵn lẻ \rightarrow diod kim loại - bán dẫn hay diod Schottky.

❖ Trường hợp chọn lớp tiếp xúc có $\phi_{KI} < \phi_{BdN}$ hay $\phi_{KI} < \phi_{BdP} \Rightarrow$ lớp nghèo \Rightarrow Dòng điện chảy theo cả hai chiều kim loại sang bán dẫn hay bán dẫn sang kim loại nếu có điện trở nhỏ \rightarrow tiếp xúc Omic.



Chuyển tiếp P – N

Các cách chế tạo

- + Phương pháp nóng chảy
- + Pha tạp trong quá trình kết 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 mới hình thành trên cùng một tinh thể.

Chuyển tiếp P – N : ñieàu kieän cân

Giãn ñoàng năng löông của lớp chuyển tiếp P - N. Theá hieäu tiep
xúc

Khi môi ñoïc hình thành lớp chuyển tiếp, do có chênh lệch về ñoàng
ña của các hạt tải ñieän (ñieän töù vaø löät röng) trong hai mien , xảy ra
các quá trình khuếch tán sau :

ñieän töù khuếch tán từ mien N sang mien P

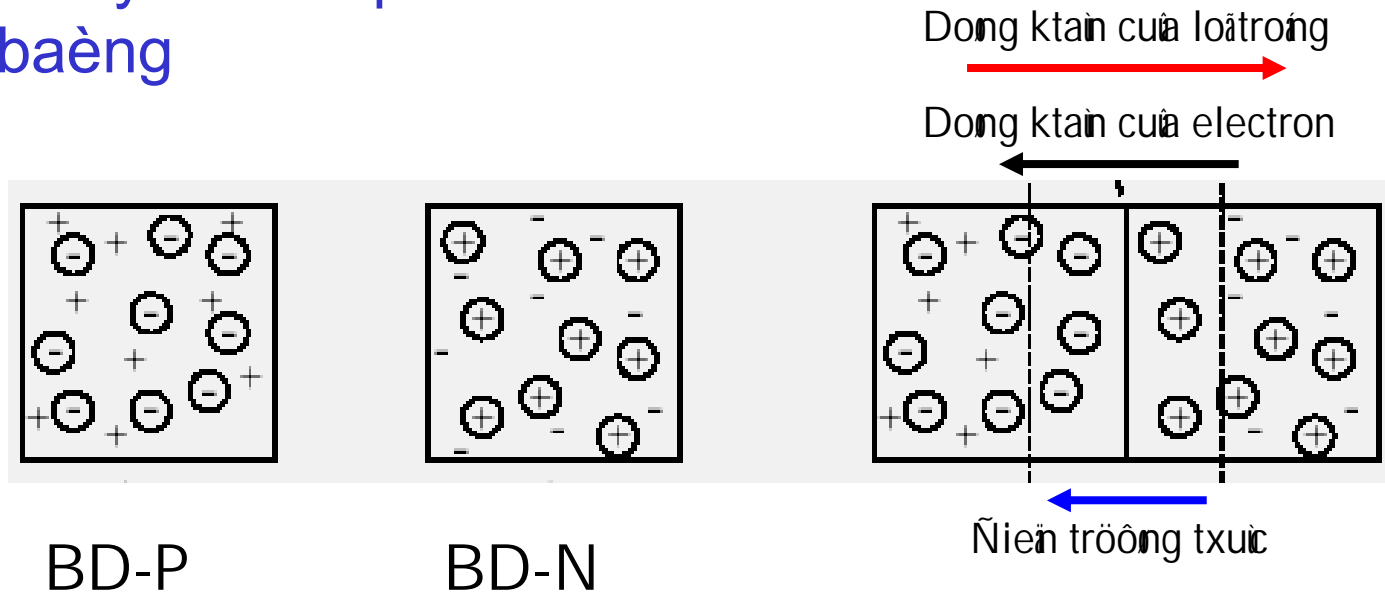
löät röng khuếch tán từ mien P sang mien N.

⇒ **beän mien N xuất hiện các ion ñoàng** không ñoïc trung hòa
vaø **beän mien P còn lại các ion aczepto âm** không ñoïc trung hòa bù
löät röng.

Ôù ranh giới của 2 mien hình thành ñieän röng hööng từ mien N
sang mien P.

Ñieän röng này hạn chế quá trình khuếch tán của các hạt tải ñieän
cho nên ñeän một lúc nào ñoù sẽ ñạt tới trạng thái cân bằng.

Chuyển tiếp P – N : ñiều kiện cân bằng

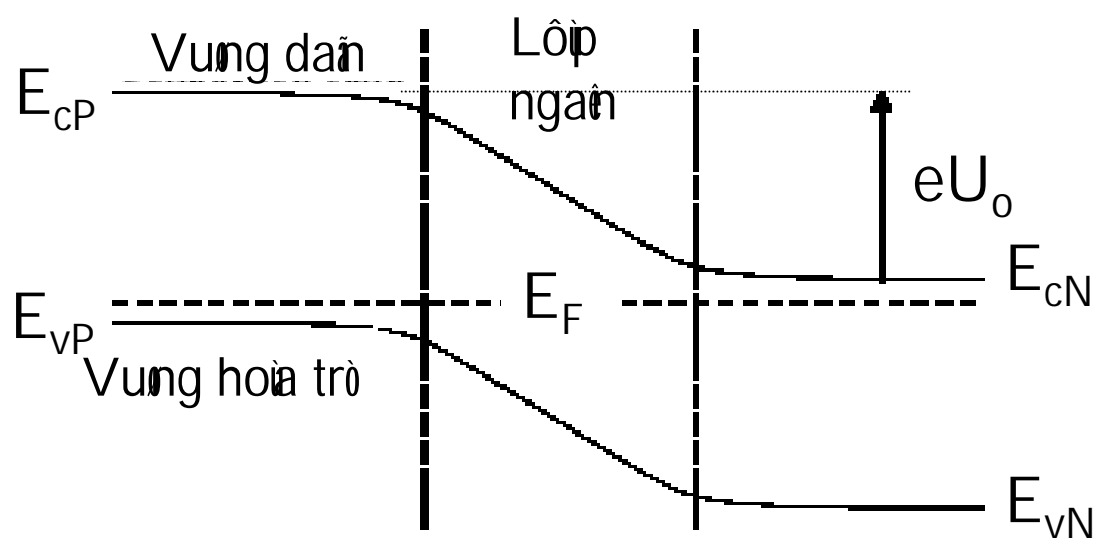
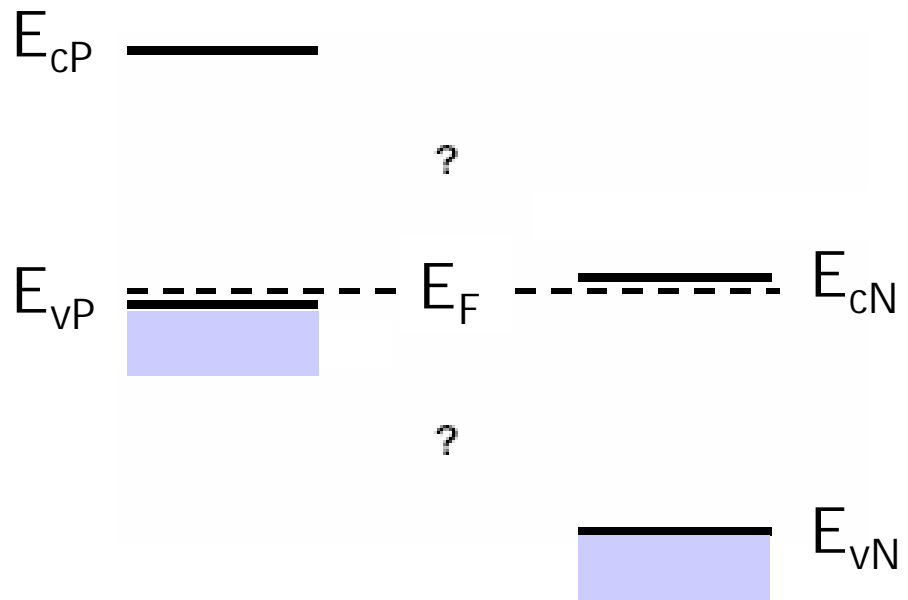


Trong miền ñiên tực the tực W ô ranh giới của hai miền N và P có ñiên trường tiếp tực E_0 và

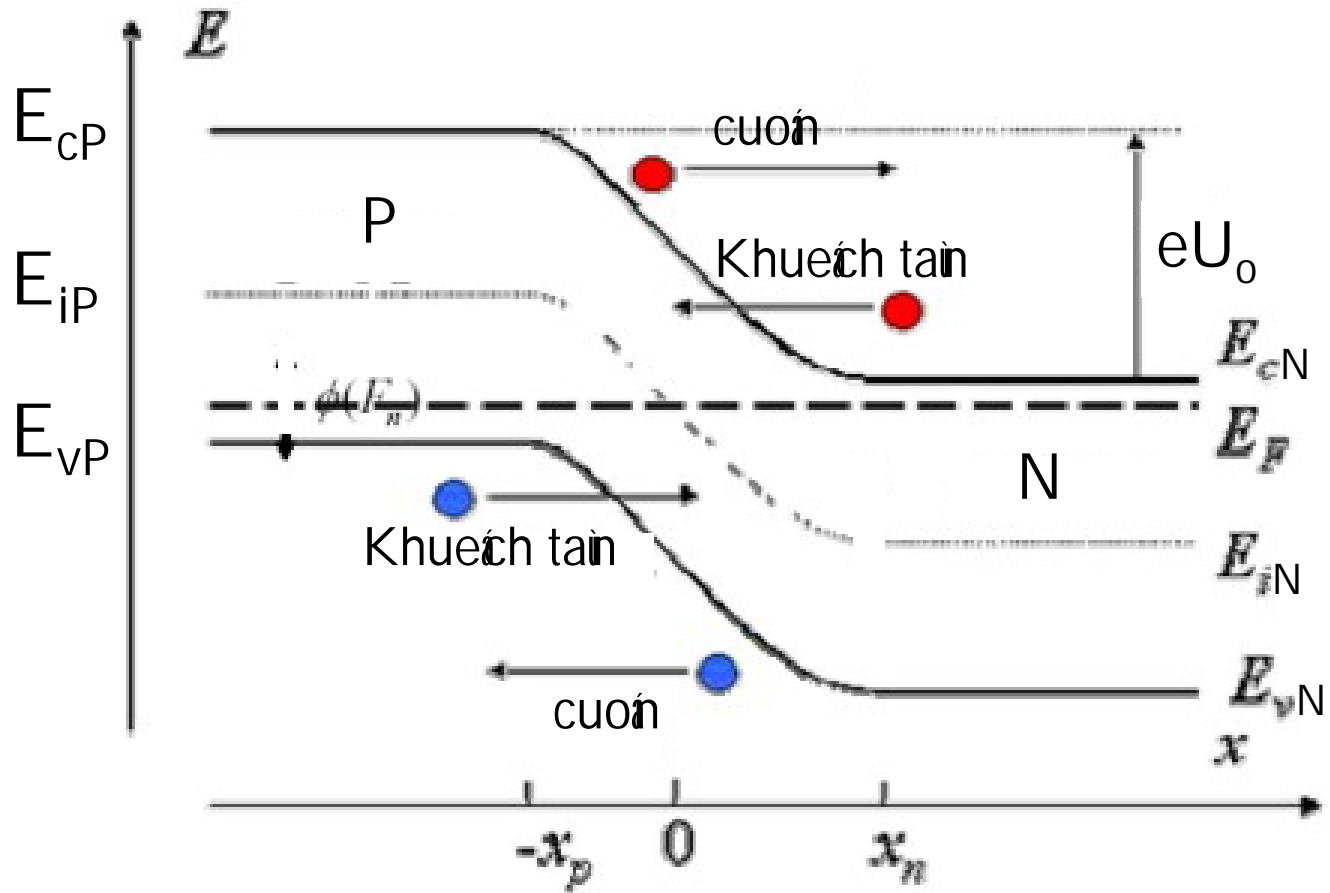
dòng ñiên tực từ N sang P : $j_n = j_{ns}$: dòng ñiên tực từ P sang N

dòng loãtrng từ P sang N : $j_p = j_{ps}$: dòng loãtrng 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 : ñiều kiện cân bằng



Theá hiãu tieáp

xuùc

Miãu ñiãu tích thiãt tích chã cõu cãc ñiãu tích cõu ñiãu (cãc ion N_D^+ vã cãc ion N_A^-) ñiãu ñiãu trõu cãc miãu nay rãt hõu ñiãu trõu cãc miãu P vã N trung hõu.

Trong miãu N :

$$n_{0N} = N_c \exp \frac{E_F - E_{cN}}{kT}$$

$$n_{0N} p_{0N} = n_i^2$$

Khi $E_F = E_{iN}$ thì $n_{0N} = n_i$ ñiãu:

$$n_{0N} = n_i \exp \frac{E_F - E_{iN}}{kT}$$

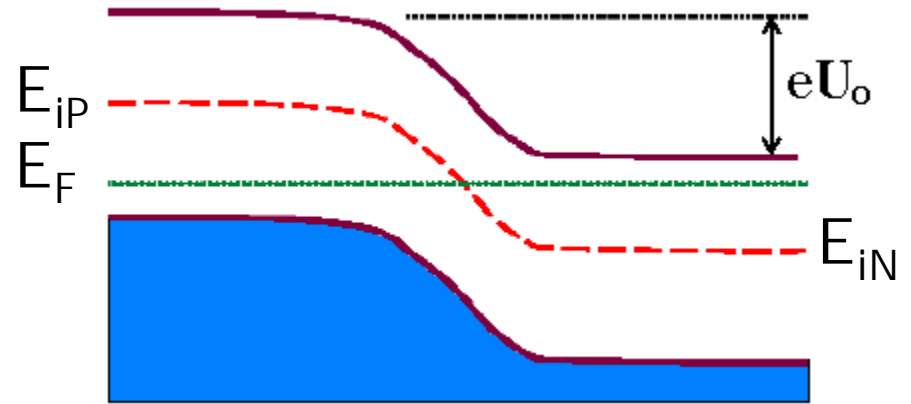
Theá hieäu tieáp xuïc

Trong mieàn P :

$$n_{0P} p_{0P} = n_i^2$$

$$p_{0P} = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_{VP}}{kT}\right)$$

$$p_{0P} = n_i \exp\left(-\frac{E_F - E_{iP}}{kT}\right)$$



$$n_{0N} p_{0P} = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{iP} - E_{iN}}{kT}\right) \quad \longrightarrow \quad \frac{n_{0N} p_{0P}}{n_i^2} = \exp\left(\frac{eU_0}{kT}\right)$$

Theá hieäu tieáp xuïc :

$$U_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0N}}{n_{0P}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_{0P}}{p_{0N}}$$

Chuyển tiếp P – N : đặc trưng Von-Ampe

Xét lớp chuyển tiếp P-N .

Các dòng sau chảy qua lớp chuyển tiếp này:

+ dòng trôi từ miền P sang miền N : j_p
(dòng hạt tải điện cô bản)

+ dòng trôi từ miền N sang miền P : j_{ps}
(dòng hạt tải điện không cô bản)

+ dòng điện tử từ miền N sang miền P : j_n
(dòng hạt tải điện cô bản)

+ dòng điện tử từ miền P sang miền N : j_{ns}
(dòng hạt tải điện không cô bản)

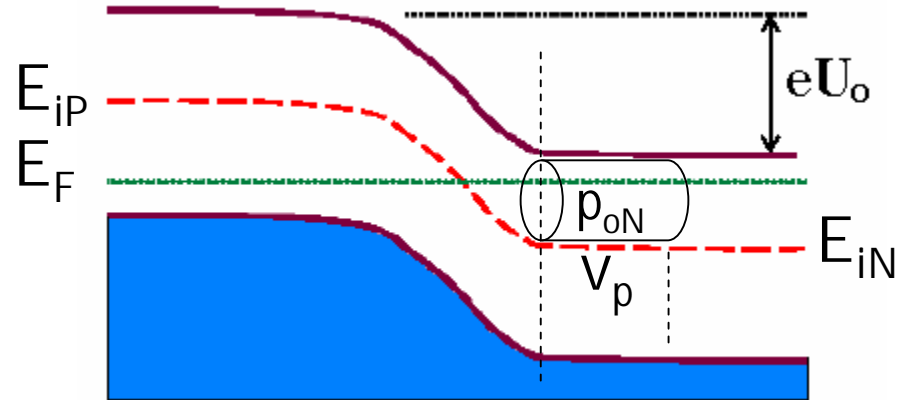
Khi không có điện áp ngoài vào, dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

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

trong đó

$$j_{ns} = en_{0P} \frac{L_n}{\tau_n}$$

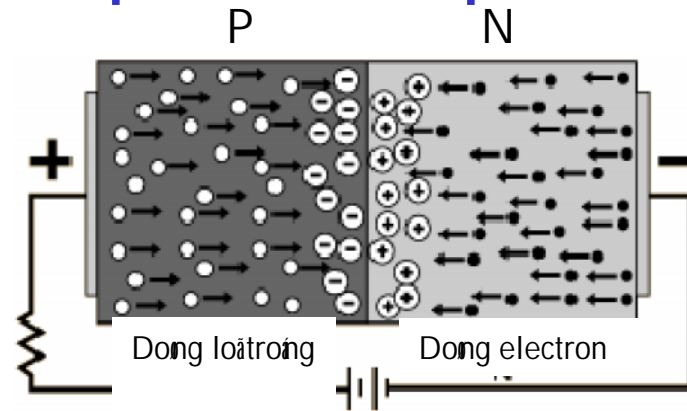
$$j_{ps} = ep_{0N} \frac{L_p}{\tau_p}$$



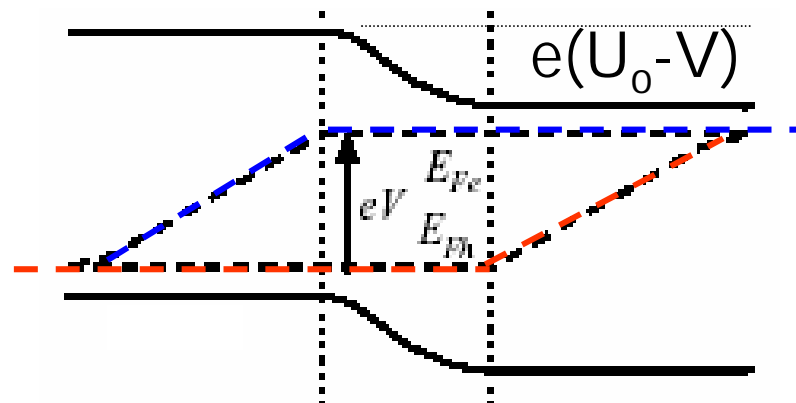
Điện áp V lên hệ P-N.

- Do điện trường của lớp điện tích tích tụ rất lớn nên gần như có thể xem toàn bộ V sụt hết trên miền này.
- Xét trường hợp lớp ngăn mỏng nếu 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



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



Sơ giảm này không ảnh hưởng gì nên các dòng hạt tải nên không còn nữa nhưng làm tăng các dòng hạt tải nên còn lại :

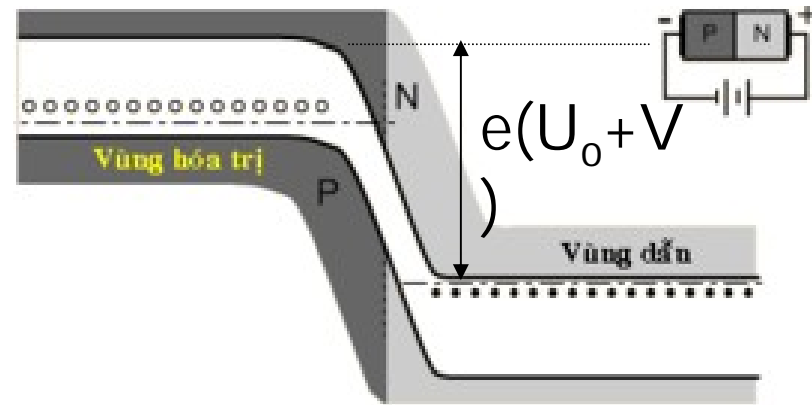
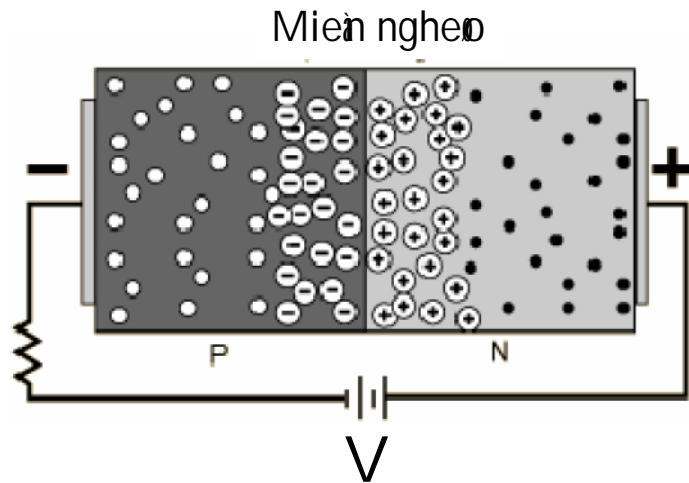
$$j_n = j_{ns} \exp \frac{eV}{kT} = e n_{oP} \frac{L_n}{\tau_n} \exp \frac{eV}{kT}$$

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

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

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

Chuyển tiếp P – N : phân cực ngược



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

Sơ tầng thế này không ảnh hưởng gì nên các dòng hạt tải nên không cô bản những làm giảm các dòng hạt tải nên cô bản :

$$j_n = j_{ns} \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right) = en_{op} \frac{L_n}{\tau_n} \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)$$

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

Dòng tổng cộng qua lớp chuyển tiếp

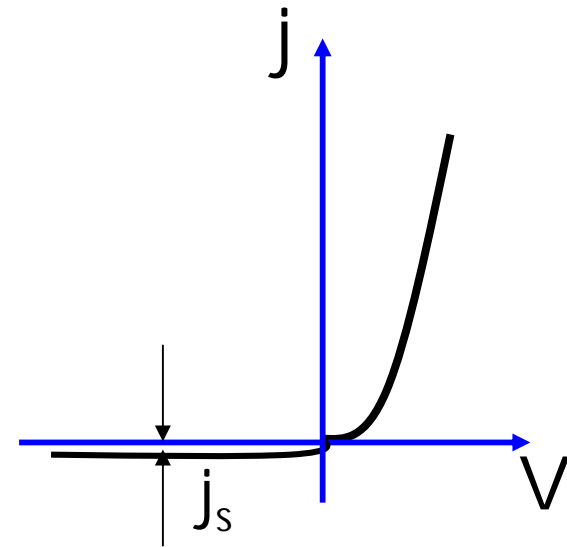
$$j = (j_n + j_p) - (j_{ns} + j_{ps})$$

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

Kết hợp các kết quả trên, có thể viết biểu thức của dòng mật độ trong Von - Ampe dưới dạng

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

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



với

$$j_s = (j_{ns} + j_{pn}) = e \left(n_{0P} \frac{L_n}{\tau_n} + p_{0N} \frac{L_p}{\tau_p} \right)$$

$$j_s = e \left(n_{0P} \frac{L_n}{\tau_n} + p_{0N} \frac{L_p}{\tau_p} \right) = e n_i^2 \left(\frac{L_n}{N_A \tau_n} + \frac{L_p}{N_D \tau_p} \right)$$

phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ.