



Chất bán dẫn

Bởi:

Khoa CNTT ĐHSP KT Hưng Yên

Tổng quan

Chất bán dẫn là vật chất có điện trở suất nằm ở giữa trị số điện trở suất của chất dẫn điện và chất điện môi khi ở nhiệt độ phòng: $\rho = 10^{-4} \div 10^7 \Omega.m$

Trong kỹ thuật điện tử chỉ sử dụng một số chất bán dẫn có cấu trúc đơn tinh thể, quan trọng nhất là hai nguyên tố Gecmani và Silic. Thông thường Gecmani và Silic được dùng làm chất chính, còn các chất như Bo, Indi (nhóm 3), photpho, Asen (nhóm 5) làm tạp chất cho các vật liệu bán dẫn chính. Đặc điểm của cấu trúc mạng tinh thể này là độ dẫn điện của nó rất nhỏ khi ở nhiệt độ thấp và nó sẽ tăng theo lũy thừa với sự tăng của nhiệt độ và tăng gấp bội khi có trộn thêm tạp chất.

Vật lý bán dẫn

Vật liệu bán dẫn

Chất bán dẫn mà ở mỗi nút của mạng tinh thể của nó chỉ có nguyên tử của một loại nguyên tố thì chất đó gọi là chất bán dẫn nguyên tính (hay chất bán dẫn thuần) và được ký hiệu bằng chỉ số i (Intrinsic).

- Hạt tải điện trong chất bán dẫn thuần:

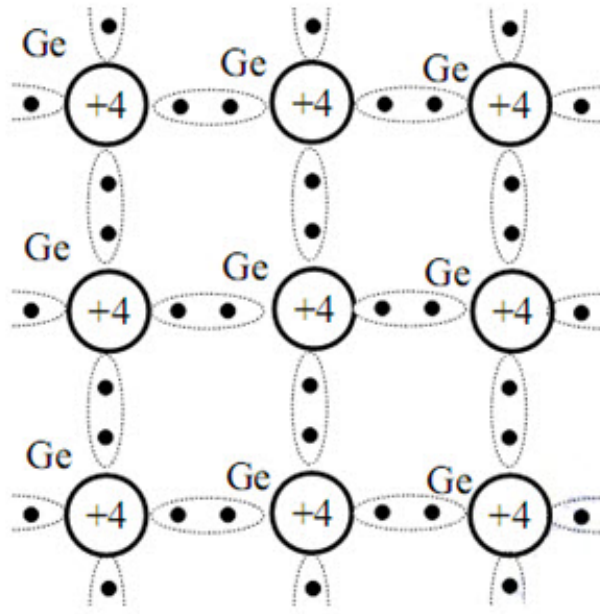
Hạt tải điện trong chất bán dẫn là các điện tử tự do trong vùng dẫn và các lỗ trống trong vùng hóa trị.

Xét cấu trúc của tinh thể Gecmani hoặc Silic biểu diễn trong không gian hai chiều như trong hình 3.1: Gecmani (Ge) và Silic (Si) đều có 4 điện tử hóa trị ở lớp ngoài cùng. Trong mạng tinh thể mỗi nguyên tử Ge (hoặc Si) sẽ góp 4 điện tử hóa trị của mình vào liên kết cộng hóa trị với 4 điện tử hóa trị của 4 nguyên tử kế cận để sao cho mỗi nguyên tử đều có hóa trị 4.

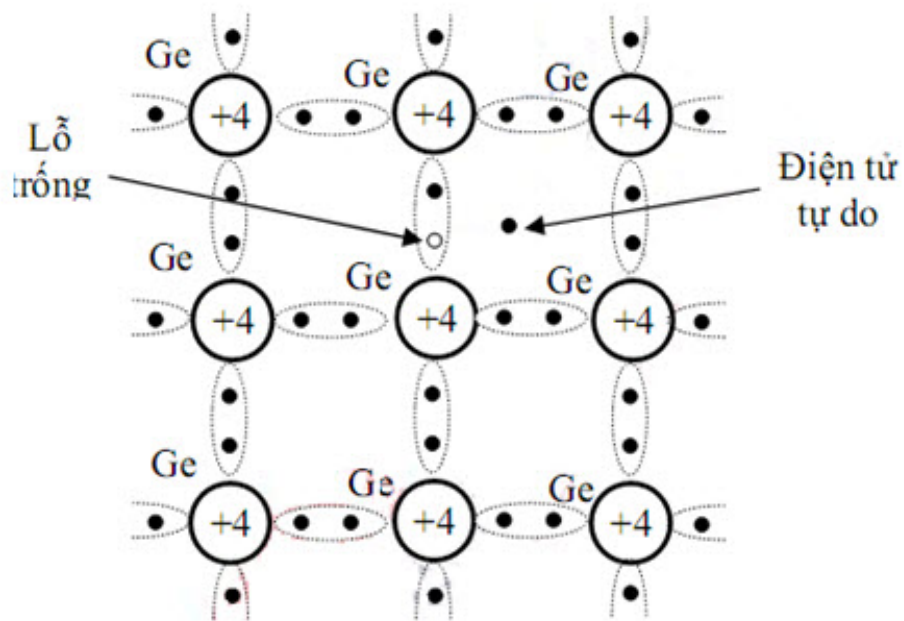
Hạt nhân bên trong của nguyên tử Ge (hoặc Si) mang điện tích +4. Như vậy các điện tử hóa trị ở trong liên kết cộng hóa trị sẽ có liên kết rất chặt chẽ với hạt nhân. Do vậy, mặc dù có sẵn 4 điện tử hóa trị nhưng tinh thể bán dẫn có độ dẫn điện thấp. Ở nhiệt độ 0^0K ,

Chất bán dẫn

cấu trúc lý tưởng như ở hình 3.2 là gần đúng và tinh thể bán dẫn như là một chất cách điện.



Cấu trúc tinh thể Ge biểu diễn trong không gian 2 chiều



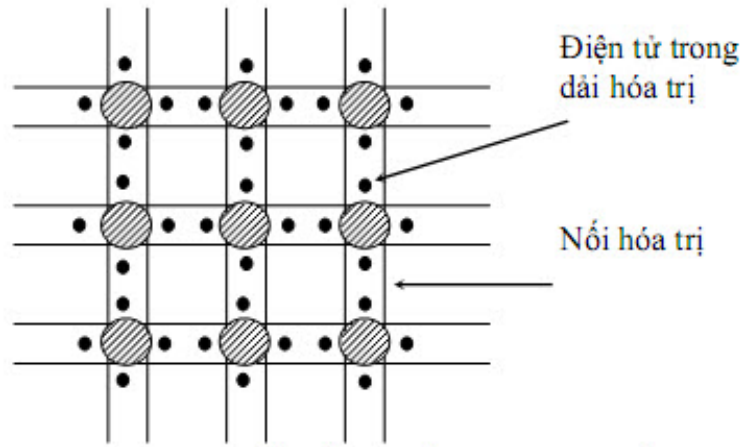
Tinh thể Ge với liên kết cộng hóa trị bị phá vỡ

Bản chất dẫn điện trong vật liệu bán dẫn thuần

Nếu ta tăng nhiệt độ tinh thể, nhiệt năng sẽ làm tăng năng lượng một số điện tử và làm gãy một số nối hóa trị. Các điện tử ở các nối bị gãy rời xa nhau và có thể di chuyển dễ

Chất bán dẫn

dạng trong mạng tinh thể dưới tác dụng của điện trường. Tại các nối hóa trị bị gãy ta có các lỗ trống (hole). Về phương diện năng lượng, ta có thể nói rằng nhiệt năng làm tăng năng lượng các điện tử trong dải hóa trị.



Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ thấp

Khi năng lượng này lớn hơn năng lượng của dải cấm (0,7eV đối với Ge và 1,12eV đối với Si), điện tử có thể vượt dải cấm vào dải dẫn điện và chừa lại những lỗ trống (trạng thái năng lượng trống) trong dải hóa trị. Ta nhận thấy số điện tử trong dải dẫn điện bằng số lỗ trống trong dải hóa trị.

Nếu ta gọi n là mật độ điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện và p là mật độ lỗ trống có năng lượng trong dải hóa trị. Ta có: $n=p=n_i$

Người ta chứng minh được rằng:

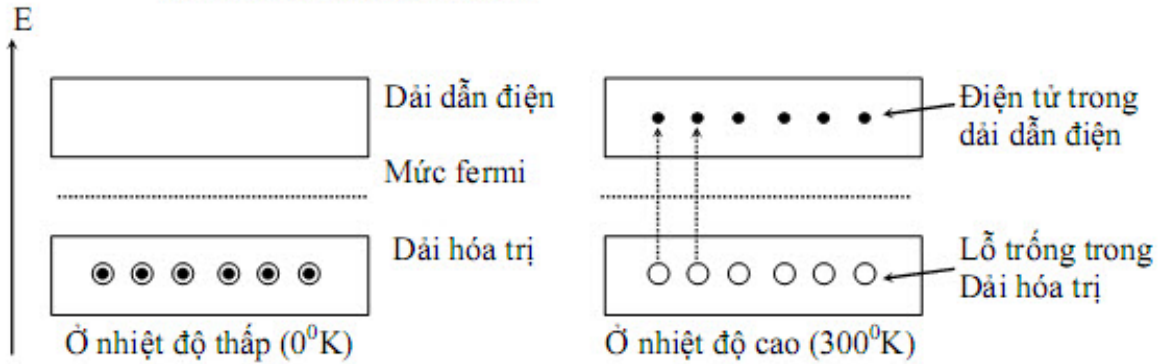
$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot \exp(-E_G/KT)$$

Trong đó: A_0 : Số Avogadro = $6,203 \cdot 10^{23}$

T : Nhiệt độ tuyệt đối (Độ Kelvin)

K : Hằng số Boltzman = $8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/}^{\circ}\text{K}$

E_G : Chiều cao của dải cấm.



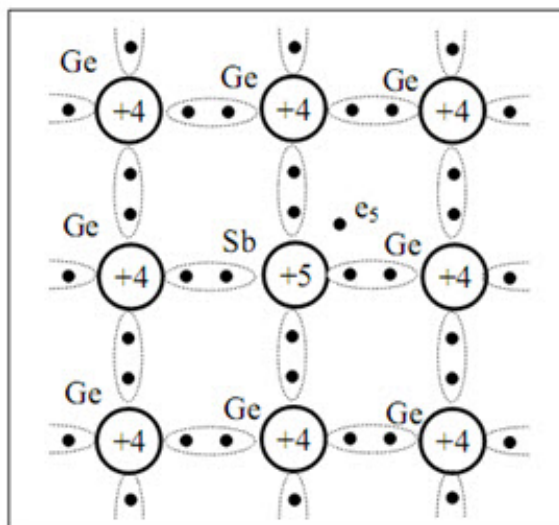
Giải dẫn điện tử tinh thể chất bán dẫn khi nhiệt độ thay đổi

Ta gọi chất bán dẫn có tính chất $n=p$ là chất bán dẫn nội bản hay chất bán dẫn thuần. Thông thường người ta gặp nhiều khó khăn để chế tạo chất bán dẫn loại này.

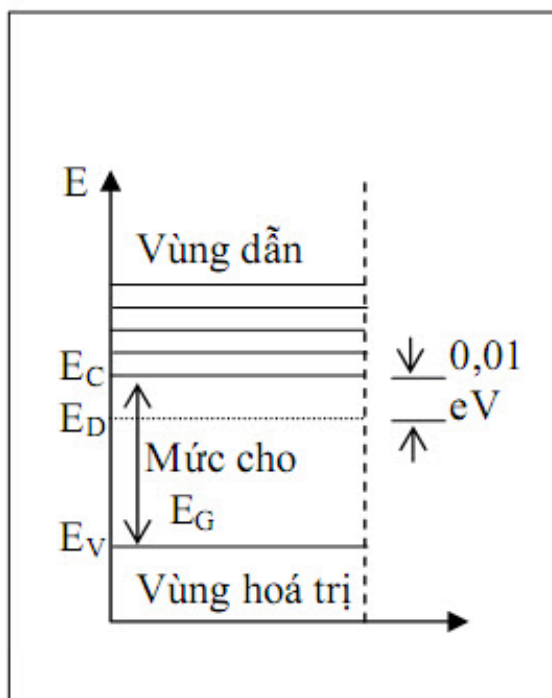
Bán dẫn pha tạp

Bán dẫn loại N

Ta thêm một ít tạp chất là nguyên tố thuộc nhóm 5 của bảng tuần hoàn Mendêlêép (thí dụ Antimon - Sb) vào chất bán dẫn Gecmani (Ge) hoặc Silic (Si) nguyên chất. Các nguyên tử tạp chất (Sb) sẽ thay thế một số các nguyên tử của Ge (hoặc Si) trong mạng tinh thể và nó sẽ đưa 4 điện tử trong 5 điện tử hóa trị của mình tham gia vào liên kết cộng hóa trị với 4 nguyên tử Ge (hoặc Si) ở bên cạnh, còn điện tử thứ 5 sẽ thừa ra nên liên kết của nó trong mạng tinh thể là rất yếu, xem hình 3.5. Muốn giải phóng điện tử thứ 5 này thành điện tử tự do ta chỉ cần cấp một năng lượng rất nhỏ khoảng 0,01eV cho gecmani hoặc 0,05eV cho silic. Các tạp chất hóa trị 5 được gọi là tạp chất cho điện tử (Donor) hay tạp chất N.



Mạng tinh thể Ge có thêm tạp chất Sb hóa trị 5 (mạng tinh thể của gecmani loại N)



Đồ thị vùng năng lượng của bán dẫn Ge loại N

Mức năng lượng mà điện tử thứ 5 chiếm đóng là mức năng lượng cho phép được hình thành ở khoảng cách rất nhỏ dưới dải dẫn và gọi là mức cho, xem hình 3.6. Và do đó, ở nhiệt độ trong phòng, hầu hết các điện tử thứ 5 của tạp chất cho sẽ nhảy lên dải dẫn, nhưng trong dải hóa trị không xuất hiện thêm lỗ trống. Các nguyên tử tạp chất cho điện tử trở thành các ion dương cố định.

Chất bán dẫn

Ở chất bán dẫn tạp loại N: nồng độ hạt dẫn điện tử (n_n) nhiều hơn nhiều nồng độ lỗ trống p_n và điện tử được gọi là hạt dẫn đa số, lỗ trống được gọi là hạt dẫn thiểu số.

$$n_n \gg p_n$$

trong đó: n_n - là nồng độ hạt dẫn điện tử trong bán dẫn tạp loại N

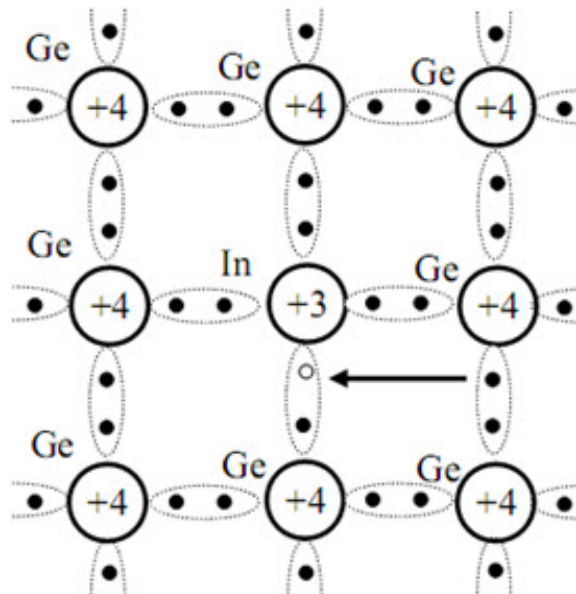
p_n - là nồng độ hạt dẫn lỗ trống trong bán dẫn tạp loại N

Bán dẫn loại P

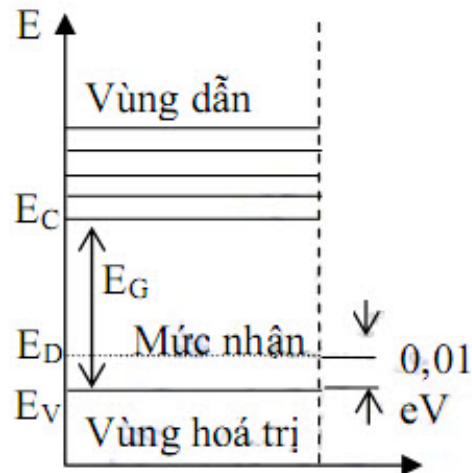
Khi ta đưa một ít tạp chất là nguyên tố thuộc nhóm 3 của bảng tuần hoàn Mendêlêép (thí dụ Indi - In) vào chất bán dẫn nguyên tính Gecmani (hoặc Silic). Nguyên tử tạp chất sẽ đưa 3 điện tử hóa trị của mình tạo liên kết cộng hóa trị với 3 nguyên tử Gecmani (hoặc Silic) bên cạnh còn mỗi liên kết thứ 4 để trống. Trạng thái này được mô tả ở hình 3.7. Điện tử của mỗi liên kết gần đó có thể nhảy sang để hoàn chỉnh mỗi liên kết thứ 4 còn để dờ. Nguyên tử tạp chất vừa nhận thêm điện tử sẽ trở thành ion âm và ngược lại ở nguyên tử chất chính vừa có 1 điện tử chuyển đi sẽ tạo ra một lỗ trống trong dải hóa trị của nó.

Các tạp chất có hóa trị 3 được gọi là tạp chất nhận điện tử (Acceptor) hay tạp chất loại P.

Mức năng lượng để trống của tạp chất trong chất bán dẫn chính sẽ tạo ra một mức năng lượng cho phép riêng nằm ở bên trên dải hóa trị gọi là mức nhận, (xem hình 3.8).



Mạng tinh thể gecmani với một nguyên tử In hóa trị 3



Mạng tinh thể gecmani với một nguyên tử In hóa trị 3

Nếu tăng nồng độ tạp chất nhận thì nồng độ của các lỗ trống tăng lên trong dải hóa trị, nhưng nồng độ điện tử tự do trong dải dẫn không tăng. Vậy chất bán dẫn loại này có lỗ trống là hạt dẫn đa số và điện tử là hạt dẫn thiểu số và nó được gọi là chất bán dẫn tạp loại P.

$$P_p \gg N_p$$

trong đó: P_p - nồng độ hạt dẫn lỗ trống trong bán dẫn P

N_p - nồng độ hạt dẫn điện tử trong bán dẫn P

Kết luận: Qua đây ta thấy, sự pha thêm tạp chất vào bán dẫn nguyên tính không những chỉ tăng độ dẫn điện, mà còn tạo ra một chất dẫn điện có bản chất dẫn điện khác hẳn nhau: trong bán dẫn tạp loại N điện tử là hạt dẫn điện chính, còn trong bán dẫn tạp loại P, lỗ trống lại là hạt dẫn điện chính.

Tiếp giáp P-N

Phương pháp tạo tiếp giáp P-N

Nếu trên một miếng bán dẫn đơn tinh thể (bán dẫn nguyên tính), bằng các phương pháp công nghệ, ta tạo ra hai vùng có bản chất dẫn điện khác nhau: một vùng là bán dẫn tạp loại P và một vùng kia là bán dẫn tạp loại N. Như vậy, tại ranh giới tiếp xúc giữa hai vùng bán dẫn P và N này sẽ xuất hiện một lớp có đặc tính vật lý khác hẳn với hai vùng bán dẫn P và N, được gọi là lớp tiếp xúc P-N. Trong lớp tiếp xúc P-N chỉ bao gồm hai khối điện tích trái dấu là các ion âm bên phía bán dẫn P và ion dương bên phía bán dẫn N. Đây là các ion cố định, không dẫn điện, do vậy, lớp tiếp xúc P-N còn gọi là vùng điện tích không gian hay vùng nghèo hạt dẫn.

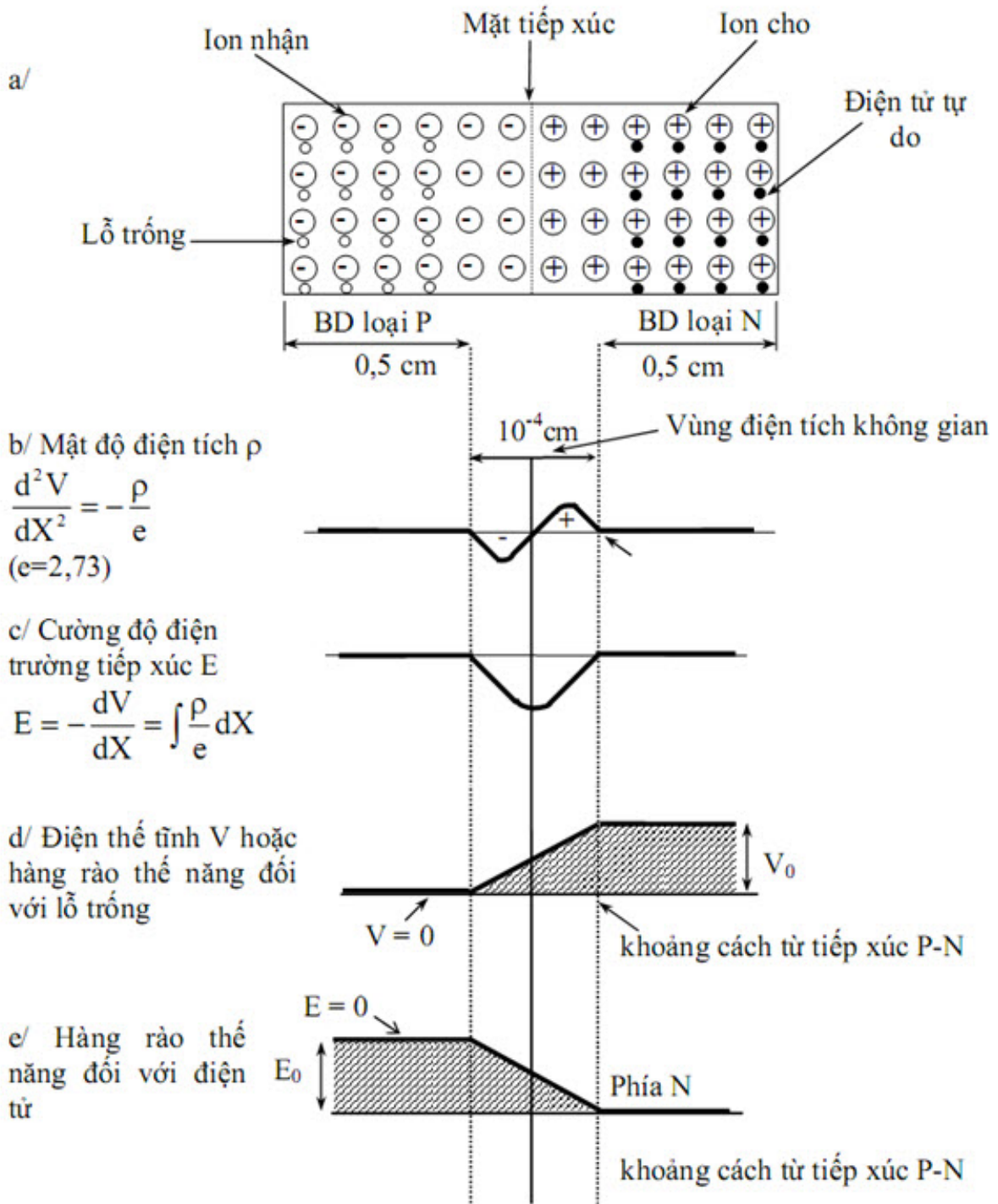
Chất bán dẫn

Độ dày của lớp này khoảng 10^{-4} cm = 10^{-6} m = micron.

Hình 3.9 mô tả các tính chất điện của tiếp xúc P-N. Trong lớp tiếp xúc tồn tại một điện trường tiếp xúc hay điện trường khuếch tán (Hình 3.9 c) có cường độ là E được tính là tích phân của mật độ điện tích ρ (trong hình 3.9 b). Điện trường tiếp xúc này có chiều tác dụng từ bán dẫn N sang bán dẫn P.

Sự thay đổi của điện thế tĩnh ở vùng điện tích không gian được chỉ ra ở hình (3.9 d). Đó chính là hàng rào thế năng ngăn cản sự khuếch tán tiếp theo của các lỗ trống qua lớp tiếp xúc.

Hình dạng hàng rào thế năng, hình (3.9 e), ngăn cản sự khuếch tán của các điện tử từ bán dẫn N qua lớp tiếp xúc.



Đồ thị của tiếp xúc P-N gồm: a- cấu trúc tiếp P-N; b- mật độ điện tích, c- cường độ điện trường, d, e- hàng rào thế năng ở tiếp xúc P-N

Tiếp giáp P-N không có điện áp ngoài

Điều kiện cân bằng động của lớp tiếp xúc P-N

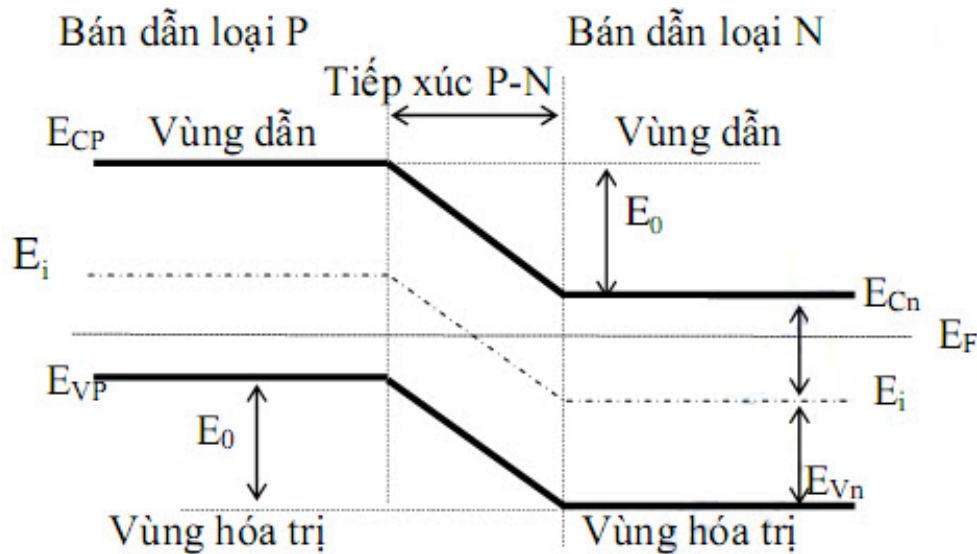
Chất bán dẫn

Khi dòng điện do các hạt dẫn chuyển động khuếch tán và các hạt dẫn chuyển động trôi qua tiếp xúc P-N có giá trị bằng nhau thì ta nói tiếp xúc P-N ở trạng thái cân bằng động. Do các dòng điện này ngược chiều nhau nên chúng triệt tiêu lẫn nhau và dòng điện tổng qua lớp tiếp xúc P-N bằng không. Lúc này lớp tiếp xúc có bề dày ký hiệu là d , điện trở lớp tiếp xúc ký hiệu là $R_{P/N}$, cường độ điện trường tiếp xúc ký hiệu là E_0 (hay còn gọi là hàng rào thế năng) và tương ứng với nó có hiệu điện thế tiếp xúc ký hiệu là V_0 . Các đại lượng này ta sẽ tính được qua các công thức dưới đây. Do lớp tiếp xúc P-N là vùng nghèo hạt dẫn nên điện trở của nó lớn hơn nhiều điện trở của hai vùng bán dẫn P và N ($R_{P/N} \gg R_N$ và R_P).

Điều kiện cân bằng này giúp ta tính được độ cao của hàng rào thế năng V_0 phụ thuộc vào nồng độ tạp chất cho và tạp chất nhận. Giá trị của V_0 khoảng từ vài phần mười vôn.

Theo hình 3.10 ta thấy mức năng lượng Fermi của cả hai phần bán dẫn P và N nằm trên một đường thẳng. Mức năng lượng E_0 - thế năng của điện tử hay hàng rào thế năng của điện tử ở tiếp xúc P-N khi nó ở trạng thái cân bằng là:

$$E_0 = E_{CP} - E_{Cn} = E_{Vp} - E_{Vn}$$



Đồ thị vùng năng lượng của tiếp xúc P-N khi hở mạch (trạng thái cân bằng)

$$E_0 = kT \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

Trong đó E_0 đo bằng [eV], và V_0 đo bằng [V].

Ngoài ra, hiệu điện thế tiếp xúc E còn được tính theo công thức sau:

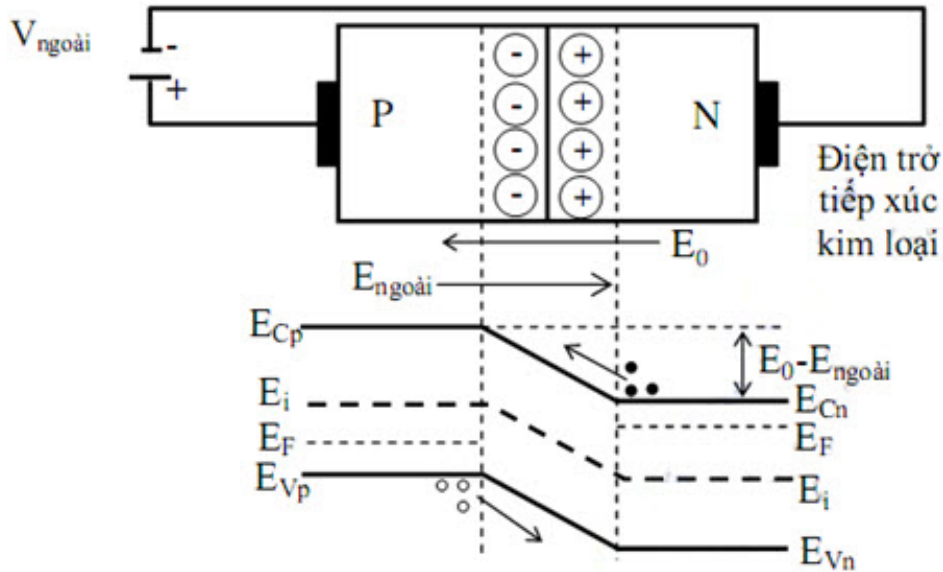
$$E_0 = kT \ln \frac{P_{P0}}{P_{N0}} = kT \ln \left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}} \right)$$

Chất bán dẫn

Chỉ số 0 trong công thức trên để biểu thị rằng các nồng độ hạt dẫn này được tính ở điều kiện cân bằng nhiệt động.

Tiếp giáp P-N phân cực thuận

Tiếp xúc P-N được phân cực thuận khi ta đặt một nguồn điện áp bên ngoài lên lớp tiếp xúc P-N có chiều cực dương được nối vào bán dẫn loại P và cực âm nối vào bán dẫn N.



Tiếp xúc P – N phân cực thuận và đồ thị dải năng lượng của nó

Điện trường trong lớp tiếp xúc giảm xuống, hàng rào thế năng giảm xuống một lượng bằng điện trường ngoài:

$$E_{T.X.} = E_0 - E_{ngoài}$$

Do đó phần lớn các hạt dẫn đa số dễ dàng khuếch tán qua tiếp xúc P-N, kết quả là dòng điện qua tiếp xúc P-N tăng lên. Dòng điện chạy qua tiếp xúc P-N khi nó phân cực thuận gọi là dòng điện thuận I_{th} .

Khi tăng điện áp thuận lên, tiếp xúc P-N được phân cực thuận càng mạnh, hiệu điện thế tiếp xúc càng giảm, hàng rào thế năng càng thấp xuống, đồng thời điện trở lớp tiếp xúc giảm, bề dày của lớp tiếp xúc cũng giảm, các hạt dẫn đa số khuếch tán qua tiếp xúc P-N càng nhiều nên dòng điện thuận càng tăng và nó tăng theo qui luật hàm số mũ với điện áp ngoài.

Khi điện áp thuận có giá trị xấp xỉ với V_0 , dòng điện chạy qua tiếp xúc P-N thực sẽ được khống chế bởi điện trở thuận của tiếp xúc kim loại và điện trở khối tinh thể. Do vậy đặc tuyến Vôn-Ampe gần giống một đường thẳng.

Tiếp giáp P-N phân cực ngược

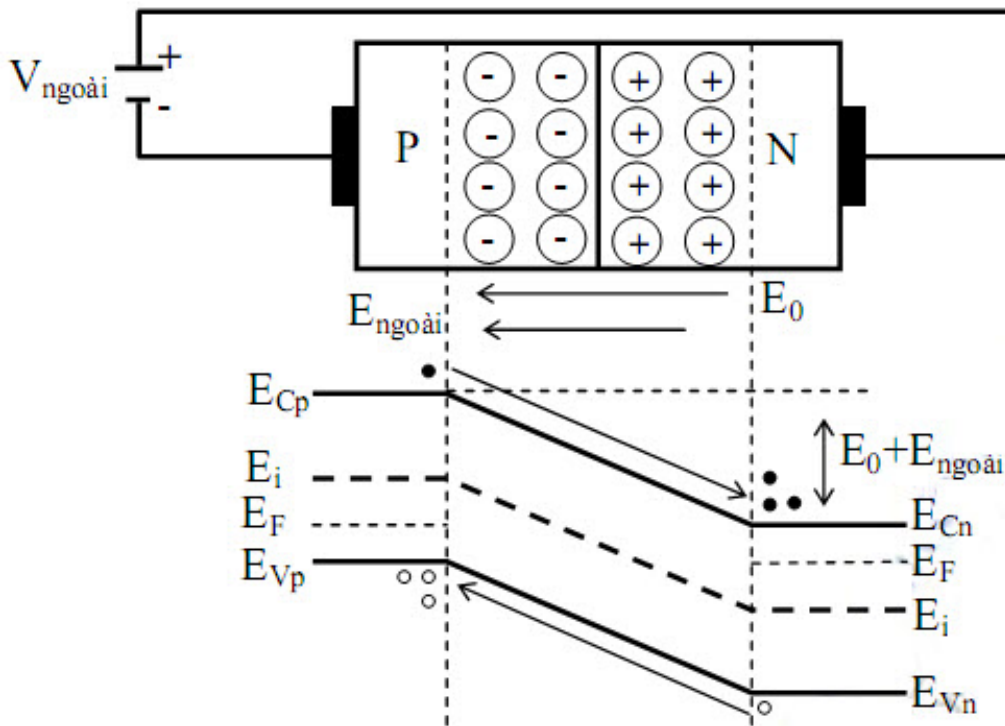
Lớp tiếp xúc P-N được phân cực ngược khi ta đặt một nguồn điện áp ngoài sao cho cực dương của nó nối với phần bán dẫn N, còn cực âm nối với phần bán dẫn P. Khi đó điện áp ngoài sẽ tạo ra một điện trường cùng chiều với điện trường tiếp xúc E_0 , làm cho điện trường trong lớp tiếp xúc tăng lên:

$$E_{T.X.} = E_0 + E_{ngoài}$$

Tức là hàng rào thế năng càng cao hơn. Các hạt dẫn đa số khó khuếch tán qua vùng điện tích không gian, làm cho dòng điện khuếch tán qua tiếp xúc P-N giảm xuống so với trạng thái cân bằng.

Đồng thời, do điện trường của lớp tiếp xúc tăng lên sẽ thúc đẩy quá trình chuyển động trôi của các hạt dẫn thiểu số và tạo nên dòng điện trôi có chiều từ bán dẫn N sang bán dẫn P và được gọi là dòng điện ngược $I_{ngược}$.

Nếu ta tăng điện áp ngược lên, hiệu điện thế tiếp xúc càng tăng lên làm cho dòng điện ngược tăng lên. Nhưng do nồng độ các hạt dẫn thiểu số có rất ít nên dòng điện ngược nhanh chóng đạt giá trị bão hòa và được gọi là dòng điện ngược bão hòa I_0 có giá trị rất nhỏ khoảng từ vài nA đến vài chục μA .



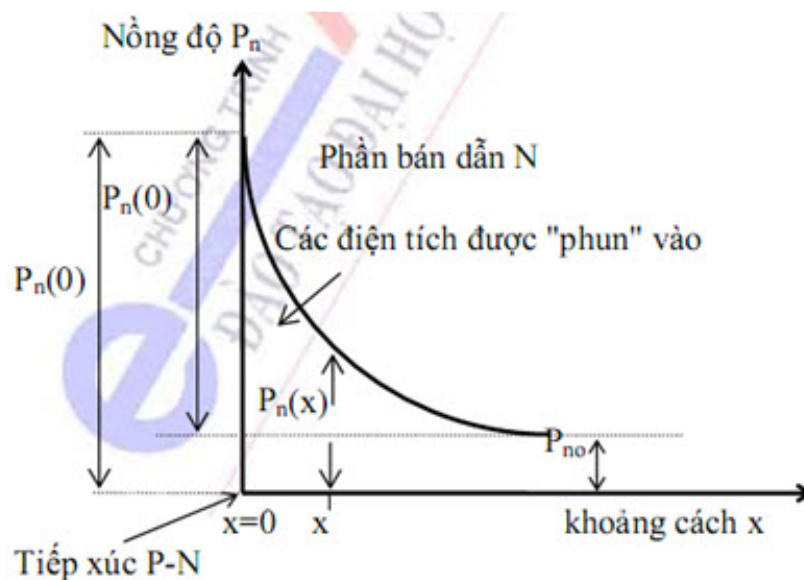
Tiếp xúc P – N phân cực ngược và đồ thị dải năng lượng của nó

Chất bán dẫn

Dòng điện qua tiếp xúc P-N:

Dòng điện thuận:

Khi tiếp xúc P-N phân cực thuận, qua nó có dòng điện thuận. Đó là dòng điện do các hạt dẫn đa số khuếch tán qua tiếp xúc P-N. Ta có:



Nồng độ lỗ trống trong bán dẫn N khi tiếp xúc P-N phân cực thuận ($P_n(0) \gg P_{no}$)

+ Dòng điện lỗ trống $I(0)$ đi qua tiếp xúc P-N về phía bán dẫn N là (khi $x = 0$).

$$I_{Pn}(0) = S \cdot q \cdot D_p \cdot P_{n0} (e^{V/V_T} - 1)$$

Trong đó: $I_{Pn}(0)$ - là dòng điện do các lỗ trống khuếch tán qua tiếp xúc P-N.

S - là diện tích mặt tiếp xúc.

q - điện tích của điện tử.

D_p - Hệ số khuếch tán của lỗ trống.

L_p - Độ dài khuếch tán của lỗ trống.

P_{no} - Nồng độ hạt dẫn lỗ trống bên bán dẫn N.

V - Điện áp phân cực thuận.

V_T - Điện thế nhiệt :

Chất bán dẫn

$$(V_T = KT/q = T/11600)$$

e - số tự nhiên (= 2,73)

Ở đó $P_{n0}(e^{V/V_T} - 1) = P_{n0}$ gọi là mật độ lỗ trống "phun" vào phía bán dẫn N.

+ Dòng điện điện tử $I_{np}(0)$ khuếch tán qua tiếp xúc P-N vào phía bán dẫn P là:

$$I_{np}(0) = S \cdot q \cdot D_p P_{n0} (e^{V/V_T} - 1) / L_n$$

Dòng điện qua tiếp xúc P-N là tổng của 2 thành phần dòng điện $I_{Pn}(0)$ và $I_{np}(0)$, vậy ta có:

$$I = I_{Pn}(0) + I_{np}(0) = I_0 (e^{V/V_T} - 1) /$$

Trong đó I_0 gọi là dòng điện ngược bão hòa và có biểu thức:

$$I_0 = S \cdot q \cdot D_p P_{n0} / L_p + S \cdot q \cdot D_p P_{p0} / L_n$$

b. Dòng điện ngược bão hòa:

Thay các giá trị $P_{n0} = P_n$ và $n_{p0} = n_p$ ta có công thức tính dòng điện I_0 :

$$I_0 = S \cdot q \cdot (D_p / L_p N_D + D_n / L_n N_A) \cdot n_i^2$$

Trong đó:

$$n_i^2 = A_0 T^3 e^{E_{G0}/KT} = A_0 T^3 e^{-V_{G0}/VT}$$

Ở đây có V_{G0} là điện áp có cùng đại lượng với E_{G0} (năng lượng vùng cấm ở 0^0K). Do đó sự phụ thuộc vào nhiệt độ của dòng I_0 là:

$$I_0 = K_1 T^2 e^{-V_{G0}/VT}$$

trong đó K là hệ số phụ thuộc vào nhiệt độ, và dòng điện tổng được tính gần đúng là:

$$I = I_0 (e^{V/V_T} - 1)$$