

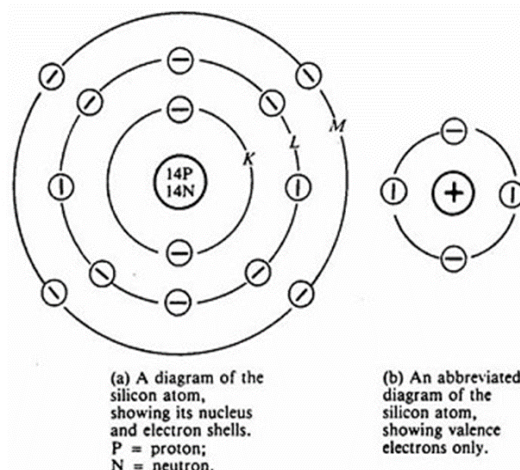
Lý thuyết bán dẫn

Nội dung

1. Cấu trúc nguyên tử
2. Vật liệu bán dẫn
3. Các dòng điện trong bán dẫn
4. Bán dẫn loại N và bán dẫn loại P

1. Cấu trúc nguyên tử

- Mỗi nguyên tử bao gồm: hạt nhân ở trung tâm chứa các điện tích dương (proton), được bao quanh bởi các electron.
- Số electron bằng số proton trong hạt nhân và điện tích của proton và electron là bằng nhau nên nguyên tử trung hòa về điện.

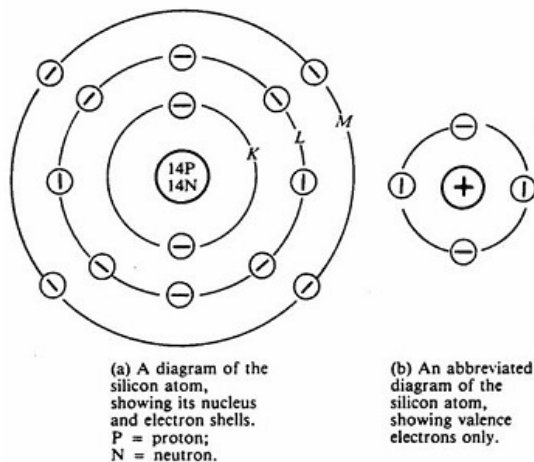


Các electron được sắp xếp vào ba quỹ đạo xung quanh hạt nhân.

Số electron tối đa N_e mà lớp vỏ n có thể chứa là:

$$N_e = 2n^2$$

- ❑ Mỗi lớp vỏ nguyên tử được chia thành các lớp con. Lớp vỏ thứ n chứa n lớp con.
- ❑ Lớp con đầu tiên chứa 2 electron, các lớp con tiếp theo chứa nhiều hơn lớp con trước đó 4 electron.
- ❑ Các lớp con: s, p, d, f.



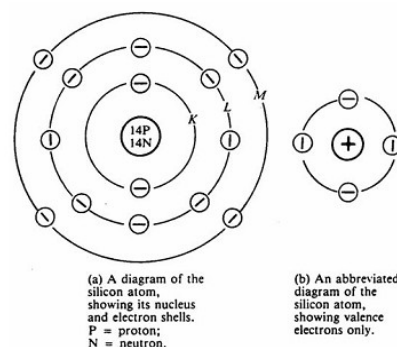
VD: Hạt nhân của nguyên tử Ge (germanium) có 32 proton. Xác định số electron trong mỗi lớp và lớp con của nó.

Lớp vỏ	Lớp con	Dung lượng	Chứa thật sự
K	s	2	2
L	s	2	2
	p	6	6
M	s	2	2
	p	6	6
	d	10	10
N	s	2	2
	p	6	2
	d	10	0
	f	14	0
Tổng cộng			32

Khi hấp thu đủ năng lượng, các electron sẽ thoát ra khỏi nguyên tử và trở thành các electron tự do.

Chất dẫn điện có nhiều electron tự do trong khi chất cách điện có rất ít electron tự do.

- Số electron lớp vỏ ngoài cùng có ảnh hưởng rất lớn đến tính chất điện của vật liệu.
- Vật liệu dẫn điện có rất ít electron trong lớp vỏ ngoài cùng, và chỉ cần một năng lượng nhỏ là có thể giải phóng chúng trở thành các electron tự do.
- Đối với vật liệu cách điện, lớp vỏ ngoài cùng thường liên kết chặt với hạt nhân, do đó chúng có rất ít electron tự do.

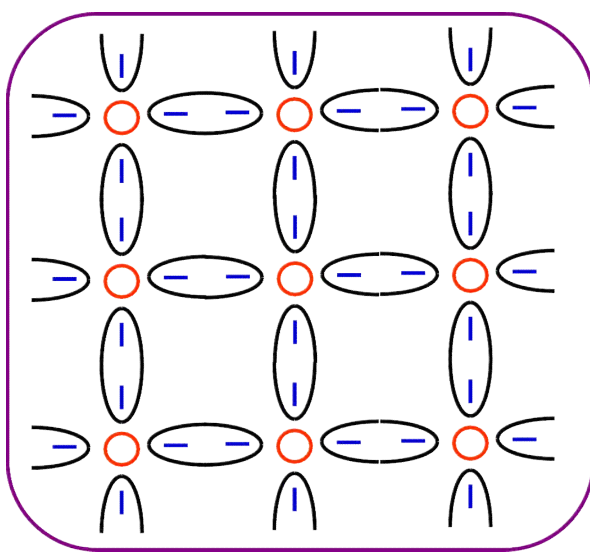


2. Vật liệu bán dẫn

- Vật liệu bán dẫn không phải là vật liệu cách điện mà cũng không phải là vật liệu dẫn điện tốt.
- Vật liệu **dẫn điện**, lớp vỏ ngoài cùng của nguyên tử có rất ít các electron, nó có khuynh hướng giải phóng các electron này để tạo thành electron tự do và đạt đến trạng thái bền vững.
- Vật liệu **cách điện** lại có khuynh hướng giữ lại các electron lớp ngoài cùng của nó để có trạng thái bền vững.
- Vật liệu **bán dẫn**, nó có khuynh hướng đạt đến trạng thái bền vững **tạm thời** bằng cách lấp đầy lớp con của lớp vỏ ngoài cùng.
- Nguyên tử bán dẫn thực hiện điều này bằng cách chia sẻ bốn electron lớp vỏ ngoài cùng của nó với bốn electron của bốn nguyên tử lân cận.
- Các chất bán dẫn điển hình như Germanium (Ge), Silicium (Si),... Là những nguyên tố thuộc nhóm 4 nằm trong bảng hệ thống tuần hoàn.

Ví dụ về nguyên tử bán dẫn Silicon (Si)

Nguyên tử bán dẫn Si, có 4 electron ở lớp ngoài cùng.



○ Hạt nhân

⌋ một nửa liên kết hóa trị

— — liên kết hóa trị

Liên kết do 2 e lớp vỏ ngoài cùng của 2 nguyên tử lân cận tạo thành gọi là liên kết hóa trị (covalent bond)

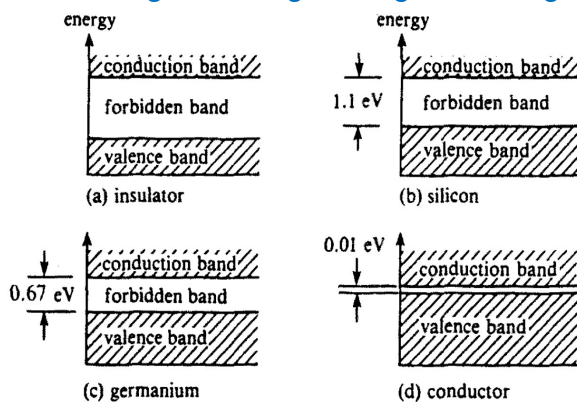
3. Dòng điện trong bán dẫn

- Vật liệu dẫn điện có rất nhiều electron tự do.
- Khi ở điều kiện môi trường, nếu **được hấp thu một năng lượng** nhiệt các **electron này sẽ được giải phóng** khỏi nguyên tử.
- Các electron chuyển động có hướng sẽ sinh ra dòng điện.
- Với vật liệu bán dẫn, các electron tự do cũng được sinh ra một cách tương tự.
- Tuy nhiên, năng lượng cần để giải phóng các electron này lớn hơn đối với vật liệu dẫn điện vì chúng bị ràng buộc bởi các liên kết hóa trị.
- Năng lượng này phải đủ lớn để phá vỡ liên kết hóa trị giữa các nguyên tử.
- Thuyết lượng tử cho phép ta nhìn mô hình nguyên tử dựa trên năng lượng của nó, thường được biểu diễn dưới dạng giản đồ năng lượng.

Giản đồ năng lượng

-Với một nguyên tử, các electron sẽ được sắp xếp vào các mức năng lượng rời rạc nhau tùy thuộc vào lớp và lớp con mà electron này chiếm. Các mức năng lượng này giống nhau cho mọi nguyên tử.

-Với toàn bộ vật liệu, mỗi nguyên tử còn chịu ảnh hưởng từ các tác động khác nhau bên ngoài. Do đó, mức năng lượng của các electron trong cùng lớp và lớp con có thể không còn bằng nhau giữa các nguyên tử.



Giản đồ vùng năng lượng của một số vật liệu

Vùng dẫn là vùng năng lượng của các electron tự do.

Vùng hóa trị là vùng của các electron nằm trong lớp vỏ ngoài cùng, chúng mang năng lượng thấp hơn so với vùng dẫn.

Nhận xét

- Số electron tự do trong vật liệu phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ và do đó độ dẫn điện của vật liệu cũng vậy.
- Nhiệt độ càng cao thì năng lượng của các electron càng lớn.
- Vật liệu bán dẫn có hệ số nhiệt điện trở âm.
- Vật liệu dẫn điện có hệ số nhiệt điện trở dương.

3.1 Lỗ trống và dòng lỗ trống

- Vật liệu bán dẫn tồn tại một dạng **hạt dẫn khác** ngoài electron tự do.
- Một electron tự do xuất hiện thì đồng thời nó cũng sinh ra một lỗ trống (hole).
- Lỗ trống được qui ước là **hạt dẫn mang điện tích dương**.
- Dòng di chuyển có hướng của lỗ trống được gọi là dòng lỗ trống trong bán dẫn.
- Khi lỗ trống di chuyển từ phải sang trái cũng đồng nghĩa với việc các electron lớp vỏ ngoài cùng di chuyển từ trái sang phải.

- ❑ Có thể phân tích dòng điện trong bán dẫn thành hai dòng electron.
- ❑ Để tiện lợi ta thường xem như dòng điện trong bán dẫn là do dòng electron và dòng lỗ trống gây ra.
- ❑ Ta thường gọi electron tự do và lỗ trống là hạt dẫn vì chúng có khả năng chuyển động có hướng để sinh ra dòng điện.
- ❑ Khi một electron tự do và lỗ trống kết hợp lại với nhau trong vùng hóa trị, các hạt dẫn bị mất đi, và ta gọi quá trình này là quá trình tái hợp hạt dẫn.
- ❑ Việc phá vỡ một liên kết hóa trị sẽ tạo ra một electron tự do và một lỗ trống, do đó số lượng lỗ trống sẽ luôn bằng số lượng electron tự do. Bán dẫn này được gọi là **bán dẫn thuần (intrinsic)**.
 - Ta có: $n_i = p_i$
 - n_i : mật độ electron (electron/cm³)
 - p_i : mật độ lỗ trống (lỗ trống/cm³)

3.2 Dòng trôi

- Khi một hiệu điện thế được đặt lên hai đầu bán dẫn, điện trường sẽ làm cho các electron tự do di chuyển ngược chiều điện trường và các lỗ trống di chuyển cùng chiều điện trường.
- Cả hai sự di chuyển này gây ra trong bán dẫn một dòng điện có chiều cùng chiều điện trường được gọi là **dòng trôi** (drift current).
- **Dòng trôi** phụ thuộc nhiều vào khả năng di chuyển của hạt dẫn trong bán dẫn, khả năng di chuyển được đánh giá bằng **độ linh động** của hạt dẫn. Độ linh động này phụ thuộc vào loại hạt dẫn cũng như loại vật liệu.

Silicon	Germanium
$\mu_n = 0.14 \text{ m}^2/(\text{Vs})$	$\mu_n = 0.38 \text{ m}^2/(\text{Vs})$
$\mu_p = 0.05 \text{ m}^2/(\text{Vs})$	$\mu_p = 0.18 \text{ m}^2/(\text{Vs})$

3.2 Dòng trôi

- Vận tốc của hạt dẫn trong điện trường E:

$$v_n = E \cdot \mu_n \quad v_p = E \cdot \mu_p$$

- Mật độ dòng điện J:

$$J = J_n + J_p = nq_n \mu_n E + pq_p \mu_p E = nq_n v_n + pq_p v_p$$

J mật độ dòng điện, (A/m²),

E cường độ điện trường (V/m)

n, p mật độ electron tự do và lỗ trống, (hạt dẫn/m³)

$q_n, q_p =$ đơn vị điện tích electron $= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

$\mu_n, \mu_p =$ độ linh động của electron tự do và lỗ trống (m²/Vs)

$v_n, v_p =$ vận tốc electron tự do và lỗ trống, (m/s)

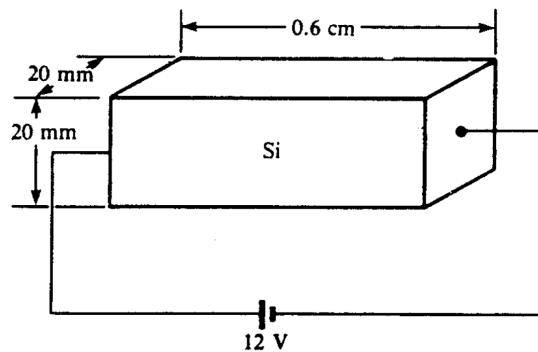
Ví dụ 1-1

Một hiệu điện thế được đặt lên hai đầu của một thanh bán dẫn thuần trong hình vẽ. Giả sử: $n_i = 1.5 \times 10^{10}$ là electron/cm³

$$\mu_n = 0.14 \text{ m}^2/(\text{Vs}) ; \quad \mu_p = 0.05 \text{ m}^2/(\text{Vs})$$

Tìm:

1. Vận tốc electron tự do và lỗ trống;
2. Mật độ dòng electron tự do và lỗ trống;
3. Mật độ dòng tổng cộng;
4. Dòng tổng cộng trong thanh bán dẫn.



1. Ta có:

$$E = U/d = 2.10^3 \text{ V/m}$$

$$v_n = E.\mu_n = 2.8 \times 10^2 \text{ m/s}$$

$$v_p = E.\mu_p = 10^2 \text{ m/s}$$

2. Vì vật liệu là thuần nên:

$$p_i = n_i = 1.5 \times 10^{10} (\text{ / cm}^3) = 1.5 \times 10^{16} (\text{ / m}^3)$$

$$J_n = n_i.q_n.v_n = 0.672 \text{ A / m}^2$$

$$J_p = n_i.q_p.v_p = 0.24 \text{ A / m}^2$$

3. $J = J_n + J_p = 0.672 + 0.24 = 0.912 \text{ A/m}^2$

4. Tiết diện ngang của thanh là : $(20 \times 10^{-3} \text{ m})(20 \times 10^{-3} \text{ m}) = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Dòng điện:

$$I = J.S = (0.912 \text{ A/m}^2).(4 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 0.365 \text{ mA}$$

Một số lưu ý

- Điện trở có thể được tính bằng cách dùng công thức:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

- Điện dẫn, đơn vị siemens (S), được định nghĩa là nghịch đảo của điện trở, và điện dẫn suất, đơn vị S/m, là nghịch đảo của điện trở suất:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

- Điện dẫn suất của vật liệu bán dẫn có thể được tính theo công thức:

$$\sigma = nq_n\mu_n + pq_p\mu_p = \frac{J}{E}$$

Ví dụ

1. Tính điện dẫn suất và điện trở suất của thanh bán dẫn trong ví dụ 1-1.
2. Dùng kết quả của câu 1 để tìm dòng trong thanh bán dẫn khi điện áp trên hai đầu của thanh là 12V .

Hướng dẫn

1. Vì bán dẫn thuần nên:

$$n = p = n_i = p_i = 1.5 \times 10^6 / \text{m}^3, q_n = q_p = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\sigma = n q_n \mu_n + p q_p \mu_p$$

$$\sigma = 4.56 \times 10^{-4} \text{ S/m}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 2192.98 \text{ } \Omega\text{m}$$

- 2.

$$R = \rho \frac{l}{S} = 32.98 \text{ K}\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = 0.365 \text{ mA}$$

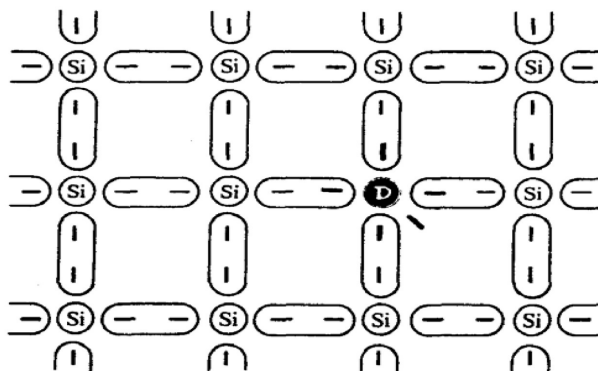
3.3 Dòng khuếch tán

- Nếu như trong bán dẫn có sự chênh lệch mật độ hạt dẫn thì các hạt dẫn sẽ có khuynh hướng di chuyển từ nơi có mật độ hạt dẫn cao đến nơi có mật độ hạt dẫn thấp hơn nhằm cân bằng mật độ hạt dẫn.
- Quá trình di chuyển này sinh ra một dòng điện bên trong bán dẫn. Dòng điện này được gọi là **dòng khuếch tán (diffusion current)**.
- Dòng khuếch tán có tính chất quá độ (thời gian tồn tại ngắn) trừ khi sự chênh lệch mật độ được duy trì trong bán dẫn.

4. Bán dẫn loại P và bán dẫn loại N

- Trong bán dẫn thuần (intrinsic semiconductor) có mật độ electron tự do bằng với mật độ lỗ trống.
- Trong thực tế, người ta sẽ tạo ra vật liệu bán dẫn trong đó mật độ electron lớn hơn mật độ lỗ trống hoặc vật liệu bán dẫn có mật độ lỗ trống lớn hơn mật độ electron tự do.
- Các vật liệu bán dẫn này được gọi là bán dẫn có pha tạp chất.
- Bán dẫn mà electron tự do chi phối được gọi là bán dẫn loại N, còn bán dẫn trong đó lỗ trống chi phối chủ yếu gọi là bán dẫn loại P.

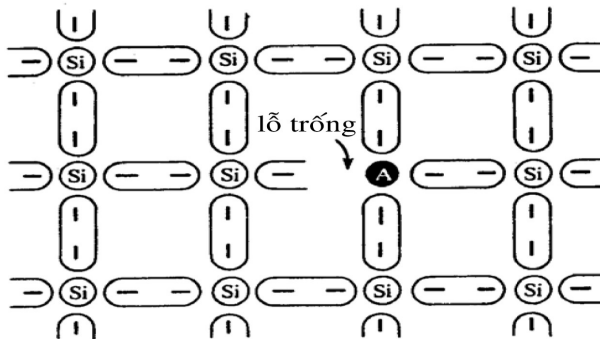
Cách thức tạo ra bán dẫn loại N



Cấu trúc tinh thể bán dẫn chứa một nguyên tử donor. Hạt nhân của donor ký hiệu là D.

- Nguyên tử tạp chất lúc này được gọi là nguyên tử tạp chất cho (donor) -> ion dương.
- Các vật liệu được sử dụng như tạp chất cho donor thông thường là antimony, arsenic, phosphor.
- Các electron của tạp chất này đã có thể trở thành electron tự do trong vùng dẫn và nguyên tử tạp chất trở thành một ion dương.

Cách thức tạo ra bán dẫn loại P



Cấu trúc tinh thể bán dẫn có chứa một nguyên tử acceptor.

Nguyên tử acceptor được ký hiệu là A.

- Nguyên tử tạp chất được gọi là tạp chất nhận (acceptor) -> ion âm.
- Vật liệu thường được dùng làm tạp chất trong trường hợp này là aluminum, boron, gallium, indium.

Nhận xét

- Trong vật liệu bán dẫn loại N, mặc dù số lượng electron tự do nhiều hơn hẳn so với lỗ trống nhưng lỗ trống vẫn tồn tại trong bán dẫn.
- Lượng tạp chất donor càng lớn, mật độ electron tự do càng cao và càng chiếm ưu thế so với lượng lỗ trống.
- Do đó, trong bán dẫn loại N, electron tự do được gọi là hạt dẫn đa số, lỗ trống được gọi là hạt dẫn thiểu số.
- Mối quan hệ quan trọng giữa mật độ electron và mật độ lỗ trống trong hầu hết các bán dẫn trong thực tế là:

$$np = n_i^2$$

Với: n: mật độ electron
 p: mật độ lỗ trống
 n_i : mật độ electron trong bán dẫn thuần.

Một thanh silicon có mật độ electron trong bán dẫn thuần là 1.4×10^{16} electron/m³ bị kích thích bởi các nguyên tử tạp chất cho đến khi mật độ lỗ trống là 8.5×10^{21} lỗ trống/m³. Độ linh động của electron và lỗ trống là $\mu_n = 0.14 \text{ m}^2/(\text{Vs})$ và $\mu_p = 0.05 \text{ m}^2/(\text{Vs})$.

1. Tìm mật độ electron trong bán dẫn đã pha tạp chất.
2. Bán dẫn là loại N hay loại P?
3. Tìm độ dẫn điện của bán dẫn pha tạp chất.

Hướng dẫn

1.
$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(1.4 \times 10^{16})^2}{8.5 \times 10^{21}} = 2.3 \times 10^{10} \text{ electron/m}^3$$
2. Vì $p > n$ nên vật liệu là loại P.
3.
$$\begin{aligned} \sigma &= n\mu_n q_n + p\mu_p q_p \\ &= (2.3 \times 10^{10})(0.14)(1.6 \times 10^{-19}) + (8.5 \times 10^{21})(0.05)(1.6 \times 10^{-19}) \\ &= 5.152 \times 10^{-10} + 68 \approx 68 \text{ S/m} \end{aligned}$$