

## CHƯƠNG IV: ĐIỆN TỬ TRONG VẬT RẮN

### IV.1. Các tính chất của chất rắn

Chúng ta đây thấy lí thuyết lượng tử rất thành công khi áp dụng nó cho các nguyên tử riêng biệt. Trong chương này chúng ta hi vọng - chỉ bằng một ví dụ có quy mô rộng lớn - sẽ chứng tỏ được lí thuyết đây sức mạnh đó cũng sẽ thành công khi áp dụng nó cho những khối kết tập các nguyên tử dưới dạng các chất rắn.

Mỗi chất rắn đều có một số rất lớn các tính chất mà chúng ta có thể lựa chọn để xem xét. Nó có trong suốt không? Nó có thể được dát thành một tấm phẳng không? Loại sóng nào có thể truyền qua nó và với vận tốc bằng bao nhiêu? Nó có những tính chất từ đặc biệt đáng quan tâm không? Nó có là một vật dẫn nhiệt tốt không? Cấu trúc tinh thể của nó ra sao? Nó có những tính chất bề mặt đặc biệt không?... ..Bảng liệt kê đó còn có thể kéo rất dài. Chúng ta chỉ chọn tập trung ở đây vào một câu hỏi duy nhất: "Một chất rắn là dẫn điện hay không dẫn điện là do cơ chế nào?" Và như chúng ta sẽ thấy, các quy luật chi phối sự dẫn điện cũng lại là các quy luật lượng tử.

#### Tính dẫn điện.

Khi nghiên cứu tính dẫn điện, chúng ta sẽ chỉ chọn để xem xét các chất rắn có các nguyên tử được sắp xếp để tạo nên một mạng tuần hoàn ba chiều. Hình 4.1 cho thấy những cấu trúc mạng như vậy đối với cacbon (dưới dạng kim cương) đối với đồng và silic. Chúng ta sẽ không xét tới các chất dẻo, thủy tinh hoặc cao su là các vật liệu không có cấu trúc mạng như vậy.

Phép đo điện cơ bản mà chúng ta có thể làm với một mẫu là *\*điện trở suất*  $\rho$  của nó ở nhiệt độ phòng. Bằng cách đo  $\rho$  ở các nhiệt độ khác nhau, chúng ta cũng nhận được cả giá trị của *\*hệ số nhiệt điện trở*  $\alpha$ . Cuối cùng bằng cách thực hiện các phép đo hiệu ứng Hall, chúng ta có thể tìm được giá trị của *\*n*, là *số các hạt tải điện trong một đơn vị thể tích* của vật liệu đang xét.

Chỉ cần đo riêng điện trở suất ở nhiệt độ phòng chúng ta cũng nhanh chóng phát hiện ra rằng có một số vật liệu - mà ta sẽ gọi là *chất cách điện* - hoàn toàn không dẫn điện trong tất cả những công việc thực tiễn. Ví dụ, kim cương có điện trở suất cỡ  $10^{16} \Omega \cdot m$ . lớn gấp  $10^{24}$  lần điện trở suất của đồng.

*\*Chúng ta có thể dùng các giá trị đo được của chúng ta đối với  $\rho$ ,  $\alpha$  và  $n$  để chia phần lớn các chất không cách điện thành hai loại: kim loại (như đồng) và chất bán dẫn (như silic). Như chúng ta thấy từ Bảng 4-1, so với chất dẫn điện điển hình (đồng) thì chất bán dẫn điển hình (silic) có (1) ít phần tử tải điện hơn nhiều; (2) điện trở suất lớn*

**Hình 4.1.** a) Cấu trúc tinh thể cho carbon (dưới dạng kim cương) và của silic là hoàn toàn giống hệt nhau. Trong cấu trúc này, như các quả cầu được bôi sẫm cho thấy, mỗi nguyên tử được liên kết với 4 nguyên tử lân cận nó. Cấu trúc carbon dưới dạng graphit có hơi khác. b) Cấu trúc tinh thể đối với đồng, một cách sắp xếp được gọi là *lập phương tâm mặt*.

một cách đáng kể; (3) hệ số nhiệt điện trở vừa lớn vừa âm. Điều này có nghĩa là, trong khi điện trở suất của kim loại *tăng* theo nhiệt độ, thì điện trở suất của chất bán dẫn lại *giảm*.

Bảng 4.1. Một số tính chất điện của hai loại vật liệu tiêu biểu<sup>a)</sup>

		Đồng	Silic
• Loại vật dẫn		Kim loại	Chất bán dẫn
• Mật độ các hạt tải điện <sup>b),n</sup>	m <sup>-3</sup>	9.10 <sup>28</sup>	1.10 <sup>16</sup>
• Điện trở suất $\rho$	$\Omega\text{m}$	2.10 <sup>-8</sup>	3.10 <sup>3</sup>
• Hệ số nhiệt điện trở $\alpha$	K <sup>-1</sup>	+4.10 <sup>-3</sup>	-70.10 <sup>-3</sup>

a) Tất cả các giá trị đều đo ở nhiệt độ phòng

b) Giá trị đối với chất bán dẫn gồm cả điện tử và lỗ trống

Như vậy, chúng ta đã xác lập được cơ sở thực nghiệm để đóng khung vấn đề trung tâm của chúng ta về sự dẫn điện. Vấn đề này được phát biểu cụ thể như sau:

Có cái gì đằng sau kim cương làm cho nó là một chất cách điện, đằng sau đồng làm cho nó là một kim loại và đằng sau silic làm cho nó là một chất bán dẫn ?

Như chúng ta sẽ thấy, vật lí lượng tử sẽ giải đáp được tất cả các câu hỏi đó.

## IV.2 Các mức năng lượng trong vật rắn

Trước tiên chúng ta xem xét mô hình các mức năng lượng trong kim loại. Theo mô hình cổ điển, khi kim loại ở trạng thái rắn, thì các nguyên tử được phân bố theo cấu trúc mạng, và được giáp giới với nhau bởi các điện tử hoá trị bên ngoài bằng mối liên kết kim loại. Các mối liên kết kim loại trong kim loại rắn làm cho các điện tử hoá trị có khả năng chuyển động tự do, bởi chúng được nhiều nguyên tử

Các lõi ion dương

Các điện tử hoá trị trong dạng đám mây điện tử.

Các điện tử hoá trị trong dạng các điện tích âm cá biệt

**Hình 4.2.** Sơ đồ sắp xếp của các nguyên tử trong một mặt phẳng của kim loại hoá trị một như đồng, bạc, và natri. Trong (a) Các điện tử hoá trị thể hiện như “khí điện tử” và trong (b) Các điện tử hoá trị được nhìn thấy như các điện tử tự do có điện tích đơn vị.

chia sẻ lẫn nhau chứ không phải chỉ chạy vòng quanh một nguyên tử cá biệt. Các điện tử hoá trị thỉnh thoảng được xem như một lớp mây tích điện của điện tử như trên hình 4.2a. Lúc khác, các điện tử hoá trị lại được xem như các điện tử cá biệt tự do không kết hợp với bất kỳ nguyên tử cá biệt nào (hình 4.2b). \*Trong mô hình cổ điển, sự dẫn điện trong kim loại rắn, các điện tử hoá trị bên ngoài được xem như hoàn toàn tự do chuyển động giữa các lõi dương (hạt nhân không có các điện tử hoá trị) trong mạng kim loại. Tại nhiệt độ phòng các lõi dương đó có

động năng và chúng dao động xung quanh vị trí nút của chúng trong mạng. Khi nhiệt độ tăng, chúng dao động lớn hơn xảy ra trao đổi năng lượng giữa chúng và với các điện tử hoá trị.

Bây giờ chúng ta xem xét mô hình các \*vùng năng lượng đối với điện tử trong kim loại rắn bởi việc đó giúp chúng ta hiểu cơ chế dẫn điện trong kim loại. Chúng ta sẽ sử dụng kim loại natri để giải thích bởi nguyên tử natri có cấu trúc điện tử đơn giản.

Các điện tử của nguyên tử cô lập bao quanh hạt nhân của nó và có các mức năng lượng xác định sắc nét như  $1s^1, 1s^2, 2s^1, 2s^2, \dots$  được chỉ rõ theo đòi hỏi của nguyên lý Pauli. Nếu không, có khả năng tất cả các điện tử trong nguyên tử đều chiếm trạng thái với năng lượng thấp nhất,  $1s^1$ . Như vậy các điện tử trong nguyên tử trung tính natri sẽ chiếm  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$  như thể hiện trên hình 4.3a. Các điện tử của các mức thấp ( $1s^2 2s^2 2p^6$ ) bao chặt và tạo nên các điện tử lõi của

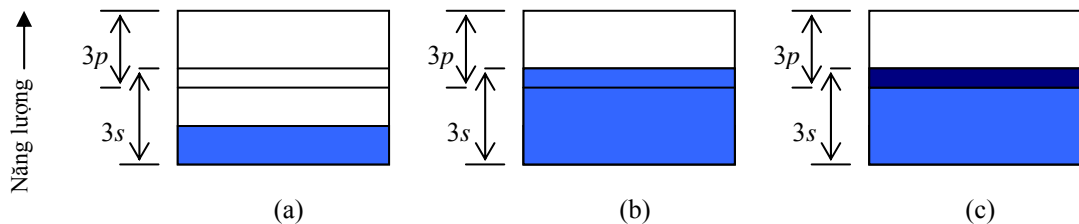
**Hình 4.3.** (a) Các mức năng lượng trong nguyên tử natri cô lập. (b) Sự phân bố các điện tử trong nguyên tử natri. Điện tử hoá trị lớp ngoài  $3s^1$  lỏng lẻo bao quanh và tự do để tham gia vào liên kết kim loại.

**Hình 4.4.** (a) Các điện tử hoá trị định vị trong khối kim loại natri. (b) Các mức năng lượng trong khối kim loại natri. Lưu ý rằng sự mở rộng mức  $3s$  thành vùng năng lượng và rằng vùng  $3s$  được chỉ ra gần hơn với mức  $2p$  do liên kết gây ra sự thấp đi của mức  $3s$  của các nguyên tử natri cô lập.

nguyên tử natri (hình 4.3b). Điện tử mức ngoài  $3s^1$  có thể tham gia vào liên kết cùng với các nguyên tử khác và được gọi là *điện tử hoá trị*.

Trong khối kim loại rắn các nguyên tử nằm gần nhau và “cảm thấy” nhau. Các điện tử hoá trị định vị (hình 4.4a) tương tác và thâm nhập lẫn nhau cho nên các mức năng lượng nguyên tử sắc nét ban đầu bị rộng ra thành một khoảng rộng được gọi là \*các vùng năng lượng (hình 4.4b). Các điện tử bên trong do bị che chắn bởi điện tử hoá trị, không tạo thành vùng.

Từng điện tử hoá trị trong khối kim loại natri, sẽ có mức năng lượng hơi chút khác nhau theo nguyên lý loại trừ Pauli. Như vậy nếu ở đó có  $N$  nguyên tử trong khối natri, mà trong đó  $N$  có thể là rất lớn, như vậy sẽ có \* $N$  khác biệt nhưng khác nhau ở một mức độ không đáng kể mức năng lượng  $3s^1$  trong vùng năng lượng  $3s$ . \*Từng mức năng lượng đó được gọi là *trạng thái*. Trong vùng năng lượng hoá trị các mức năng lượng gần nhau đến nỗi chúng tạo thành vùng năng lượng liên tục. **Đưa bảng tuần hoàn vào đây hoặc ở chương trên**



**Hình 4.5.** Giải đồ vùng năng lượng của một vài chất dẫn điện kim loại. (a) Natri  $3s^1$ : vùng  $3s$  chỉ đầy có một nửa, do chỉ có một điện tử. (b) Magiê,  $3s^2$ : vùng  $3s$  được lấp đầy và chùng một phần lên vùng  $3p$  rỗng. (c) Nhôm,  $3s^2 3p^1$ : vùng  $3s$  lấp đầy và chùng lên vùng  $3p$  đầy một phần.

Trong natri rắn các vùng năng lượng  $3s$  và  $3p$  chồng lên nhau. Do chỉ có một điện tử  $3s$  trong nguyên tử natri, vùng  $3s$  chỉ đầy có một nửa (hình 4.5a). Kết quả là chỉ cần một lượng nhỏ năng lượng để kích thích điện tử từ mức lấp đầy cao nhất trong natri lên mức trống thấp nhất. Như vậy natri là chất dẫn điện rất tốt bởi chỉ cần ít năng lượng để tạo thành dòng điện tử trong nó. Đồng, bạc, và vàng đều có vùng ngoài  $s$  lấp một nửa.

Trong magiê kim loại cả hai trạng thái  $3s$  đều đầy nhưng do việc hai mức  $3s$  và  $3p$  chồng lên nhau cho phép một vài điện tử chuyển dịch sang  $3p$ , tạo nên vùng kết hợp  $3sp$  một phần đầy (hình 4.5b). Như vậy thay vì vùng  $3s$  đầy, magiê là một chất dẫn điện tốt. Tương tự như vậy, nhôm có hai mức  $3s$  và một  $3p$  đầy nhưng vẫn dẫn điện tốt bởi vùng  $3p$  được lấp đầy một phần chồng lên vùng  $3s$  đầy (hình 4.5c).

Hình 4.6 cho một hình ảnh về cấu trúc vùng nói chung của các mức năng lượng trong một chất rắn giả định, trong đó, để đơn giản, ta giả thiết các vùng này không phủ nhau. \*Các khe giữa hai vùng kế tiếp biểu diễn các khoảng năng lượng mà không một điện tử nào có thể có. Điều này cũng rất giống như trong các nguyên tử cô lập, các điện tử không thể có năng lượng nằm giữa các mức năng lượng cho phép của nguyên tử đó.

Trong hình 4.6 cần chú ý rằng các vùng có \*năng lượng càng thấp thì càng hẹp. Điều này là do các vùng có năng lượng thấp tương ứng với các mức trong nguyên tử cô lập bị chiếm bởi các điện tử phần lớn thời gian nằm phía trong đám mây điện tử của nguyên tử đó. Vì vậy hàm sóng của các điện tử trong lõi này không xen phủ nhiều như hàm sóng của các điện tử ở vùng ngoài hoặc các điện tử hóa trị và vì nguyên nhân đó sự tách các mức - mặc dù vẫn cần phải xảy ra - nhưng không lớn như đối với các mức thường được chiếm bởi các điện tử lớp ngoài cùng.

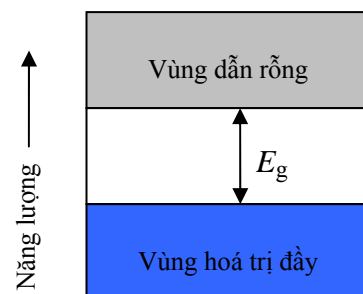
Như vậy chúng ta đã thiết lập xong bức tranh các mức đối với một chất rắn và do đó đã có đủ điều kiện để xem xét các mức đó được choán đầy bởi các điện tử như thế nào. Chúng ta sẽ thấy đây là con đường đúng đắn, chắc chắn đưa chúng ta đến những câu trả lời cho câu hỏi mà chúng ta đã đặt ra ở phần trước.

### IV.3 Chất cách điện

Một đặc điểm xác định một chất là *chất cách điện* - hoặc *chất điện môi* như hình 4.7 cho thấy, đó là mức bị chiếm cao nhất trùng với đỉnh của vùng. Thêm vào đó, vùng này phải được ngăn cách với vùng chưa bị chiếm ở phía trên bởi một khe năng lượng có độ rộng  $E_g$  đáng kể. Đối với kim cương  $E_g = 5,4 \text{ eV}$  lớn gần gấp 140 lần so với năng lượng chuyển động nhiệt trung bình của các hạt tự do ở nhiệt độ phòng.

Theo định nghĩa, chất cách điện là một chất rắn mà các điện tử không thể đi qua nó như một dòng có

**Hình 4.6.** Một biểu diễn lý tưởng hoá bức tranh các vùng và khe năng lượng trong chất rắn. Như hình ảnh phóng đại của vùng năng lượng trên cùng cho thấy mỗi vùng gồm một số rất lớn các mức năng lượng nằm sát nhau. Các mức của bức tranh lý tưởng hoá này còn chưa được chiếm bởi các điện tử.



**Hình 4.7.** Giản đồ vùng năng lượng của chất cách điện. Vùng hoá trị phủ đầy hoàn toàn và cách biệt khỏi vùng dẫn rỗng bằng khe năng lượng  $E_g$  tương đối lớn.

hướng. \*Chúng ta hãy xét xem tại sao. Nếu chúng ta đặt một điện trường  $E$  vào một chất cách điện, nó sẽ tác dụng một lực  $-eE$  lên mỗi điện tử. Theo vật lý cổ điển, lực này sẽ làm cho điện tử tăng thành phần vận tốc của nó theo hướng  $E$ , và do đó động năng của điện tử cũng sẽ tăng. Xét trên quan điểm lượng tử, nếu năng lượng của điện tử thay đổi, thì điện tử cần phải chuyển sang một mức năng lượng khác trong chất rắn. Tuy nhiên, nguyên lý Pauli không cho phép nó làm như vậy, bởi vì tất cả các mức khác trong vùng mà điện tử cần phải chuyển động lại đã bị chiếm hết rồi. Các điện tử đó bị tắc nghẽn hoàn toàn. Điều này cũng tương tự như một đứa bé muốn leo lên một chiếc thang đã bị những đứa khác đứng sẵn, mỗi đứa ở một bậc; vì không có một bậc nào trống nên chẳng ai chuyển động được.

Có rất nhiều mức trống trong vùng ở bên trên vùng được choán đầy trong hình 4.7., nhưng nếu một điện tử muốn chiếm một trong những mức đó thì nó phải bằng cách nào đó nhảy được khe ngăn cách giữa hai vùng. Nó không thể dừng lưng chừng ở bên trong khe vì tất cả các năng lượng trong khe này đều bị cấm nghiêm ngặt. Trong kim cương khe này đơn giản là quá lớn, để cho một số điện tử đủ để phát hiện được có thể vượt được qua tới vùng trống, dù là dưới tác dụng của điện trường hay chuyển động nhiệt.

### IV.3 Kim loại - xét định tính

\*Một đặc điểm xác định một chất là *kim loại*, như hình 4.8 cho thấy, đó là mức cao nhất bị chiếm (ở không độ tuyệt đối) nằm đâu đó ở khoảng giữa của một vùng năng lượng. Các điện tử chiếm vùng năng lượng bị choán đầy một phần đó là những điện tử hóa trị của các nguyên tử; do có thể tự do chuyển động qua chất rắn, nên chúng trở thành các *điện tử dẫn* của chất rắn.

Ở không độ tuyệt đối, *chuyển động nhiệt không có vai trò gì nữa* và các điện tử chiếm các trạng thái có năng lượng nhỏ nhất có thể được. Chúng ta có thể giả thiết với sai số nhỏ là *thế năng của các điện tử dẫn luôn luôn không đổi* khi nó chuyển động bên trong chất rắn. Nếu chúng ta đặt hằng số đó bằng không - như chúng ta luôn cho phép làm như vậy - thì năng lượng toàn phần  $E$  liên quan với mức năng lượng nào đó đúng bằng động năng của điện tử chiếm mức năng lượng đó.

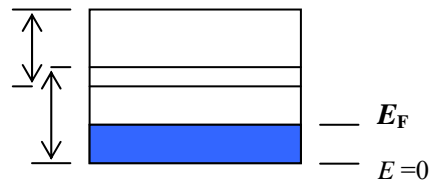
Mức ở đáy của vùng năng lượng được choán đầy một phần cho trên hình 4.8 như vậy sẽ tương ứng với  $E = 0$ . \*Mức bị chiếm cao nhất trong vùng này (ở không

độ tuyệt đối) được gọi là *năng lượng Fermi*  $E_F$ ; đối với đồng  $E_F = 7,0 \text{ eV}$ . \*Vận tốc của điện tử tương ứng với năng lượng Fermi được gọi là *vận tốc Fermi*  $v_F$ ; đối với đồng  $v_F = 1,6 \text{ m/s}$ .

Chỉ nhìn lên hình 4.8 cũng đủ xóa đi cái quan niệm sai lầm phổ biến cho rằng toàn bộ các chuyển động sẽ ngừng ở nhiệt độ không độ tuyệt đối. Chúng ta thấy rằng hoàn toàn do nguyên lý loại trừ Pauli, các điện tử trong vùng bị choán đầy một phần trên hình 4.8 được xếp chồng lên với năng lượng từ 0 đến  $E_F$ . Động năng *trung bình* của các điện tử ở vùng này đối với đồng là  $4,2 \text{ eV}$ . Để so sánh, lưu ý rằng động năng tịnh tiến trung bình của một phân tử khí lý tưởng ở nhiệt độ phòng chỉ là  $0,025 \text{ eV}$ . Như vậy các điện tử trong kim loại khá là sung túc năng lượng ở không độ tuyệt đối!

#### Các điều kiện đối với $T > 0$

Điều gì sẽ xảy ra đối với phân bố các điện tử trên hình 4.8 khi ta nâng nhiệt độ lên trên không độ tuyệt đối? Câu trả lời ngắn gọn là không có gì nhiều xảy ra, mặc dù cái điều nhỏ xảy ra đó lại rất quan trọng. Rõ ràng rằng các điện tử ở những vùng nằm dưới vùng bị choán



**Hình 4.8.** Biểu diễn lý tưởng hoá bức tranh các vùng và khe năng lượng đối với kim loại ở độ không tuyệt đối. Các điện tử dẫn chiếm đầy một phần vùng năng lượng. Các mức trống vẫn còn sẵn trong vùng đó sao cho các điện tử có thể thay đổi năng lượng của mình và sự dẫn điện có thể xảy ra. Các vùng nằm thấp hơn bị chiếm đầy hoàn toàn và không tự do chuyển động trong chất rắn.

đây một phân không thể chịu ảnh hưởng gì của chuyển động nhiệt được, tất cả chúng đã hoàn toàn bị chặn cứng.

Chỉ có những điện tử ở gần năng lượng Fermi là tìm thấy các mức trống phía trên nó và cũng chỉ có các điện tử đó mới được tự do nhảy lên các mức năng lượng cao hơn bởi chuyển động nhiệt. Thậm chí ở  $T = 1000^\circ\text{K}$ , nhiệt độ ở mẫu kim loại có thể phát sáng chói trong buồng tối, sự phân bố các điện tử giữa các mức khả dụng cũng không thay đổi nhiều so với phân bố ở không độ tuyệt đối.

Chúng ta hãy xét xem tại sao lại như vậy. Đại lượng  $kT$  là đơn vị đo tiện lợi đối với năng lượng có thể được truyền cho các điện tử bởi sự dao động nhiệt ngẫu nhiên của mạng. Ở  $T = 1000^\circ\text{K}$ ,  $kT = 0,086 \text{ eV}$ , không có một điện tử nào hy vọng có được sự thay đổi năng lượng lớn hơn ít lần con số tương đối nhỏ bé đó nếu chỉ dựa vào chuyển động nhiệt. Mọi "hành động" đều chỉ xảy ra đối với các điện tử có năng lượng gần năng lượng Fermi. Người ta có thể nói một cách hơi văn vẻ rằng chuyển động nhiệt thường chỉ làm gợn lên những làn sóng lăn tăn trên mặt biển Fermi, còn ở dưới sâu bao la vẫn hoàn toàn tĩnh lặng.

### Sự dẫn điện trong kim loại

\*Nếu đặt kim loại vào trong một điện trường  $\mathbf{E}$ , thì nó sẽ tác dụng một lực  $-e\mathbf{E}$  lên mỗi một điện tử. Trong kim loại, lực này trong thời gian  $\Delta t$  sẽ làm cho mỗi điện tử dẫn có sự gia tăng vận tốc là  $\Delta v$  theo hướng  $-\mathbf{E}$ . Điều này sẽ đòi hỏi các điện tử phải thay đổi năng lượng của chúng, nhưng do các mức năng lượng trống đã có sẵn nên việc sắp xếp lại này là có thể làm được. Trở lại phép so sánh hình ảnh trước đây của chúng ta, thì tình hình bây giờ giống như nửa số bậc thang ở phía trên còn trống.

Tuy nhiên, vận tốc của các điện tử dẫn riêng biệt \*không phải cứ tăng mãi, vì có sự va chạm gần liền với dao động nhiệt của mạng. Như vậy, sau một thời gian  $\tau$  nhất định, gọi là *thời gian hồi phục*, vận tốc trôi của các điện tử dẫn sẽ "an bài" ở một giá trị giới hạn không đổi, mà ta sẽ liên hệ nó với dòng điện không đổi được thiết lập dưới tác dụng của một điện trường.

Chú ý rằng mặc dù *tất cả* các điện tử dẫn đều có đóng góp vào dòng điện, nhưng chỉ có các điện tử gần năng lượng Fermi mới có thể làm các va chạm và do đó mới đóng vai trò trong việc xác lập giá trị giới hạn của vận tốc trôi. Vì chỉ các điện tử đó mới có thoải mái các mức còn trống ở gần, để sau mỗi va chạm chúng có thể chuyển động tới.

\*Đối với vật dẫn kim loại điện trở suất được thể hiện theo phương trình sau:

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (4.1)$$

trong đó  $m$  là khối lượng của điện tử,  $-e$  là điện tích của nó và  $n$  là mật độ các hạt tải điện, tức là số các điện tử dẫn trong một đơn vị thể tích. Mặc dù chúng ta dẫn ra phương trình này trên cơ sở của vật lý cổ điển, tuy nhiên nó vẫn còn đúng khi tính đến sự lượng tử hóa năng lượng của điện tử. Đại lượng  $\tau$  là thời gian hồi phục mà chúng ta đã nói tới ở trên.

### IV.5. Kim loại xét định lượng

#### Đếm các trạng thái lượng tử

Chúng ta bắt đầu bằng việc đếm số các trạng thái lượng tử phân biệt trong vùng năng lượng được choán đầy một phần của hình 4.8. Với số trạng thái cực kỳ lớn như thế, rõ ràng chúng ta không thể đếm từng trạng thái một, mà phải dùng phương pháp thống kê. Thay vì hỏi "năng lượng của trạng thái này bằng bao nhiêu?", ta cần phải hỏi: "Có bao nhiêu trạng thái (trong một đơn vị thể tích) có năng lượng nằm trong khoảng từ  $E$  đến  $E + dE$ ?" Số này có thể \*viết dưới dạng  $n(E)dE$  với  $n(E)$  được gọi là *mật độ trạng thái*.

\*Nếu chúng ta giả thiết rằng các điện tử dẫn chuyển động trong vùng có thế năng là hằng số, thì người ta chứng minh được  $n(E)$  được cho bởi :

$$n(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} E^{1/2} \quad (\text{mật độ trạng thái}) \quad (4.3)$$

Hình 4.9a cho đồ thị của p. t. 4.3. Chú ý rằng trong phương trình đó không có gì phụ thuộc vào hình dạng và kích thước của mẫu hay vật liệu làm mẫu.

Sự choán đầy các trạng thái ở  $T = 0$

Phương trình 4.3 cho chúng ta biết các trạng thái chưa bị chiếm được phân bố như thế nào theo năng lượng. Bây giờ chúng ta cần phải gán cho mỗi một năng lượng một trong số  $p(E)$  - mà ta gọi là *hàm xác suất* - nó cho ta biết xác suất để trạng thái có năng lượng đó sẽ thực sự được choán đầy ở không độ tuyệt đối, tất cả các trạng thái với năng lượng nhỏ hơn năng lượng Fermi đều được choán đầy và tất cả các trạng thái có năng lượng lớn hơn đều còn trống. Trong trường hợp này, hàm xác suất đơn giản là một hình chữ nhật được vẽ trên hình 4.9b ; trong đó đơn vị tương ứng với sự chắc chắn rằng trạng thái đó sẽ bị chiếm và zêrô ứng với sự chắc chắn rằng trạng thái sẽ *không* bị chiếm.

Khi đó tích của  $p(E)$  và  $n(E)$  cho chúng ta\*  $n_0(E)$  - là mật độ các trạng thái bị *chiếm*. Như vậy:

$$n_0(E) = n(E) \cdot p(E) \quad (4.4)$$

Hình 4.9c cho ta đồ thị của tích đó.

\*Chúng ta có thể tìm được năng lượng Fermi bằng cách cộng (tích phân) số các trạng thái bị chiếm trong hình 4.9c giữa  $E = 0$  và  $E = E_F$ . Kết quả phải bằng  $n$  là số các điện tử dẫn trong một đơn vị thể tích đối với kim loại. Tức là

$$n = \int_0^{E_F} n(E) dE \quad (4.5)$$

Chú ý rằng  $n$  được biểu diễn bởi diện tích sẫm trên hình 4.9c

**Hình 4.9.**

- (a) *Mật độ các trạng thái*  $n(E)$  được biểu diễn như hàm số của năng lượng.
- (b) *Hàm xác suất*  $p(E)$  được biểu diễn như hàm số của năng lượng ở  $T = 0$ .
- (c) *Mật độ các trạng thái bị chiếm*  $n_0(E)$  nhận được bằng cách nhân hai đường cong trong (a) và (b) và được biểu diễn như một hàm của năng lượng. Chú ý rằng tất cả các trạng thái có năng lượng nhỏ hơn năng lượng Fermi đều bị chiếm, nhưng tất cả các trạng thái có năng lượng lớn hơn đều còn trống.

**Tính năng lượng Fermi**

Nếu chúng ta thay p. t. 4.3 vào p. t. 4.5, ta được:

$$* n = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} \int_0^{E_F} E^{1/2} dE = \left( \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} \right) \left( \frac{2E_F^{3/2}}{3} \right)$$

Giải ra  $E_F$  ta được :

$$* E_F = \left( \frac{3}{16\sqrt{2}\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m} n^{2/3} = \frac{0,12h^2}{m} n^{2/3} \tag{4.6}$$

Như vậy, có thể tính được năng lượng Fermi, một khi biết được  $n$  - là số các điện tử dẫn trong một đơn vị thể tích.

**Sự choán đầy các trạng thái ở  $T > 0$**

Người ta chứng minh được rằng hàm xác suất đối với  $T > 0$  được cho bởi :

$$* P(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad \text{Hàm xác suất} \tag{4.7}$$

trong đó  $E_F$  là năng lượng Fermi và  $k$  là hằng số Boltzmann.

Chú ý rằng khi  $T \rightarrow 0$  số mũ  $(E - E_F) / kT$  trong p. t. 4.7 sẽ tiến tới  $-\infty$  nếu  $E < E_F$  và  $+\infty$  nếu  $E > E_F$ .

**Hình 4.10.**

- (a) *Mật độ các trạng thái  $n(E)$  được biểu diễn như một hàm số của năng lượng, đồ thị giống hệt như được cho trên hình 4.9a.*
- (b) *Hàm xác suất  $P(E)$  được biểu diễn như là một hàm của năng lượng ở  $T = 1000$  °K. Chú rằng nó cũng không khác mấy đồ thị trên hình 4.9b.*
- (c) *Mật độ trạng thái bị chiếm  $n_0(E)$  được tạo thành bởi tích của hai đường cong trong (a) và (b) và được vẽ như một hàm số của năng lượng. Chú ý rằng nó cũng không khác mấy so với hình 4.9c. (đồ thị này đã được lí tưởng hoá ở chỗ các điện tử dẫn chuyển động trong vùng có thể năng không đổi.) Đồ thị của mật độ trạng thái đo được không có dạng đơn giản như vậy.*

Trong trường hợp thứ nhất, ta có  $p(E) = 1$  và trong trường hợp thứ 2:  $p(E) = 0$ . Như vậy khi  $T = 0$ , p.t. 4.7 cho đúng dạng chữ nhật như trên hình 4.9b. Phương trình 4.7 cũng cho chúng ta thấy rằng đại lượng quan trọng không phải là  $E$ , mà đúng hơn là  $E - E_F$ , tức khoảng năng lượng giữa  $E$  và năng lượng Fermi.

Hình 4.10b cho thấy hàm xác suất đối với  $T = 1000^\circ\text{K}$ , được tính từ p. t. 4.7. Chú ý rằng nó không khác mấy so với dạng chữ nhật cho trên hình 4.9b. Hình 4.10c tìm được bằng cách nhân các đồ thị trên hình 4.10a và 4.10b, đó là đồ thị của mật độ các trạng thái bị chiếm ở nhiệt độ  $T = 1000^\circ\text{K}$ . Chú ý rằng nó cũng khác rất ít so với hình 4.9c cho phân bố ở  $T = 0$ .

### VI.6. Chất bán dẫn

Khi so sánh hình 4.11 với hình 4.7 ta thấy \*chất bán dẫn giống với chất cách điện ở chỗ mức choán đầy cao nhất (ở không độ tuyệt đối) nằm ở đỉnh của vùng năng lượng. Tuy nhiên, chất bán dẫn khác với chất cách điện ở chỗ khe năng lượng giữa vùng choán đầy và vùng còn trống ở sát trên là nhỏ hơn so với chất cách điện, vì vậy thực sự có khả năng cho các điện tử "nhảy qua khe" lên vùng còn trống phía trên nhờ chuyển động nhiệt. Đối với các vật liệu bán dẫn vùng bị choán đầy cao nhất được gọi là *vùng hóa trị* vì các điện tử chiếm vùng này là các điện tử hóa trị của các nguyên tử cô lập. Vùng nằm trên vùng hóa trị là vùng còn trống ở nhiệt độ  $T = 0$ , được gọi là *vùng dẫn*.

*Các chất bán dẫn* là các vật liệu có độ dẫn điện nằm giữa kim loại có độ dẫn cao và chất cách điện hầu như không dẫn. *Chất bán dẫn thuần* là chất bán dẫn sạch mà độ dẫn điện của nó được xác định bởi các tính chất dẫn điện vốn có của nó. Nguyên tố silic và germani sạch là những vật liệu bán dẫn thuần. Những nguyên tố này nằm trong nhóm IV A trong Bảng tuần hoàn, có cấu trúc kim cương đối xứng lập phương với mỗi liên kết đồng hoá trị định hướng mạnh.

Sự phân biệt giữa chất cách điện và chất bán dẫn chỉ có tính chất định tính, tùy thuộc vào độ rộng của khe năng lượng. Tuy nhiên, có một điều chắc chắn là kim cương (có  $E_g = 5,4\text{ eV}$ ) là một chất cách điện và silic (có  $E_g = 1,1\text{ eV}$ ) là một chất bán dẫn. Và thực tế (xem hình 4.1) hai chất này có cấu trúc tinh thể giống hệt nhau.

**Hình 4.11.** Biểu diễn lí tưởng hoá của bức tranh các vùng và khe năng lượng cho một chất bán dẫn, chẳng hạn như silic. Nó rất giống với bức tranh đối với chất cách điện (hình 4.7) trừ một điều là khe giữa vùng dẫn và vùng hoá trị nhỏ hơn nhiều.

Cuộc cách mạng trong vi điện tử - một cuộc cách mạng ảnh hưởng sâu sắc đến cuộc sống của chúng ta - là dựa trên các chất bán dẫn vì vậy chúng ta cần phải biết chi tiết hơn về chúng. Bảng 4.1 so sánh một số tính chất điện của silic - một chất bán dẫn điển hình - và đồng - một kim loại điển hình. Chúng ta hãy xem xét kỹ lưỡng bảng này, từng dòng một.

Mật độ hạt tải điện,  $n$

**Bảng 4.1 đưa vào đây** Đồng có nhiều hạt tải điện hơn silic, cỡ  $10^{13}$  lần. Đối với đồng các hạt tải điện là các điện tử với số lượng một hạt tính cho một nguyên tử ở nhiệt độ phòng - các số liệu ở Bảng 4.1 đều cho ở nhiệt độ này - các hạt tải điện trong silic tăng lên chỉ bởi vì, ở cân

bằng nhiệt, chuyển động nhiệt làm cho một số (rất nhỏ) các điện tử nhảy lên vùng dẫn và để lại vùng hóa trị một số đúng bằng thế các trạng thái trống (lỗ trống).

Các lỗ trống trong vùng hóa trị của chất bán dẫn, về mặt hiệu dụng, cũng đóng vai trò như các hạt tải điện, bởi vì chúng tạo một sự tự do nhất định cho chuyển động của các điện tử ở vùng này. Nếu thiết lập một điện trường trong chất bán dẫn, các điện tử trong vùng hóa trị do tích điện âm nên sẽ trôi theo hướng  $-E$ . Điều đó sẽ làm cho các lỗ trống trôi theo hướng  $E$ . Tức là các lỗ trống xử sự như các hạt tích điện  $+e$  và từ nay về sau chúng ta sẽ xem chúng đúng như vậy. Sự dẫn điện bằng lỗ trống cũng đóng một vai trò quan trọng trong đời sống của các chất bán dẫn.

Nếu khái niệm về các lỗ trống di chuyển khiến cho bạn bối rối, thì hãy hình dung một ô trống trong một bãi đã đỗ kín xe. Nếu một trong số các xe đang đậu trên bãi chuyển động vào ô còn trống và choán đầy nó, thì chiếc xe đó cũng đồng thời lại tạo ra một ô trống mới mà nó vừa mới rời đi. Đến lượt mình, ô trống này lại bị "choán đầy" bởi một chiếc xe khác và cứ liên tục diễn ra như vậy. Khi các chiếc xe di chuyển theo cách đó, ta có thể tập trung chú ý vào ô trống duy nhất dịch chuyển loanh quanh khắp bãi xe.

Điện trở suất,  $\rho$

Ở nhiệt độ phòng, điện trở suất của silic cao đáng kể so với đồng, cụ thể là lớn gấp  $10^{11}$  lần. Đối với cả hai nguyên tố, điện trở suất đều được tính từ p. t. 4.1:  $\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$ . Sự khác nhau ghê gớm về điện trở suất giữa silic và đồng có thể được xem là do sự khác nhau ghê gớm về mật độ các hạt tải điện,  $n$ . (Thời gian trung bình giữa hai va chạm  $\tau$  cũng có thể khác nhau đối với silic và đồng, nhưng tác dụng của nó đến điện trở suất bị che lấp bởi sự khác nhau về  $n$ )

Hệ số nhiệt điện trở,  $\alpha$

Đại lượng này là sự thay đổi tỉ đối của điện trở suất tính cho sự thay đổi một đơn vị của nhiệt độ, hay :

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

Điện trở suất của đồng và các kim loại khác *tăng* cùng với nhiệt độ ( $\frac{d\rho}{dT} > 0$ ). Điều này xảy ra vì các va chạm xảy ra thường xuyên hơn ở các nhiệt độ cao hơn và do đó làm giảm  $\tau$  trong p.t. 4.1. Đối với các kim loại, mật độ hạt tải điện  $n$  trong phương trình đó là độc lập với nhiệt độ.

Trái lại, điện trở suất của silic (và các chất bán dẫn khác) lại giảm khi nhiệt độ tăng ( $\frac{d\rho}{dT} < 0$ ). Điều này xảy ra bởi vì mật độ các hạt tải điện trong p. t. 4.1 tăng nhanh theo nhiệt độ. Sự giảm của  $\tau$  được nói tới ở trên đối với kim loại cũng có xảy ra đối với các chất bán dẫn, nhưng tác dụng của nó đến điện trở suất bị che lấp bởi sự tăng rất nhanh của  $n$ .

#### IV.7 Sự pha tạp (doping)

Sự linh hoạt của các chất bán dẫn có thể được hoàn thiện rất nhiều bằng cách đưa vào mạng của chất bán dẫn một số nhỏ các nguyên tử thay thế thích hợp (người ta gọi chúng là tạp chất - một cái tên không xứng với chúng!). Quá trình này được gọi là *\*sự pha tạp* (doping). Hầu hết các dụng cụ bán dẫn được dùng trên thực tế hiện nay đều dựa trên các vật liệu có pha tạp. Mật độ tạp chất được pha vào các chất bán dẫn bản chất thường trong khoảng 100 tới 1000 ppm. Chúng có hai loại : loại n và loại p. Dưới đây chúng ta sẽ lần lượt xét từng loại một

**\*Các chất bán dẫn loại n**

Hình 4.12 là biểu diễn trên mặt phẳng của mạng silic tinh khiết, hãy so với hình 4.1a. Mỗi một nguyên tử silic tạo nên một liên kết đồng hóa trị hai điện tử với mỗi trong số bốn nguyên tử ở gần nó nhất. Các điện tử liên quan trong liên kết đó tạo nên vùng hóa trị trong mẫu. Trong hình 4.12b một trong số các nguyên tử silic (có hóa trị = 4) đã được thay thế bằng một nguyên tử photpho (có hóa trị = 5). Như hình 4.12b cho thấy một điện tử "thừa" được liên kết lỏng lẻo với lõi ion của photpho bởi vì nó không có liên quan trong các mối liên kết đồng hóa trị với các ion bên cạnh. Điện tử này do đó bị kích thích nhờ chuyển động nhiệt để nhảy sang vùng dẫn dễ dàng hơn rất nhiều so với các điện tử hóa trị của silic.

**Hình 4.12.** (a) Biểu diễn hai chiều của mạng silic. Mỗi ion silic (điện tích lõi bằng  $+4e$ ) được liên kết với bốn ion ở gần nó nhất bằng liên kết hai điện tử góp chung. Dấu chấm trên hình vẽ ký hiệu các điện tử hoá trị.

(b) Một nguyên tử photpho (hoá trị +5) được thay thế cho nguyên tử silic ở giữa hình, tạo nên chỗ chất cho.

(c) Một nguyên tử nhôm (hoá trị +3) được thay thế cho nguyên tử silic ở giữa hình, tạo nên chỗ chất nhận

Nguyên tử photpho được gọi là nguyên tử *\*chất cho* vì nó thực sự *cho* một điện tử tới vùng dẫn. Điện tử "thừa" trong hình 4.12b có thể được nói là nằm ở một *mức của chất cho* định xứ, như thấy rõ từ hình 4.13a. Mức này nằm tách rời và cách đáy của vùng dẫn bởi một khe năng lượng  $E_d$  với  $E_d \ll E_g$ . *\*Bằng cách điều khiển nồng độ các nguyên tử chất cho, ta có thể làm tăng đáng kể mật độ điện tử ở vùng dẫn.*

Các chất bán dẫn được pha tạp bằng các nguyên tử của chất cho được gọi là chất bán dẫn loại *n*. Ký hiệu *n* lấy từ chữ negative (nghĩa là âm) vì đối với loại bán dẫn này các hạt tải điện mạng điện tích âm lớn hơn rất nhiều so với các hạt tải điện mạng điện tích dương. Các hạt tải điện mạng điện tích âm đó - được gọi là các *\*hạt tải điện chủ yếu* - chính là các điện tử ở vùng dẫn. Còn các hạt tải điện dương - trong trường hợp này được gọi là hạt tải điện thứ yếu - chính là các lỗ trống ở vùng hoá trị.

Chất bán dẫn loại p

Hình 4.12c cho thấy một mạng silic trong đó một nguyên tử silic (có hoá trị = 4) được thay thế bằng một nguyên tử nhôm (có hoá trị = 3). Trong trường hợp này có một điện tử “còn thiếu” và việc “đánh cắp” một điện tử hoá trị từ một nguyên tử silic kề cận là khá dễ dàng đối với lõi ion của nguyên tử nhôm, và vì thế tạo nên một lỗ trống trong vùng hoá trị.

Nguyên tử nhôm trong trường hợp này được gọi là nguyên tử *\*chất nhận*, bởi vì nó sẵn sàng nhận một điện tử từ vùng hoá trị. Điện tử được nhận như vậy sẽ chuyển động vào *mức của chất nhận* định xứ, như thấy rõ trên hình 4.13b.

Mức này tách rời và cách đỉnh của vùng hoá trị bởi một khe năng lượng  $E_a$  với  $E_a \ll E_g$ . Bằng cách điều khiển nồng độ các nguyên tử nhận ta có thể làm tăng số lỗ trống trong vùng hoá trị lên rất lớn.

**Hình 4.13.** (a) Chất bán dẫn loại n, trên hình thấy rõ mức của chất cho, các mức này đóng góp các điện tử (các hạt tải điện chủ yếu) tới vùng dẫn. Một số nhỏ các lỗ trống (phần tử tải điện thứ yếu) trong vùng hoá trị cũng được chỉ rõ trên hình.

(b) Chất bán dẫn loại p, trên hình thấy rõ mức của chất nhận, các mức này đóng góp các lỗ trống (các hạt tải điện chủ yếu) tới vùng hoá trị. Một số nhỏ các điện tử (phần tử tải điện thứ yếu) trong vùng dẫn cũng được chỉ rõ trên hình.

Các chất bán dẫn được pha tạp bởi các nguyên tử chất nhận được gọi là chất bán dẫn loại p. Ký hiệu p lấy từ chữ positive (nghĩa là dương), bởi vì số hạt tải điện tích điện dương trong trường hợp này lớn hơn rất nhiều so với số hạt tải điện âm. Trong chất bán dẫn loại p phần tử tải điện chủ yếu là các lỗ trống trong vùng hoá trị và các phần tử tải điện thứ yếu là các điện tử ở vùng dẫn.

**Bảng 4.2.** Các tính chất của hai chất bán dẫn pha tạp

Vật liệu mạng	Silic	Silic
Chất pha tạp	Photpho	Nhôm
Loại chất tạp	Chất cho	Chất nhận
Loại chất bán dẫn	Loại n	Loại p
Hoá trị của chất tạp	5 (= 4+1)	3 (= 4-1)
Khe năng lượng chất tạp	45 meV	57 meV
Phần tử tải điện chủ yếu	điện tử	lỗ trống
Phần tử tải điện thứ yếu	lỗ trống	điện tử
Điện tích của lõi ion chất tạp	+ e	- e

Bảng 4.2 tổng kết các tính chất của chất bán dẫn loại n và loại p điển hình. Đặc biệt chú ý rằng, lõi ion của các chất cho và chất nhận mặc dù tích điện nhưng không phải là các hạt tải điện, vì ở nhiệt độ bình thường, chúng vẫn còn cố định ở nút mạng của chúng.

Bài toán mẫu

Mật độ các điện tử dẫn trong silic nguyên chất ở nhiệt độ phòng là  $\sim 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . Giả sử rằng bạn muốn tăng con số đó lên một triệu ( $10^6$ ) lần bằng cách pha tạp phốt pho vào mạng silic. Tính tỉ lệ số nguyên tử silic cần được thay thế bởi nguyên tử phốt pho.

(Giả sử rằng ở nhiệt độ phòng, chuyển động nhiệt có tác dụng đủ để hầu hết các nguyên tử phốt pho đều cho điện tử "thừa" tới vùng dẫn.)

Giải. Mật độ các nguyên tử phốt pho cần phải bằng  $(10^{16} \text{ m}^{-3})(10^6)$  hay  $(10^{22} \text{ m}^{-3})$ . Mật độ các nguyên tử silic trong mạng silic tính khiết được cho bởi:

$$n_{Si} = \frac{N_A \cdot d}{A}$$

trong đó  $N_A$  là số Avogadro,  $d$  là khối lượng riêng của silic và  $A$  là khối lượng nguyên tử của nó. Từ phụ lục D ta biết rằng  $d = 2330 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  và  $A = 28,1 \text{ g/mol}$ . Thay các số đó vào ta được:

$$n_{Si} = \frac{(6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1})(2330 \text{ kg} / \text{m}^3)}{0,0281 \text{ kg} / \text{mol}} = 5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

Tỉ số của hai mật độ vừa tính được là đại lượng mà ta cần tìm:

$$\frac{n_{Si}}{n_p} = \frac{5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}}{10^{22} \text{ m}^{-3}} = 5 \cdot 10^6$$

Chúng ta thấy rằng nếu cứ trong 5 triệu nguyên tử silic chỉ cần thay một nguyên tử bằng nguyên tử phốt pho, là số điện tử trong vùng dẫn sẽ tăng lên một triệu lần.

Làm thế nào mà một lượng nhỏ tạp chất phốtpho lại có tác dụng lớn đến như vậy ?

Câu trả lời là : Ở nhiệt độ phòng, silic tinh khiết không có nhiều điện tử dẫn. Mật độ điện tử dẫn là  $10^{16} \text{ m}^{-3}$  trước khi pha tạp và  $10^{22} \text{ m}^{-3}$  sau khi pha tạp. Tuy nhiên đối với đồng, mật độ điện tử dẫn (xem Bảng 4.1) là  $10^{29} \text{ m}^{-3}$ . Như vậy, thậm chí ngay cả sau khi pha tạp, mật độ điện tử dẫn của silic vẫn còn nhỏ hơn nhiều so với đồng, kim loại điển hình.

**IV.8 Lớp chuyển tiếp P - N**

Đưa một mặt phẳng giả định cắt ngang qua một thanh silic tinh khiết. Pha tạp cho thanh ở một phía của mặt phẳng bằng các nguyên tử của chất cho (như vậy tạo ra một vật liệu loại n) và ở phía bên kia bằng các nguyên tử của chất nhận (do đó tạo ra vật liệu loại p). Như vậy là bạn vừa tạo được một *lớp chuyển tiếp p-n* - một cấu trúc trung tâm của hầu hết dụng cụ bán dẫn. Hình 4.14a biểu diễn một lớp chuyển tiếp p-n ở thời điểm tưởng tượng tạo ra nó. Trước hết, chúng ta hãy xét chuyển động của các phân tử tải điện chủ yếu, đó là điện tử trong vật liệu loại -n và lỗ trống trong vật liệu loại -p.

Chuyển động của các phân tử tải điện chủ yếu

Các điện tử ở gần mặt phẳng chuyển tiếp có xu hướng khuếch tán qua nó (từ phải qua trái trên hình 4.14) cũng gần tương tự như các phân tử khí khuếch tán qua một màng thấm được ra chân không bên ngoài nó. Cũng hết như vậy, các lỗ trống có xu hướng khuếch tán qua mặt phẳng chuyển tiếp từ trái qua phải. Cả hai chuyển động đều đóng góp vào *dòng khuếch tán*,  $i_{diff}$ , hướng từ trái qua phải trên hình 4.14d.

Cần nhắc lại rằng vật liệu loại n được rải khắp các ion chất cho, cố định chặt ở nút mạng của chúng. Bình thường, điện tích dương của các ion đó được bù trừ về điện bởi các phân tử tải

điện chính, tức là các điện tử. Tuy nhiên, khi các điện tử khuếch tán qua mặt phẳng chuyển tiếp, sẽ “để lộ” ra một trong số các ion chất cho và như vậy là đưa một điện tích dương cố định vào vật liệu loại n. Khi các điện tử khuếch tán tới được phía bên kia bờ thế, nó sẽ nhanh chóng tìm thấy một lỗ trống và kết hợp với nó, do đó làm trung hòa một trong số các ion chất nhận tích điện dương được rải khắp nơi trong vật liệu loại p.

Bạn có thể tự thấy rằng, lỗ trống khi khuếch tán qua bờ thế từ trái sang phải sẽ cho kết quả cuối cùng hoàn toàn tương tự. Như vậy, vùng điện tích dương cố định sẽ được tạo lập ở một phía của bờ thế và các điện tích âm cố định ở phía khác và tạo ra cái được gọi là *vùng nghèo* như được chỉ ra trên hình 4.14b.

Các điện tích cố định này gây ra một *hiệu điện thế tiếp xúc* dựng ngang qua lớp chuyển tiếp như chỉ rõ trên hình 4.14c.

Hiệu điện thế này có tác dụng như một bờ thế hạn chế sự tiếp tục khuếch tán của cả điện tử lẫn lỗ trống ngang qua mặt phẳng chuyển tiếp. Ví dụ, một điện tử ở mặt phẳng chuyển tiếp sẽ bị đẩy ngược trở về "bản quán" loại n của nó bởi điện tích không gian âm trong vật liệu loại p đối mặt với nó qua mặt phẳng chuyển tiếp. Để hoàn tất bức tranh, bây giờ chúng ta sẽ xét tới các phân tử tải điện thứ yếu.

**Hình 4.14.**

- (a) Lớp chuyển tiếp p-n ở thời điểm tương tượng tạo ra nó. Ở đây chỉ vẽ các phân tử tải điện chủ yếu.
- (b) Sự khuếch tán của các phân tử tải điện chủ yếu qua mặt phẳng chuyển tiếp làm cho điện tích không gian của các ion chất cho và chất nhận cố định mới lộ ra.
- (c) Điện tích không gian xác lập một hiệu điện thế tiếp xúc  $V_0$  qua mặt phẳng chuyển tiếp.
- (d) Cân bằng sự khuếch tán của các phân tử tải điện chủ yếu qua mặt phẳng chuyển tiếp được cân bằng bởi sự trôi của các phân tử tải điện thứ yếu theo hướng ngược lại

**Chuyển động của các phân tử tải điện thứ yếu**

Như hình 4.13a và Bảng 4.2 cho thấy, mặc dù các phân tử tải điện chủ yếu trong vật liệu loại n là các điện tử nhưng vẫn có một ít các lỗ trống là các phân tử tải điện thứ yếu. Giống

như vậy trong vật liệu loại  $p$ , mặc dù phân tử tải điện chủ yếu là lỗ trống, nhưng cũng vẫn có một ít các điện tử dẫn.

Mặc dù hiệu điện thế trên hình 4.14c có tác động làm chậm chuyển động của các phân tử tải điện chủ yếu và là bờ thế đối với chúng - nhưng đối với các phân tử tải điện thứ yếu, bất kể là điện tử hay lỗ trống, hiệu điện thế đó lại tạo điều kiện cho đi qua. Khi, do chuyển động nhiệt, một điện tử ở gần mặt phẳng chuyển tiếp nhảy từ vùng hóa trị lên vùng dẫn của vật liệu loại  $p$  trên hình 4.14a, hiệu điện thế tiếp xúc sẽ làm cho nó trôi đều từ trái sang phải qua mặt phẳng chuyển tiếp. Tương tự như vậy, nếu một lỗ trống được tạo ra trong vật liệu lớp  $n$  thì nó cũng sẽ trôi qua mặt phẳng chuyển tiếp sang phía đối diện. Như vậy vùng điện tích không gian được cho trên hình 4.14b thực tế đã bị quá trình đó quét hết các phân tử tải điện và vì thế người ta gọi vùng đó là *vùng nghèo*. Dòng được biểu diễn bởi chuyển động của các phân tử tải điện thứ yếu được gọi là "*dòng trôi*"  $i_{\text{drift}}$ , có hướng ngược với dòng khuếch tán và bù trừ nó ở cân bằng như được chỉ ra trên hình 4.14d.

Như vậy, ở cân bằng, khi đã an bài, lớp chuyển tiếp  $p - n$  có một hiệu điện thế tiếp xúc  $V_0$  giữa hai đầu của nó. Dòng khuếch tán  $i_{\text{diff}}$  chuyển động qua mặt phẳng chuyển tiếp từ  $p$  tới  $n$  sẽ bị cân bằng hoàn toàn bởi dòng trôi  $i_{\text{drift}}$  chuyển động theo chiều ngược lại.

#### IV.9. Chỉnh lưu bằng điốt

Lớp chuyển tiếp  $p - n$  về cơ bản là một bộ chỉnh lưu hai cực. Nếu bạn nối nó với hai cực của một nguồn điện, dòng trong mạch sẽ rất nhỏ đối với một cách nối với cực của nguồn so với một cách nối khác, như được chỉ rõ trong hình 4.15. Hình 4.16 cho thấy một ứng dụng của bộ chỉnh lưu điốt. Một điện thế đầu vào có dạng sóng hình sin và làm phát sinh ở đầu ra một điện thế có dạng nửa sóng. Như vậy bộ chỉnh lưu điốt về căn bản có tác dụng làm đoạn mạch (công tắc đóng) đối với một loại cực tính của điện thế và làm hở mạch (công tắc mở) đối với loại cực tính khác. Thực tế một bộ chỉnh lưu điốt lí tưởng chỉ có hai kiểu hoạt động đó. Nó hoặc là bật (điện trở zêrô) hoặc là tắt (điện trở vô cùng lớn)

Hình 4.16 cho thấy kí hiệu quy ước đối với bộ chỉnh lưu điốt. Đầu mũi tên tương ứng với cực loại  $p$  của điốt và chỉ hướng thuận đối với dòng điện. Tức là điốt mở khi cực có đầu mũi tên là (đủ) dương đối với cực kia.

Hình 4.17 cho thấy chi tiết của hai cách mắc. Trên hình 4.17a - cách mắc ngược -

suất điện động của nguồn đơn giản *cộng thêm* vào hiệu điện thế tiếp xúc làm tăng chiều cao bờ thế mà các phân tử tải điện chính phải vượt qua. Chỉ có một số rất ít làm được việc đó, vì vậy dòng khuếch tán giảm rõ rệt.

**Hình 4.15.** Đồ thị volt-Ampe đối với điốt chuyển tiếp cho thấy, điốt có tính dẫn điện cao theo hướng mũi tên và về cơ bản không dẫn điện theo hướng ngược lại.

**Hình 4.16.** Điốt chuyển tiếp p – n được nối như một bộ chỉnh lưu. Tác dụng của mạch là cho đi qua nửa dương của dạng sóng đi vào và chặn nửa âm. Điện thế trung bình của dạng sóng đầu vào là zero, nhưng của dạng sóng ra là dương.

Tuy nhiên, dòng trôi không cảm nhận thấy bờ thế, vì vậy nó độc lập với độ lớn hoặc phương của điện thế ngoài. Như vậy, sự cân bằng dòng tuyệt đối tồn tại khi không có điện thế ngoài bị phá vỡ và một dòng ngược rất nhỏ  $i_B$  xuất hiện trong mạch, như đã chỉ ra trên hình 4.17a.

Một hiệu ứng khác của cách mắc ngược đó là sự mở rộng của vùng nghèo. Điều này thấy rõ khi so sánh hình 4.16b và 4.17a. Vì vùng nghèo chứa rất ít các phân tử tải điện nên vùng này có điện trở suất lớn. Như vậy, sự tăng đáng kể độ rộng của nó cũng có nghĩa là tăng điện trở một cách đáng kể, điều này phù hợp với giá trị nhỏ của dòng ngược.

Hình 4.17b cho cách mắc thuận, trong đó cực dương của nguồn được mắc mới đầu loại p của lớp chuyển tiếp p-n. Ở đây suất điện động của nguồn làm giảm bớt hiệu điện thế tiếp xúc, do đó dòng khuếch tán tăng lên rõ rệt, và kết quả là dòng thuận tương đối lớn. Vùng nghèo bây giờ thu hẹp lại và điện trở nhỏ của nó hoàn toàn phù hợp với giá trị lớn của dòng thuận  $i_F$ .

#### IV.10 Điốt phát quang (LED)

Tất cả chúng ta đều quá quen thuộc với các con số có màu rực rỡ thường thấy ở các trạm bơm xăng dầu. Trong hầu hết các trường hợp ánh sáng đó được phát từ một tập hợp các lớp chuyển tiếp p - n hoạt động như các *điốt phát quang (LED)*.

Hình 4.18a cho thấy sự hiển thị bảy - đoạn từ đó tạo ra các con số. Hình 4.18b cho thấy mỗi mỗi yếu tố của hình hiển thị đó là một

**Hình 4.17.**

- (a) Cách mắc ngược của lớp chuyển tiếp p – n cho thấy vùng nghèo rộng và dòng ngược là nhỏ.
- (b) Cách mắc thuận, cho thấy sự thu hẹp của vùng nghèo và dòng thuận lớn.

đầu của một thấu kính phẳng làm bằng chất plastic và đầu kia là một LED nhỏ, có thể chỉ có

diện tích khoảng  $1 \text{ mm}^2$ . Hình 4.18c cho thấy một mạch điện hình trong đó LED được mắc thuận.

Vậy, làm thế nào các lớp chuyển tiếp p - n lại có thể phát ra ánh sáng ? Khi một điện tử ở đáy vùng dẫn của chất bán dẫn rơi vào một lỗ trống ở đỉnh vùng hóa trị, thì năng lượng  $E_g$  sẽ được giải phóng ( $E_g$  là độ rộng của khe). Điều gì sẽ xảy ra với năng lượng này? ít nhất có hai khả năng. Nó có thể được

biến thành năng lượng nhiệt của mạng dao động và, với xác suất cao, đó chính là điều đã xảy ra đối với chất bán dẫn dựa trên silic.

Tuy nhiên, trong một số vật liệu bán dẫn có những điều kiện khiến cho năng lượng được phát ra cũng có thể xuất hiện như một bức xạ điện từ có bước sóng được cho bởi :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{E_g / h} = \frac{ch}{E_g} \quad (4.9)$$

Các LED bán trên thị trường được thiết kế để ánh sáng phát ra trong vùng thấy được thường dựa trên vật liệu bán dẫn là một hợp chất Ga-As-P (Gali-Asen-phôtpho) được lựa chọn thích hợp. Bằng cách điều chỉnh tỉ lệ giữa phôtpho và asen, độ rộng của khe - cũng nghĩa là bước sóng của ánh sáng phát ra - có thể được “thừa” theo nhu cầu.

Một vấn đề được đặt ra là: nếu ánh sáng được phát ra khi điện tử rơi từ vùng dẫn đến vùng hóa trị, thì ánh sáng có cùng bước sóng đó có được hấp thụ khi điện tử chuyển động theo hướng ngược lại, tức là từ vùng hóa trị lên vùng dẫn không? Thực tế, có như vậy. Để tránh cho tất cả các phôtôn phát ra khỏi bị hấp thụ, cần phải có một lượng dư thừa lớn các điện tử và lỗ trống trong vật liệu, lớn hơn rất nhiều so với lượng điện tử và lỗ trống được tạo ra do chuyển động nhiệt trong vật liệu bán dẫn thuận. Đó chính xác là các điều kiện mà ta có được khi các phân tử tải điện chủ yếu - điện tử hoặc lỗ trống - được phun qua mặt phẳng trung tâm của lớp tiếp xúc p - n bằng một hiệu điện thế bên ngoài. Điều này giải thích tại sao một chất bán dẫn thuận đơn giản sẽ không thể dùng như một LED. Bạn trước hết cần phải có một lớp chuyển tiếp p - n ! Để tạo ra nhiều các phân tử tải điện chủ yếu - và do đó sẽ có nhiều phôtôn - còn cần phải đưa vào nhiều chất tạp và có một hiệu điện thế bên ngoài mạch đặt theo chiều thuận. Ngoài sử dụng trong kĩ thuật hiển thị, LED hoạt động ở vùng hồng ngoại còn được dùng nhiều trong các hệ thống thông tin quang học dựa trên các sợi quang học. Sở dĩ người ta chọn vùng hồng ngoại bởi vì sự hấp thụ trên một đơn vị chiều dài của các sợi quang học có hai cực tiểu rất xác định ở hai bước sóng khác nhau trong vùng đó. Trong sự phát triển của LED, hai đầu của tinh thể lớp chuyển tiếp p - n thích hợp được mài nhẵn sao cho một lát cắt mỏng của tinh thể ngang qua mặt phẳng lớp chuyển tiếp có thể dùng như một laser.

### IV.11 Tranzito

Các dụng cụ mà ta xét cho đến đây chỉ là các điôt, tức là một dụng cụ có hai cực. Trong mục này chúng ta sẽ giới thiệu một dụng cụ ba cực - đó là tranzito. Như hình 4.19 cho thấy, chức năng của tranzito là điều khiển dòng chạy qua dụng cụ từ cực  $D$  (cổng) đến cực  $S$  (nguồn) bằng cách thay đổi điện thế của cực  $G$  (cổng).

Đối với nhiều ứng dụng, đặc biệt là trong các máy tính (computer), chúng ta chỉ cần bật dòng cổng-nguồn (mở cổng) hoặc tắt dòng này (đóng cổng). Một trong hai điều kiện đó tương ứng với số "0" và điều kiện kia tương ứng với số "1" trong số học nhị phân - cơ sở của logic máy tính. Chúng ta cũng còn muốn thêm nữa rằng cực cổng không trích nhiều dòng từ mạch mà nó gắn với để nó ít ảnh hưởng nhất có thể được đối với sự hoạt động mạch. Theo ngôn ngữ chuyên môn hơn, ta nói rằng chúng ta muốn để tranzito có tổng trở vào cao.

Vấn đề trung tâm đặt ra ở đây là : làm thế nào chúng ta có thể điều khiển được dòng điện trong một vật dẫn mà không cần tiếp xúc điện trực tiếp với nó ?" Câu trả lời - có lẽ hơi ngạc nhiên, đó là bằng cách dùng một điện thế cổng biến thiên, chúng ta có thể thay đổi được tiết diện hiệu dụng của vật dẫn, thậm chí có thể thu nhỏ nó tới zêrô.

Hình 4.17 đã cho ta một gợi ý. Ở đó chúng ta thấy rằng bằng cách thay đổi thiên áp của lớp chuyển tiếp p - n chúng ta có thể điều khiển độ rộng của vùng nghèo. Đơn giản bằng cách thay đổi điện áp đó chúng ta có thể biến một vật dẫn (vật liệu loại n hoặc loại p) thành một chất không dẫn điện (vật liệu vùng nghèo). Chúng ta có thể dùng chính cái mẹo này trong tranzito, nhưng với một sự sắp xếp khác về mặt hình học.

Trong số các loại tranzito thường dùng, chúng ta sẽ chọn mô tả kĩ loại MOSFET (Metal -

Oxide - Semiconductor Field - Effect Transistor - có nghĩa là Tranzito trường dùng chất bán dẫn loại - kim loại - oxit). Hình 4.20 cho thấy những nét căn bản của loại tranzito này.

**Hình 4.19.** Một biểu diễn của tranzito, cho thấy dòng  $i_{DS}$  chạy qua dụng cụ từ cổng  $D$  đến nguồn  $S$ . Độ lớn của dòng được điều khiển bởi điện thế đặt vào cực cổng  $G$ .

**Hình 4.20.** Cấu trúc của MOSFET. Nguồn  $S$  và cực gốc (base)  $B$  được nối đất và điện thế  $V_{DS}$  được đặt vào cực cổng  $D$ . Độ lớn của dòng được điều khiển bởi điện thế cổng  $V_{GS}$ .

Một chất nền loại p được pha tạp ít, có nhúng trong nó hai "hòn đảo" là vật liệu loại n được pha tạp mạnh tạo nên cổng  $D$  và nguồn  $S$ . Hai cực này được nối bằng một kênh mỏng bằng vật liệu loại n gọi là kênh n. Một lớp cách điện bằng silic điôxit. (Từ đó mới có chữ ôxit trong tên gọi của loại tranzito này) được phủ bên trên chất nền và được xuyên qua bởi hai tiếp xúc kim loại (từ đó mới có chữ kim loại trong tên của tranzito) ở  $D$  và  $S$  tạo nên tiếp xúc điện với cổng và nguồn. Một lớp kim loại mỏng - cổng  $G$  được phủ đối diện với kênh n. Chú ý rằng cổng không có tiếp xúc thuận trở (ômic) với bản thân tranzito vì bị ngăn cách bởi lớp cách điện ôxit. Như vậy MOSFET có tổng trở vào cao như mong muốn, tới cỡ  $10^{15}\Omega$ .

Trước hết chúng ta hãy xét tình huống có nguồn và chất nền nối đất, cổng "nổi" (tức là chưa nối với nguồn điện) và điện thế dương  $V_{DS}$  được đặt vào  $D$ . Dòng điện  $i_{DS}$  sẽ được xác lập, như cho trên hình vẽ.

**Hình 4.21.** Một tranzito MOSFET được vào mạch như một bộ khuếch đại. Tín hiệu vào thay đổi theo thời gian  $V_{IN}$  qua tranzito thành tín hiệu ra được khuếch đại  $V_{OUT}$ . Các chữ  $G, D, B$  và  $S$  có ý nghĩa hệt như trên hình 4.20.

Hiệu điện thế qua biên giữa kênh n và chất nền loại p sẽ thay đổi từ 0 ở đầu nguồn của kênh đến giá trị  $V_{DS}$  ở đầu cổng của nó. Cực tính được tạo sao cho (so với hình 4.17) lớp chuyển tiếp p - n tồn tại ở biên này chịu thiên áp ngược trên hầu hết chiều dài của nó. Vùng nghèo sẽ tồn tại ở biên này và có chiều dày tăng dần từ đầu nguồn đến đầu cổng của kênh. Vì những điều kiện đó, kênh n sẽ không có cùng diện tích tiết diện dọc theo chiều dài của nó vì bị xâm lấn bởi vùng nghèo cứ mở rộng dần dọc theo kênh từ đầu nguồn đến đầu cổng. Chiều dài của vùng nghèo dọc theo kênh có thể bị ảnh hưởng bởi điện thế mà chúng ta chọn đặt vào cổng. Nếu chúng ta làm cho cổng âm so với nguồn, thì các điện tử sẽ bị đẩy từ kênh n vào chất nền, và như vậy sẽ làm rộng thêm vùng nghèo thu hẹp kênh và làm giảm dòng  $I_{DS}$ . Trái lại, điện thế cổng dương sẽ hút các điện tử vào kênh n làm hẹp vùng nghèo lại, mở rộng kênh dẫn điện và do đó tăng dòng  $i_{DS}$ . Bằng cách đó chỉ cần một thay đổi nhỏ của điện thế cổng có thể gây ra sự thay đổi căn bản trong dòng  $i_{DS}$  hệt như một van điều khiển nước chảy qua ống dẫn.

Hình 4.21 cho thấy một tranzito MOSFET nối vào một mạch như một bộ khuếch đại. Tín hiệu vào được đưa vào cổng và tín hiệu ra xuất hiện như một hiệu điện thế thay đổi trên điện trở tải  $R$ .