

## Chương 2 CÁC LINH KIỆN BÁN DẪN

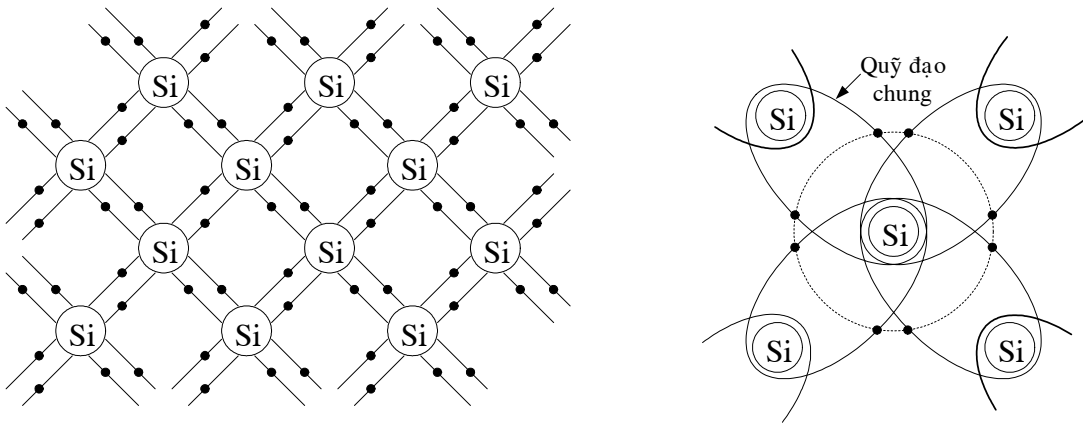
Thiết bị điện tử bao gồm nhiều loại linh kiện. Đóng vai trò cơ bản nhất, quyết định nhất trong hoạt động và chất lượng của máy móc điện tử nói chung là các linh kiện chế tạo từ chất bán dẫn, ví dụ như diode, transistor, transistor trường (JFET, MOSFET,...), các vi mạch (I.C) v.v ... chúng đã và đang thay thế một cách hiệu quả cho các phân tử của thế hệ trước (đèn hai cực chân không, đèn ba cực, v.v...) Vì vậy, trước khi nghiên cứu các ứng dụng kỹ thuật như mạch khuếch đại, mạch tạo dao động hình sin, tạo và biến đổi dạng xung v.v..., trong chương này chúng ta tìm hiểu về cấu tạo, nguyên tắc hoạt động của các linh kiện này.

### 2.1. CHẤT BÁN DẪN VÀ CƠ CHẾ DẪN ĐIỆN:

#### 2.1.1. Mạng tinh thể và liên kết hoá trị:

Các chất bán dẫn điển hình như *Germanium (Ge)*, *Silicium (Si)*, ... thuộc nhóm 4 bảng tuần hoàn các nguyên tố. Chúng cấu tạo từ những tinh thể có hình dạng xác định, trong đó các nguyên tử được sắp xếp theo một trật tự chặt chẽ, tuần hoàn, tạo nên một mạng lưới, gọi là *mạng tinh thể*. Chẳng hạn mạng tinh thể của Ge (hoặc Si) có *hình tứ diện*.

Để đơn giản, ta có thể hình dung cấu trúc các tinh thể bán dẫn bằng *mô hình phẳng* như h.2-1-1a. Xung quanh mỗi nguyên tử bán dẫn. (ví dụ Si) luôn luôn có 4 nguyên tử khác kề cận, liên kết chặt chẽ với nguyên tử đó. Mỗi liên kết được biểu thị bằng hai gạch song song. Mỗi nguyên tử này đều có 4 điện tử hoá trị ở lớp vỏ ngoài cùng. Do khoảng cách giữa các nguyên tử rất gần, các điện tử này chịu ảnh hưởng của cả các nguyên tử xung quanh. Vì vậy điện tử hoá trị của hai nguyên tử cạnh nhau cùng có những *quỹ đạo chung* như biểu thị trên h.2-1-1b. Quỹ đạo chung đó ràng buộc nguyên tử này với nguyên tử khác, tạo nên *mối liên kết hoá trị* (còn gọi *liên kết đôi điện tử*).



Hình 2-1-1. Cấu trúc tinh thể (a) và liên kết hoá trị (b)

Như thấy rõ từ hình vẽ, do liên kết với bốn nguyên tử xung quanh, lớp vỏ ngoài cùng của mỗi nguyên tử Si như được bổ sung thêm 4 điện tử, nghĩa là đủ số điện tử tối đa của lớp vỏ (8 điện tử) và do đó, lớp này trở thành bền vững (ít có khả năng nhận thêm hoặc mất bớt điện tử). Trong trạng thái như vậy, chất bán dẫn *không có điện tích tự do và không dẫn điện*.

**2.1.2. Điện tử tự do và lỗ trống - bán dẫn loại i:**

Tình trạng trên đây xảy ra trong một chất bán dẫn thuần khiết (không lẫn tạp chất) có cấu trúc tinh thể hoàn chỉnh và có nhiệt độ rất thấp ( $T = 0^0\text{K}$ ). Khi chất bán dẫn có nhiệt độ cao hơn (hoặc được cung cấp năng lượng dưới các dạng khác: chiếu ánh sáng, bị bắn phá bởi các chùm tia v.v...), một số điện tử hoá trị nhận thêm năng lượng sẽ thoát khỏi mối liên kết với các nguyên tử, trở thành tự do, chúng mang điện âm ( $q = 1,6.10^{-19} \text{ C}$ ) và sẵn sàng chuyển động có hướng khi có tác dụng của điện trường. Ta gọi đó là *điện tử tự do*. Khi một điện tử tự do xuất hiện, tại mối liên kết mà điện tử vừa thoát khỏi sẽ thiếu mất một điện tích âm  $-q$ , nghĩa là dư ra một điện tích dương  $+q$ . Ta gọi đó là một lỗ trống (hoặc: lỗ).

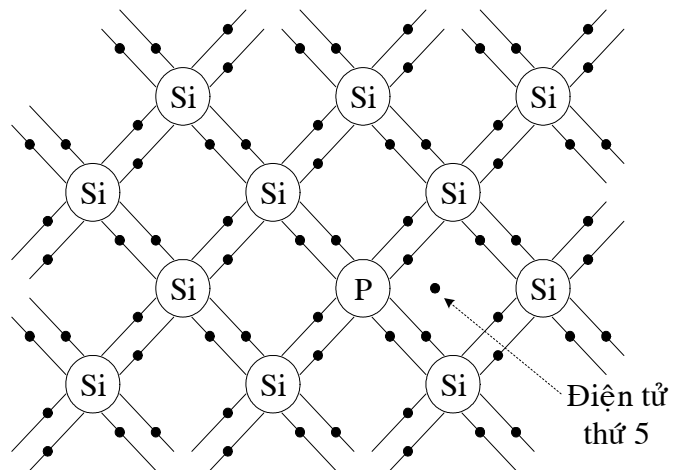
Như vậy, trong chất bán dẫn *thuần khiết* vừa xét (gọi là *bán dẫn i*) có hai loại điện tích tự do cùng xuất hiện khi được cung cấp năng lượng: điện tử và lỗ trống. Mật độ của chúng (nồng độ trong một đơn vị thể tích) là bằng nhau và thường ký hiệu  $n_i, p_i$ .

$$n_i = p_i \tag{2-1-1}$$

Điện tử và lỗ trống là hai loại hạt mang điện, khi chuyển động có hướng sẽ tạo nên dòng điện, vì vậy thường được gọi chung là *hạt dẫn*.

**2.1.3. Bán dẫn loại N và bán dẫn loại P**

Chất bán dẫn thuần khiết trên đây (Si hoặc Ge) nếu được pha thêm tạp chất thuộc nhóm 5 (ví dụ Asenic đối với Ge hoặc Phosphore đối với Si) với hàm lượng thích đáng sao cho các nguyên tử tạp chất này chiếm chỗ một trong những nút của mạng tinh thể thì cơ thể dẫn điện sẽ thay đổi. Thật vậy khác với chất cơ bản (ví dụ Si trên h. 2-1-2), nguyên tử tạp chất (chẳng hạn Phosphore) vỏ ngoài cùng có 5 điện tử, trong đó 4 điện tử tham gia liên kết hóa trị với các nguyên tử lân cận (tương tự như liên kết trong mạng Si thuần khiết). Điện tử thứ 5 liên kết yếu hơn với hạt nhân và nguyên tử xung quanh, cho nên chỉ cần được cung cấp một năng lượng nhỏ (nhờ nhiệt độ, ánh sáng v.v...), điện tử này sẽ thoát khỏi trạng thái ràng buộc, trở thành hạt dẫn tự do. Nguyên tử tạp chất khi đó bị ion hoá đã trở thành một ion dương. Nếu có điện trường đặt vào, các hạt dẫn tự do nói trên sẽ chuyển động có hướng, tạo nên dòng điện.



Hình 2-1-2. Mạng tinh thể của bán dẫn N

Như vậy, tạp chất nhóm 5 cung cấp điện tử cho chất bán dẫn ban đầu nên được gọi là tạp chất cho (hoặc tạp donor). Chất bán dẫn có pha tạp donor gọi là bán dẫn loại N (hoặc bán dẫn điện tử).

Nếu gọi  $N_d$  là nồng độ tạp donor (chứa trong một đơn vị thể tích của chất cơ bản) thì khi được cung cấp năng lượng đầy đủ (chẳng hạn đặt chất bán dẫn trong môi trường có nhiệt độ khá cao hơn  $0^0\text{K}$  ví dụ ở  $-30^0\text{C}$ ), toàn bộ các nguyên tử tạp chất đều đều đã bị ion hoá. Nồng độ điện tử tự do do tạp chất cung cấp tương ứng sẽ là:

$$n_d = N_d \tag{2-1-2}$$

Ngoài hiện tượng giải phóng điện tử tự do nhờ tạp donor vừa nêu, riêng chất cơ bản vẫn có quá trình *sản sinh ra từng cặp điện tử - lỗ trống* do tác động của nhiệt độ (hoặc ánh sáng,...), giống như trong bán dẫn thuần. Vì vậy tổng nồng độ điện tử tự do trong chất bán dẫn loại N (ký hiệu  $n_n$ ) sẽ bằng :

$$n_n = N_d + p_n \quad (2-1-3)$$

$p_n$  là nồng độ lỗ trống trong bán dẫn N. Như vậy ở bán dẫn này:

$$n_n \gg p_n \quad (2-1-4)$$

Ta gọi điện tử là *hạt dẫn đa số*, lỗ trống là *hạt dẫn thiểu số*.

Thông thường, người ta bỏ qua vai trò của hạt dẫn thiểu số, lấy gần đúng đối với bán dẫn N:

$$n_n \approx N_d \quad (2-1-5)$$

Trường hợp tạp chất pha vào thuộc *nhóm 3* của bảng tuần hoàn các nguyên tố (chẳng hạn Bore đối với Si, hoặc Indium đối với Ge), do lớp vỏ ngoài cùng của nguyên tử tạp chất chỉ có 3 điện tử, khi tham gia vào mạng tinh thể của chất cơ bản (ví dụ Si trên h.2-1-3) chỉ tạo nên 3 mối liên kết hoàn chỉnh, còn mối liên kết thứ tư bị bỏ hở. Chỉ cần một kích thích nhỏ (nhờ nhiệt độ, ánh sáng,...) là một trong những điện tử của các mối liên kết hoàn chỉnh bên cạnh sẽ đến thế vào liên kết bỏ hở nói trên. Nguyên tử tạp chất lúc đó sẽ trở thành một ion âm. Tại mỗi liên kết mà điện tử vừa đi khỏi sẽ dư ra một điện tích dương, nghĩa là xuất hiện một *lỗ trống*. Nếu có điện trường đặt vào, các lỗ trống này sẽ tham gia dẫn điện.

Như vậy, tạp chất *nhóm 3 tiếp nhận* điện tử từ chất cơ bản để làm sản sinh các lỗ trống nên được gọi là *tạp chất nhận* (hoặc tạp acceptor). Chất bán dẫn có pha tạp nhóm như trên gọi là bán dẫn loại P (hoặc bán dẫn lỗ trống).

Cũng như trường hợp trên, nếu gọi  $N_a$  là nồng độ tạp acceptor, trong điều kiện *ion hoá toàn bộ* (ví dụ chất bán dẫn ở nhiệt độ từ  $-30^{\circ}\text{C}$  trở lên), nồng độ lỗ trống do tạp chất gây ra là:

$$p_p = N_a \quad (2-1-6)$$

Ngoài số lỗ trống kể trên, trong chất cơ bản vẫn tồn tại một ít điện tử và lỗ trống (số lượng bằng nhau) do tác động của nhiệt độ hoặc ánh sáng gây nên, giống như trong bán dẫn thuần. Vì vậy, nếu ký hiệu nồng độ tổng của lỗ trống và điện tử trong chất bán dẫn loại P đang xét là  $p_p$  và  $n_p$  thì:

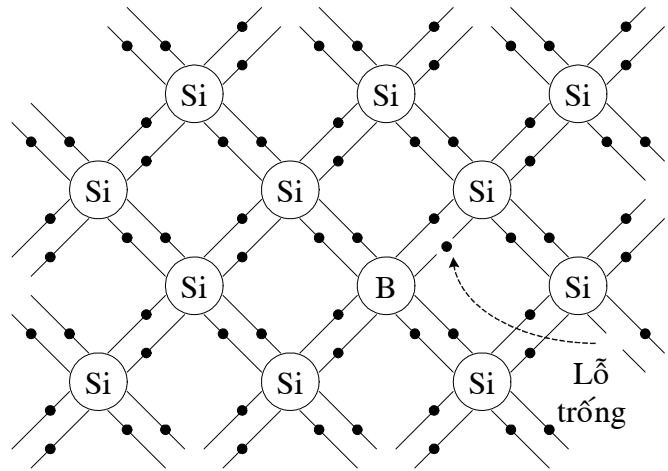
$$p_p = N_a + n_p \quad (2-1-7)$$

$$\text{rõ ràng} \quad p_p \gg n_p \quad (2-1-8)$$

Lỗ trống là *hạt dẫn đa số*, điện tử là *hạt dẫn thiểu số*.

Thông thường, nồng độ hạt dẫn thiểu số là không đáng kể, do đó đối với bán dẫn P, người ta lấy gần đúng:

$$p_p \approx N_a \quad (2-1-9)$$



Hình 2-1-3. Mạng tinh thể của bán dẫn P

Tóm lại, tùy theo tạp chất pha vào thuộc nhóm 3 hay nhóm 5 mà chất bán dẫn thuần (bán dẫn i) trở thành bán dẫn P hay bán dẫn N. Hạt dẫn đa số tương ứng là lỗ trống hoặc điện tử. Các nguyên tử tạp chất khi được kích thích (nhờ nhiệt độ ánh sáng...) trở thành ion âm acceptor hoặc ion dương donor.

Định nghĩa như trên mang tính lý tưởng hoá. Trên thực tế, nhiều khi trong một chất bán dẫn có chứa cả hai loại tạp acceptor. Khi  $N_d > N_a$  chất bán dẫn sẽ thể hiện như một bán dẫn loại N. Tương tự khi  $N_a > N_d$ : bán dẫn loại P. Còn khi  $N_d \approx N_a$ : coi như bán dẫn i.

Cũng cần lưu ý thêm rằng ở trạng thái cân bằng, mỗi chất bán dẫn đều trung hòa điện, nghĩa là tổng mọi điện tích dương đúng bằng trị số của tổng các điện tích âm trong thể tích.

**2.1.4. Giải thích cơ chế dẫn điện theo lý thuyết vùng năng lượng**

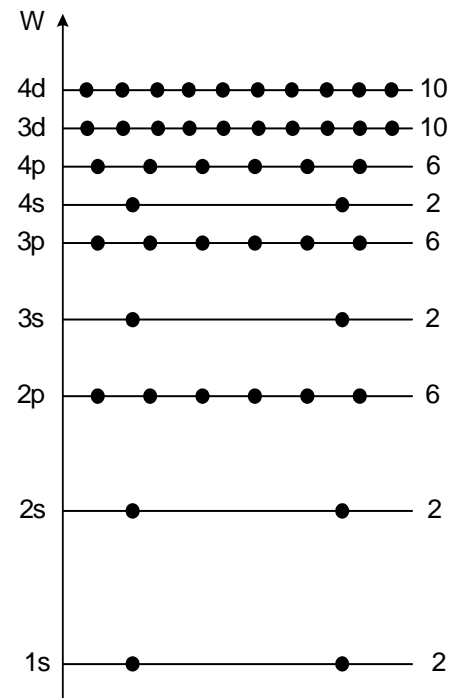
Trên đây là giải thích một cách định tính sự dẫn điện của ba loại bán dẫn dựa trên cấu tạo nguyên tử. Để có thể tính toán định lượng độ dẫn điện của các chất rắn nói chung, cũng như sự phụ thuộc của điện trở xuất vật liệu vào các tham số khác, người ta phải dùng lý thuyết vùng năng lượng mà dưới đây chỉ đề cập sơ lược.

**1 – Giải độ năng lượng của điện tử trong chất rắn**

Như đã biết, một nguyên tử bao gồm hạt nhân mang điện dương và các lớp vỏ điện tử mang điện âm (gọi là lớp K, L, M ... đánh số bằng số lượng tử  $n = 1, 2, 3...$ ). Mỗi lớp này lại phân thành một số lớp nhỏ (ký hiệu 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d...) và số lượng điện tử tối đa trên mỗi lớp là mỗi số xác định. Ví dụ các lớp s (1s, 2s hoặc 3s,...) mỗi lớp có tối đa 2 điện tử, các lớp p (2p, 3p, hoặc 4p,...) mỗi lớp có tối đa 6 điện tử.

Điện tử trên một lớp nhỏ có một năng lượng W nhất định. Các giá trị năng lượng này là rời rạc, xếp thành nhiều mức khác nhau. Đồ thị biểu diễn các mức năng lượng có thể của điện tử trong một điện tử cô lập (cách xa các nguyên tử khác) như h.2-1-4. (con số ghi trên mỗi mức chỉ số điện tử tối đa của mức đó)

Ta thấy lớp vỏ gần hạt nhân có năng lượng bé nhất. Càng xa hạt nhân, năng lượng càng tăng, đồng thời khoảng cách giữa các mức kế tiếp càng giảm dần. Các mức phía trên rất sát nhau, gần như liên tục. Điện tử có xu hướng “chiếm” các mức năng lượng bé trước, tức là xếp trên một lớp vỏ phía trong trước. Sau đó, khi các lớp bên trong đã đầy mới “chiếm” dần ra ngoài. Vì vậy các lớp phía trong có đủ số điện tử tối đa (gọi là lớp đầy hoặc mức đầy), lớp phía ngoài thường chưa đầy hoặc còn trống. Chỉ các điện tử trong lớp vỏ chưa đầy mới có khả năng thoát khỏi trạng thái ràng buộc trở thành tự do.



Hình 2.1.4. Các mức năng lượng của điện tử trong nguyên tử cô lập

Trong mạng tinh thể chất rắn, các nguyên tử không đứng đơn độc mà sắp xếp rất gần nhau. Vì vậy trạng thái năng lượng của điện tử bị thay đổi. Mỗi mức năng lượng, đặc trưng cho từng lớp nhỏ trong nguyên tử cô lập trước đây, bây giờ bị phân ly thành rất nhiều mức khác nhau, kế cận nhau, tạo thành một vùng năng lượng. Số lượng mức trong mỗi vùng là rất lớn (bằng số lượng nguyên tử tạo nên mạng tinh thể), khoảng cách giữa các mức chỉ rất bé, vì vậy coi mỗi vùng năng lượng như liên tục. Tùy theo cự ly giữa các nguyên tử, tức là tùy theo “hằng số mạng tinh thể” của mỗi nguyên tố, mà đồ thị về các vùng năng lượng của một nguyên tố một khác nhau: các vùng năng lượng cho phép (tương ứng với từng mức rời rạc trước đây) sẽ hoặc gối nhau, hoặc tách rời nhau, cách nhau bởi những vùng không có mức cho phép (vùng cấm).

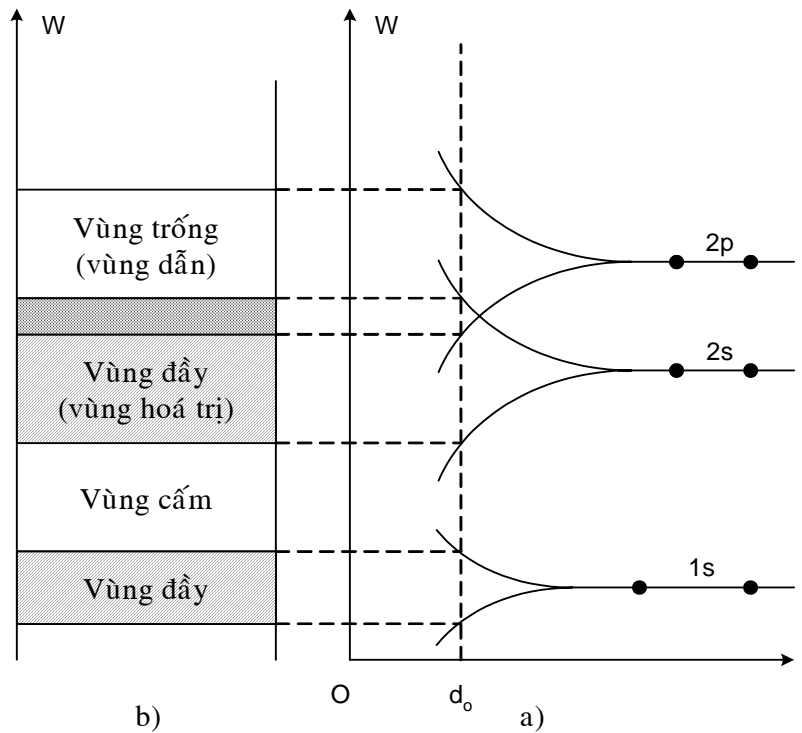
Hình 2-1-5a minh họa quá trình phân ly các mức năng lượng thành vùng năng lượng khi khoảng cách giữa các nguyên tử d giảm dần đối với trường hợp Berium. Tương ứng với cự ly  $d_0$  của mạng tinh thể Berium (Be), giản đồ vùng năng lượng (còn gọi là cấu trúc vùng năng lượng) có dạng như h.2-1-5b.

Ta thấy mức đầy 2s và mức trống 2p phân ly thành hai vùng gối lên nhau, tạo thành một vùng chung chưa đầy. Khi được kích thích, các điện tử trong vùng này dễ dàng nhận thêm năng lượng để nhảy lên chiếm những mức còn trống phía trước, nghĩa là trở thành điện tử tự do và chúng sẵn sàng chuyển động có hướng tạo nên dòng điện khi có điện trường tác dụng.

Vùng năng lượng tương ứng với các mức đã có đủ số điện tử tối đa chiếm giữ được gọi là vùng đầy. Vùng năng lượng ứng với các mức còn trống gọi là vùng trống. Phạm vi giữa hai vùng, không chứa những mức năng lượng cho phép của điện tử, được gọi là vùng cấm.

Thông thường, người ta chỉ quan tâm đến các điện tử có khả năng dẫn điện, tức là các điện tử ở lớp vỏ ngoài cùng. Vùng năng lượng ứng với chúng gọi là vùng hoá trị. Vùng trống phía trên (kề sát hoặc cách ly bởi vùng cấm) được gọi là vùng dẫn điện (hoặc vùng dẫn).

Người ta chỉ chú ý đến các vùng này, còn các vùng cấm và vùng đầy tương ứng với các lớp điện tử phía trong, ít được để ý.



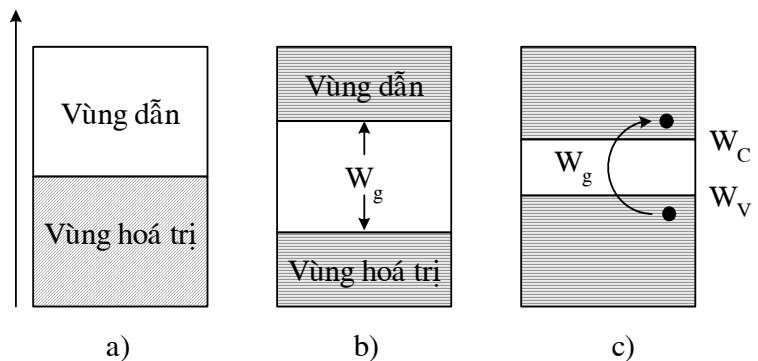
Hình 2.1.5. Phân ly các mức thành vùng năng lượng

## 2- Sự dẫn điện của kim loại, điện môi và bán dẫn

Giản đồ vùng năng lượng ở  $0^0\text{K}$  là cơ sở để phân tích ba loại vật rắn điển hình: kim loại, điện môi và bán dẫn.

Đối với kim loại, giản đồ vùng năng lượng có dạng như hình 2-1-6a. Ở đây, tương tự như trường hợp Berium vừa giới thiệu ở trên, vùng dẫn và vùng hoá trị gối lên nhau, không có vùng cấm xen vào giữa. Vì vậy, ngay ở nhiệt độ xấp xỉ  $0^0\text{K}$ , điện tử đã có thể nhảy lên chiếm những mức còn trống của vùng dẫn, trở thành tự do và tham gia dẫn điện.

Đối với chất điện môi (chất cách điện), vùng dẫn cách vùng hoá trị một bề rộng của vùng cấm  $W_g$  tương đối lớn (H.2-1-6b). Ở  $0^0\text{K}$  vùng dẫn hoàn toàn trống, không có điện tử, do đó chất điện môi không dẫn điện. Trong vùng hoá trị không có mức trống cho nên điện tử không thể thay đổi năng lượng. Muốn trở thành tự do để tham



Hình 2.1.6. Giản đồ vùng năng lượng của kim loại (a), điện môi (b) và bán dẫn (c)

gia dẫn điện, điện tử của vùng hoá trị phải được cung cấp được năng lượng rất lớn, đủ sức vượt quá bề rộng vùng rộng để chiếm các mức còn trống của vùng dẫn. Nhưng do  $W_g$  lớn, khả năng này khó xảy ra. Vì vậy trong điều kiện bình thường, dù có điện áp đặt vào, chất điện môi vẫn là chất cách điện.

Trường hợp chất bán dẫn thuần (H.2-1-6c) bề rộng vùng cấm hẹp hơn nhiều so với chất điện môi (ví dụ Si có  $W_g = 1,1 \text{ eV}$ , Ge có  $W_g = 0,7 \text{ eV}$ ).

Vì vậy, khi được cung cấp năng lượng, một số điện tử trong vùng hoá trị có thể vượt qua vùng cấm, nhảy lên chiếm các mức phía dưới của vùng dẫn để tham gia dẫn điện. Quá trình này tương ứng với hiện tượng xảy ra trong cấu trúc nguyên tử đã nói tới ở 2-1-2: điện tử hoá thoát khỏi trạng thái ràng buộc, trở thành tự do. Mức năng lượng trong vùng hoá trị mà điện tử vừa rời đi khỏi, trước đây đã được đặc trưng bằng lỗ trống.

Khả năng dẫn điện của chất bán dẫn tốt hay xấu tùy thuộc vào số lượng điện tử tự do trong vùng dẫn và số lượng lỗ trống trong vùng hoá trị. Con số này lại phụ thuộc hai yếu tố :

- Số lượng mức năng lượng trong vùng dẫn và trong vùng hoá trị (hoặc nói cách khác: mật độ phân bố mức năng lượng trong hai vùng đó)
- Tình trạng có hay không có điện tử trên mỗi mức của vùng dẫn, có hay không có lỗ trống trên mỗi mức của vùng hoá trị. (Nói cách khác: xác suất chiếm mức năng lượng của điện tử trong vùng dẫn và lỗ trống trong vùng hoá trị).

Vật lý thống kê và cơ học lượng tử đã xác định được các hàm phân bố và xác suất nói trên. Từ đó tính được nồng độ hạt dẫn trong chất bán dẫn:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{W_c - W_F}{kT}\right) \quad (2-1-10)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{W_F - W_v}{kT}\right) \quad (2-1-11)$$

trong đó:  $W_c$  là mức năng lượng thấp nhất (đáy) của vùng dẫn;  $W_v$  là mức năng lượng cao nhất (đỉnh) của vùng hoá trị. (xem h.2-1-6c);  $k$  là hằng số Boltzman;  $T$  : nhiệt độ tuyệt đối của chất bán dẫn;  $W_F$  là năng lượng Fecmi (còn gọi: mức fecmi) đại diện cho năng lượng lớn nhất mà điện tử có ở  $0^0\text{K}$  (hoặc năng lượng mà xác suất điện tử có giá trị đó chỉ là 50% khi ở nhiệt độ lớn hơn  $0^0\text{K}$ ). Vị trí của mức Fecmi trên giản đồ năng lượng tùy thuộc vào loại tạp chất và nồng độ của chúng .

$N_c, N_v$  lần lượt là mật độ trạng thái hiệu dụng của vùng dẫn và vùng hoá trị. Giá trị của chúng tăng theo nhiệt độ (tỷ lệ với  $T^{3/2}$ )

Lấy tích số của (2-1-10) và (2-1-11), lưu ý rằng:  $W_c - W_v = W_g$  (bề rộng vùng cấm)

Ta đi đến :

$$np = N_c N_v \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right) \quad (2-1-12)$$

như vậy, tích số nồng độ hạt dẫn đa số và thiểu số trong chất bán dẫn chỉ phụ thuộc nhiệt độ và bề rộng vùng cấm, không phụ thuộc vị trí mức Fecmi, nghĩa là không phụ thuộc vào nồng độ tạp pha vào .

Đối với chất bán dẫn thuần :

$$n_i = p_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-W_g}{2kT}\right) \quad (2-1-13)$$

ta thấy nồng độ hạt dẫn (và do đó cả độ dẫn điện) của bán dẫn tăng rất nhanh theo nhiệt độ tỉ lệ với  $\left[T^{3/2} \exp\left(\frac{-W_g}{2kT}\right)\right]$

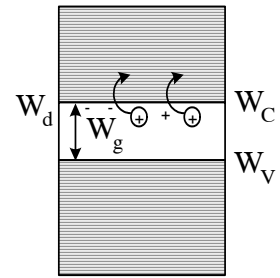
Do tích  $np$  không phụ thuộc nồng độ tạp chất, hệ thức (2-1-12) thường được viết lại dưới dạng:

$$np = n_i^2 \quad (2-1-14)$$

Biểu thức này đặc trưng cho mọi chất bán dẫn ở trạng thái cân bằng.

3. Bán dẫn loại N và bán dẫn loại P

Trên hình 2-1-7 là giản đồ năng lượng của điện tử trong bán dẫn N. Tạp chất donor có mức năng lượng  $W_d$  nằm trong vùng cấm, gần sát đáy  $W_c$  của vùng dẫn. Vì vậy chỉ cần nhận được một năng lượng bé là điện tử hoá trị của tạp này nhảy từ mức  $W_d$  lên vùng dẫn, trở thành tự do, còn nguyên tử donor trở thành ion dương. (Quá trình “nhảy mức” này tương ứng với hiện tượng đã mô tả trong cấu trúc nguyên tử trước đây: điện tử thứ 5 liên kết yếu với hạt nhân và các nguyên tử xung quanh, dễ dàng trở thành điện tử tự do).



Hình 2.1.7. Giản đồ vùng năng lượng của bán dẫn N

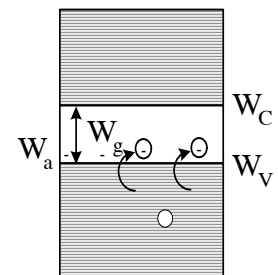
Ở nhiệt độ bình thường, năng lượng nhiệt mà các điện tử nhận được đã vượt xa giá trị năng lượng cần thiết nói trên, vì vậy trong vùng dẫn luôn luôn có điện tử tự do và toàn bộ tạp donor đều bị ion hoá. Trong điều kiện đó, nồng độ điện tử tự do của bán dẫn N xác định theo (2-1-3):  $n_n = N_d + P_n \approx N_d$

Còn nồng độ lỗ trống suy ra từ (2-1-14):

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d} \tag{2-1-15}$$

ta thấy, do nồng độ  $n_i$  tăng nhiều theo nhiệt độ [xem (2-1-13)] nên nồng độ hạt dẫn thiểu số càng tăng nhanh theo nhiệt độ.

Trên hình 2-1-8 là giản đồ năng lượng của điện tử trong bán dẫn loại P. Tạp acceptor có mức năng lượng  $W_a$  nằm trong vùng cấm, gần với đỉnh  $W_v$  của vùng hoá trị. Khi được cung cấp một năng lượng tương đối bé (nhờ nhiệt độ, ánh sáng v.v...), điện tử từ các mức phía trên các vùng hoá trị sẽ nhảy lên chiếm mức  $W_a$  để lại những mức trống tức là những lỗ. Còn nguyên tử tạp chất trở thành ion âm.



Hình 2.1.8. Giản đồ vùng năng lượng của bán dẫn P

Quá trình này tương ứng với hiện tượng một trong các mối liên kết của tạp chất nhóm 3 bị bỏ hỏ, điện tử từ nguyên tử bên cạnh đến thế chỗ và làm xuất hiện các lỗ trống .

Trong điều kiện toàn bộ tạp chất bị ion hoá (điều này thường xảy ra) nồng độ lỗ trống trong bán dẫn P xác định theo (2-1-7):  $p_a = N_a + n_p \approx N_a$

Còn nồng độ hạt dẫn thiểu số thì xác định dựa vào (2-1-14):

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_a} \tag{2-1-16}$$

Cũng như trường hợp trên rõ ràng là nồng độ này tăng nhanh theo nhiệt độ.

2.2. CHUYỂN ĐỘNG TRÔI VÀ KHUẾCH TÁN CỦA HẠT DẪN

2-2-1. Chuyển động trôi

Như đã biết, nếu đặt điện tử hoặc lỗ trống vào môi trường chân không thì khi có điện trường tác dụng, các hạt dẫn này sẽ chuyển động có gia tốc (nhanh dần hoặc chậm dần đều). Ở trong mạng tinh thể của chất rắn, tình hình xảy ra không hoàn toàn như vậy. Mạng tinh thể chứa rất

nhiều nguyên tử (kể ra các tạp chất), chúng luôn luôn dao động vì nhiệt. Vì vậy khi chịu tác dụng của điện trường, các hạt dẫn trên đường chuyển động có gia tốc sẽ va chạm với các nguyên tử của mạng tinh thể. Mỗi lần va chạm sẽ làm thay đổi trị số và chiều của vận tốc nghĩa là làm tán xạ chúng. Chuyển động của hạt dẫn trong mạng tinh thể chất rắn dưới tác dụng của điện trường như vậy được gọi là chuyển động trôi (hoặc chuyển động cuốn).

Trong chuyển động trôi, vận tốc trung bình của điện tử và lỗ trống sẽ tỷ lệ với cường độ điện trường (hoặc gradien điện thế) và đã gây ra chuyển động đó:

$$v_n = -\mu_n E = \mu_n \frac{d\phi}{dx} \quad (2-2-1)$$

$$v_p = \mu_p E = -\mu_p \frac{d\phi}{dx} \quad (2-2-2)$$

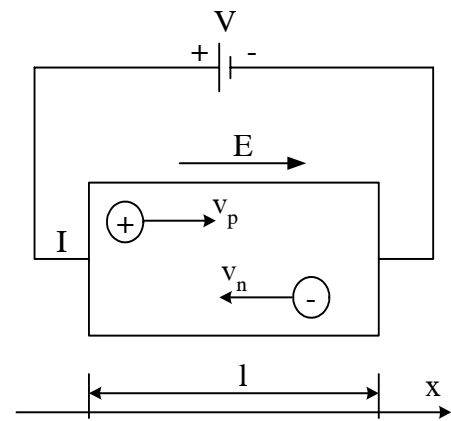
Hệ số tỷ lệ trong hai hệ thức trên gọi là độ linh động của điện tử ( $\mu_n$ ) hoặc của lỗ trống ( $\mu_p$ ). Về ý nghĩa, chúng là vận tốc trôi trung bình của hạt dẫn trong điện trường bằng đơn vị (1 V/cm). Trị số của  $\mu$  phụ thuộc vào nhiệt độ, vào nồng độ tạp chất. Ngoài ra, khi điện trường quá lớn, nó còn phụ thuộc cả vào cường độ điện trường. Ở nhiệt độ thường (300<sup>0</sup>K), giá trị điển hình của chúng như sau:

Trong Ge :  $\mu_n = 3800\text{cm}^2/\text{V.S}$ ,  $\mu_p = 1800\text{cm}^2/\text{V.S}$

Trong Si :  $\mu_n = 1300\text{cm}^2/\text{V.S}$ ,  $\mu_p = 500\text{cm}^2/\text{V.S}$

Dòng điện do chuyển động trôi của hạt dẫn gây nên được gọi là dòng điện trôi.

Để xác định dòng này, ta giả thiết đặt chất bán dẫn (có nồng độ điện tử và lỗ trống là n, p) vào trong điện trường cường độ E như h. 2-2-1 (E dương vì trùng với chiều dương của trục x).



Hình 2-2-1. Chuyển động trôi của hạt dẫn do tác dụng của điện trường

Số lượng điện tích đi qua một đơn vị tiết diện, trong một đơn vị thời gian (tức mật độ dòng trôi) sẽ là:

$$(j_n)_{tr} = (-q)n v_n = qn \mu_n E \quad (2-2-3)$$

$$(j_p)_{tr} = qn v_p = qn \mu_p E \quad (2-2-4)$$

( $v_n$  có dấu âm vì điện tử chạy ngược trục x). Hai dòng này cùng chiều. Vì vậy mật độ trôi tổng hợp sẽ bằng.

$$J_{tr} = (j_p)_{tr} + (j_n)_{tr} = q(p\mu_n + p\mu_p)E \quad (2-2-5)$$

Mặt khác nếu gọi  $\rho$  là điện trở suất (hoặc  $\sigma = 1/\rho$  là điện dẫn suất) của chất bán dẫn đang xét thì điện trở của khối bán dẫn vẽ trên H.2-2-1 xác định bởi:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S} \quad (2-2-6)$$

trong đó  $l$  là chiều dài,  $S$  là tiết diện của khối bán dẫn.

Khi có điện áp  $V$  đặt vào, mật độ dòng điện trôi qua chất bán dẫn xác định được theo định luật Ohm:

$$j_{tr} = \frac{I}{S} = \frac{V}{SR} \quad (2-2-7)$$

Thay  $R$  theo (2-2-6), đồng thời giả thiết điện trường trong khối bán dẫn là đều:  $E = V/l$  ta đi đến :

$$j_{tr} = \sigma E \quad (2-2-8)$$

So sánh (2-2-8) với (2-2-5), ta xác định được điện dẫn của suất bán dẫn:



$$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n) \quad (2-2-9)$$

Rõ ràng nồng độ hạt dẫn càng lớn, độ linh động của hạt dẫn càng cao thì điện dẫn suất của chất bán dẫn càng lớn (hoặc điện trở suất càng nhỏ)

Trường hợp bán dẫn thuần ( $n_i = p_i$ ):

$$\sigma_i = qn_i(\mu_p + \mu_n) \quad (2-2-9a)$$

Bán dẫn loại N ( $n_n \gg p_n$ ):

$$\sigma_n = qn_n\mu_n \quad (2-2-9b)$$

còn bán dẫn loại P ( $p_p \gg n_p$ ):

$$\sigma_p \approx qp_p\mu_p \quad (2-2-9c)$$

### 2.2.2. Chuyển động khuếch tán

Trong chất rắn, ngoài hình thức *chuyển động trôi dưới* tác dụng của điện trường, các hạt dẫn còn *chuyển động khuếch tán*. Dạng chuyển động này xảy ra cho mọi phần tử vật chất khi có sự *phân bố không đồng đều trong thể tích* (Nói cách khác: khi *gradient nồng độ khác không*).

Đối với chất bán dẫn, khi nồng độ điện tử hoặc lỗ trống phân bố không đồng đều, Chúng sẽ khuếch tán từ nơi nồng độ cao về nơi nồng độ thấp. Dòng điện do chuyển động có hướng này gây ra gọi là *dòng điện khuếch tán*.

Để đơn giản, giả thiết nồng độ điện tử hoặc lỗ trống phân bố không đồng đều theo một phương x nào đó (h2.2.2). Số lượng hạt dẫn khuếch tán qua một đơn vị tiết diện trong thời gian dt sẽ tỷ lệ với mức chênh lệch nồng độ ( $\frac{dp}{dx}; \frac{dn}{dx}$ , còn gọi: gradient nồng độ) và tỷ lệ với thời gian dt:

$$dP = -D_p \frac{dp}{dx} dt \quad (2-2-10)$$

$$dN = -D_n \frac{dn}{dx} dt \quad (2-2-11)$$

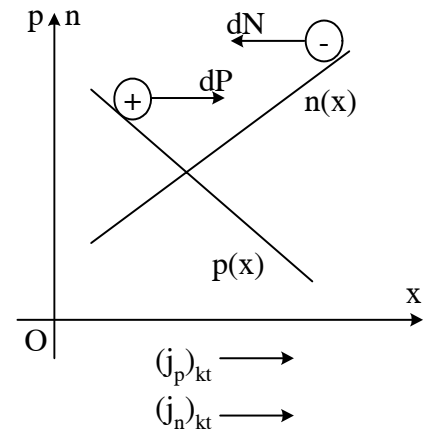
(dấu trừ vì khuếch tán và phía nồng độ giảm).

Hệ số tỷ lệ  $D_p, D_n$  được gọi là hệ số khuếch tán của lỗ trống và của điện tử.

Mật độ dòng điện khuếch tán do chuyển động trên gây ra (chiều dương quy ước là chiều trục x) sẽ là:

$$\begin{aligned} j_{kt} &= (j_p)_{kt} + (j_n)_{kt} = q \frac{dP}{dt} + (-q) \frac{dN}{dt} \\ &= -qD_p \frac{dp}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} = q \left( D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right) \end{aligned} \quad (2-2-12)$$

Trong ví dụ nêu trên H.2-2-2, theo chiều trục x, nồng độ p giảm dần, còn nồng độ n tăng dần, nghĩa là  $\frac{dp}{dx}$  âm, còn  $\frac{dn}{dx}$  dương. Vì vậy hai số hạng trong (2-2-12) là cùng dấu, nói cách



Hình 2-2-2. Phân bố không đều của hạt dẫn gây nên chuyển động khuếch tán

khác: dòng điện khuếch tán của điện tử và lỗ trống là cùng chiều. Đây chính là trường hợp của chuyển tiếp P-N (hoặc diode bán dẫn) mà ta sẽ đề cập ở phần sau.

Hệ số khuếch tán  $D_p, D_n$  phụ thuộc vào nhiệt độ và độ linh động của hạt dẫn. Người ta có hệ thức Einstein sau đây:

$$D_p = \varphi_T \mu_p \quad (2-2-13a)$$

$$D_n = \varphi_T \mu_n \quad (2-2-13b)$$

Trong đó  $\varphi_T$  là một hằng số, phụ thuộc nhiệt độ và có thứ nguyên của điện thế, gọi là điện thế nhiệt:

$$\varphi_T = \frac{kt}{q} \quad (2-2-14)$$

k: hằng số bolzman

q: điện tích điện tử

T: nhiệt độ tuyệt đối của chất bán dẫn

Ở nhiệt độ thường ( $T = 300^0K$ ), thay giá trị k và q vào sẽ có:

$$\varphi_T = 0,025V = 25mV \quad (2-2-15)$$

### 2-3. CHUYỂN TIẾP P-N VÀ ĐẶC TÍNH CHỈNH LƯU

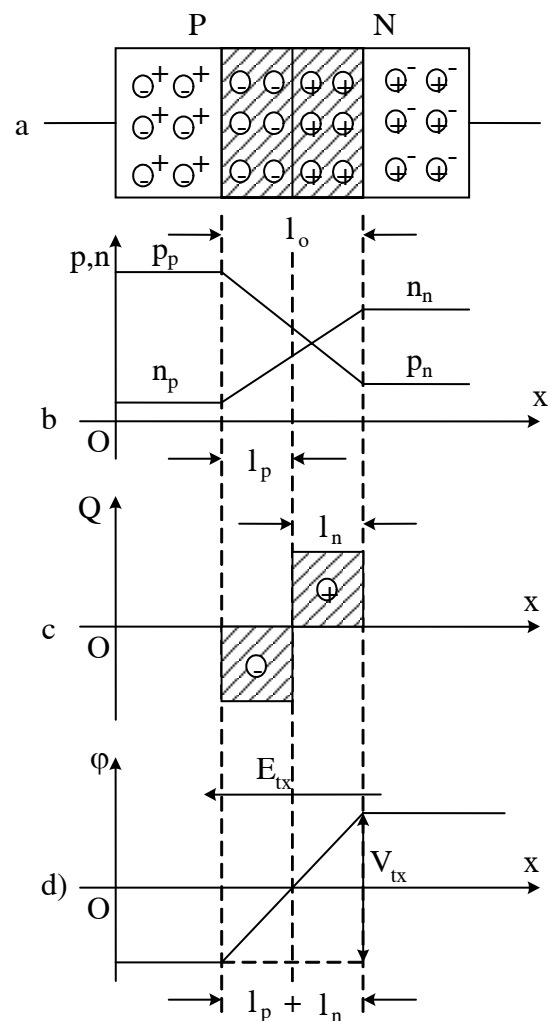
Sau khi đã có khái niệm về cơ chế dẫn điện của từng loại bán dẫn cùng các phương thức chuyển động của hạt dẫn trong chúng, chúng ta hãy khảo sát các hiện tượng xảy ra khi tiếp xúc hai bán dẫn khác loại.

#### 2.3.1. Chuyển tiếp P-N ở trạng thái cân bằng

Giả sử có hai khối bán dẫn loại P và loại N tiếp xúc nhau theo một tiết diện phẳng như h.2-3-1a.

Trước khi tiếp xúc, mỗi khối bán dẫn nằm ở trạng thái cân bằng (tổng điện tích cân bằng với tổng điện tích âm trong thể tích) đồng thời giả thiết rằng nồng độ hạt dẫn cũng như nồng độ tạp chất (acceptor, donor) phân bố đều, khi tiếp xúc nhau, do chênh lệch nồng độ ( $p_p \gg p_n; n_n \gg n_p$ ) sẽ xảy ra hiện tượng khuếch tán của các hạt dẫn đa số: lỗ trống khuếch tán từ P sang N, còn điện tử khuếch tán theo chiều ngược lại. Chúng tạo nên dòng điện khuếch tán (chiều từ P sang N) mà mật độ dòng tổng hợp đã xác định ở (2-2-12):

Trên đường khuếch tán, các điện tích khác dấu sẽ tái hợp với nhau, làm cho trong một vùng hẹp ở hai bên mặt ranh giới, nồng độ hạt dẫn giảm xuống rất thấp (hình 2-3-1b). Tại vùng đó (vùng có bề dày  $l_0$  trên hình 2-3-1a), Bên bán dẫn P hầu như chỉ còn lại các ion âm acceptor, còn bên bán dẫn N hầu như chỉ còn lại các ion donor, nghĩa là hình thành hai lớp điện tích không gian khác dấu đối diện nhau (h.2-3-1c). Giữa hai lớp điện tích này sẽ có một chênh lệch



Hình 2-3-1. Sự hình thành chuyển tiếp P-N; (a) phân bố nồng độ hạt dẫn; (b) mật độ điện tích; (c) phân bố điện thế; (d) theo phương x

điện thế (bên N dương hơn bên P) gọi là *hiệu thế tiếp xúc*  $V_{tx}$  (h.2-3-1,d). Nói cách khác: trong vùng lân cận mặt ranh giới đã xuất hiện một điện trường (hướng từ N sang P) gọi là *điện trường tiếp xúc*  $E_{tx}$

Vùng hẹp nói trên là *vùng nghèo* hoặc chuyển tiếp P-N. Nồng độ hạt dẫn trong vùng này chỉ còn rất thấp, cho nên điện trở suất của nó rất lớn so với các vùng còn lại.

Do tồn tại điện trường tiếp xúc, các *hạt dẫn thiểu số* của hai miền sẽ bị cuốn về phía đối diện: lỗ trống của bán dẫn N chạy về phía cực âm của điện trường, điện tử của bán dẫn P chạy về phía cực dương của điện trường. Chúng tạo nên *dòng điện trôi*, ngược chiều với dòng khuếch tán của hạt dẫn đa số. Mật độ dòng điện trôi xác định theo (2-2-8) và (2-2-9):

$$j_{tr} = \sigma E_{tx} = q(p_n \mu_p + n_n \mu_n) E_{tx} \quad (2-3-2)$$

Nồng độ hạt dẫn đa số trong hai khối bán dẫn càng chênh lệch thì hiện tượng càng khuếch tán càng mãnh liệt và quá trình tái hợp càng nhiều, do đó điện trường tiếp xúc càng tăng và dòng điện trôi của hạt dẫn thiểu số cũng càng tăng. Vì vậy, chỉ sau một khoảng thời gian rất ngắn, dòng trôi và dòng khuếch tán trở nên cân bằng nhau, triệt tiêu nhau và dòng tổng hợp qua mặt ranh giới sẽ bằng không

$$j = j_{kt} - j_{tr} = 0 \quad (2-3-3)$$

Ta nói: chuyển tiếp P-N đạt tới *trạng thái cân bằng*. Ứng với trạng thái đó, hiệu thế tiếp xúc (hoặc điện trường tiếp xúc) giữa bán dẫn N và bán dẫn P có một giá trị nhất định.

Người ta chứng minh được giá trị này tỷ lệ với lượng chênh lệch nồng độ hạt dẫn trong hai khối hạt dẫn:

$$V_{tx} = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (2-3-4)$$

$\varphi_T$  là điện thế nhiệt [xem (2-2-14)]

Thông thường, hiệu thế tiếp xúc vào cỡ 0,35V (đối với Ge) hoặc 0,7V (đối với Si). Hiệu thế này ngăn cản, không cho hạt dẫn tiếp tục chuyển động qua mặt ranh giới, duy trì trạng thái cân bằng, nên được gọi là "*hàng rào điện thế*".

Người ta cũng xác định bề dày  $l_0$  của vùng nghèo ở trạng thái cân bằng *tỷ lệ nghịch* với nồng độ tạp chất trong hai khối bán dẫn. Chẳng hạn đối với chuyển tiếp P-N kiểu "*đột biến*" (chế tạo theo phương pháp "hợp kim") thì:

$$l_0 = l_p + l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon}{q} V_{tx} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} \quad (2-3-5)$$

$l_p, l_n$  là phần bề dày vùng nghèo nằm trong bán dẫn P và bán dẫn N (xem h.2-3-1 b)

$\varepsilon_0$ : hằng số điện môi của chân không,  $\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^{-14}$  F/cm

$\varepsilon$ : hằng số điện môi tương đối của chất bán dẫn

thông thường  $l_0$  rất bé, cỡ  $10^{-5} \div 10^{-4}$  cm.

Nếu nồng độ tạp chất trong hai bán dẫn rất chênh lệch, ví dụ  $N_a \gg N_d$  thì  $l_p \ll l_n$  và

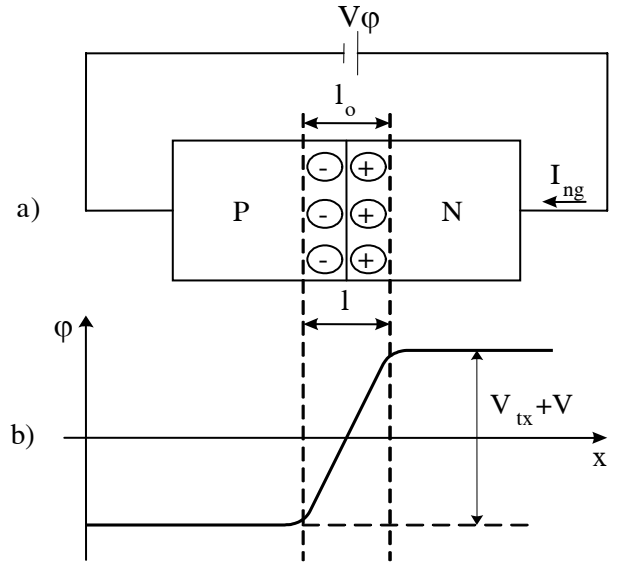
$$l_0 \approx l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon V_{tx}}{qN_d}} \quad (2-3-6)$$

nghĩa là miền nghèo nằm lệch về miền bán dẫn nào có nồng độ tạp chất thấp hơn (tức điện trở suất cao hơn).

### 2.3.2. Chuyển tiếp P-N khi có điện áp ngoài - Đặc tính chỉnh lưu

Hãy khảo sát các hiện tượng xảy ra trong chuyển tiếp P-N khi có tác dụng của điện áp ngoài.

Giả sử nguồn điện áp  $V$  được nối như H. 2-3-2a (P nối cực âm, N nối cực dương, gọi là *phân cực nghịch*). Giả thiết điện trở của chất bán dẫn ở ngoài vùng nghèo (thường gọi: *miền trung hòa*) là không đáng kể. Lúc đó hình như toàn bộ điện áp  $V$  sẽ đặt vào vùng nghèo, xếp chồng lên hiệu thế tiếp xúc  $V_{tx}$ . Tình trạng cân bằng trước đây không còn nữa. Điện trường  $E$  (do điện áp  $V$  gây ra) cùng chiều với  $E_{tx}$  sẽ làm hạt dẫn đa số của hai bán dẫn rời xa khỏi mặt ranh giới, đi về hai phía. Do đó *vùng nghèo bị mở rộng* ( $l > l_0$ ), điện trở của nó tăng. Hàng rào điện thế trở thành:  $V_{tx} + V$  (h.2-3-2,b) khiến dòng khuếch tán của hạt dẫn đa số giảm xuống rất nhỏ, còn dòng trôi của hạt dẫn thiểu số thì tăng theo  $V$ . Nhưng nồng độ hạt dẫn thiểu số vốn rất bé, cho nên trị số dòng này chỉ rất nhỏ. Nó nhanh chóng đạt tới giá trị bão hoà  $I_s$  ngay khi  $V$  còn rất thấp.



Hình 2.3.2. Chuyển tiếp P-N phân cực nghịch (a) và phân bố điện thế theo phương x (b)

Người ta chứng minh được: dòng tổng hợp qua chuyển tiếp P-N (với chiều dương quy ước là chiều từ P sang N) ở trạng thái này có dạng:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right) - 1 \right] = I_s \left[ \exp\left(\frac{-V}{\phi T}\right) - 1 \right] \approx -I_s \quad (2-3-7)$$

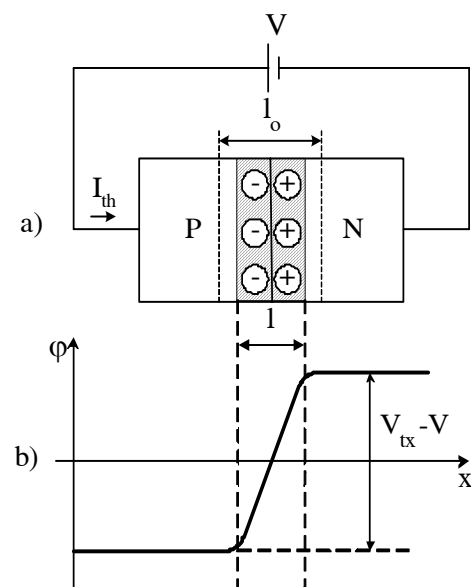
nghĩa là *khi bị phân cực nghịch*, dòng qua chuyển tiếp P-N *chạy theo chiều âm và trị số rất bé*. Ta gọi là dòng điện ngược.  $I_s$  còn có tên là *dòng ngược bão hòa*.

Khi nguồn điện áp  $V$  được mắc như hình 2-3-3a (P nối cực dương, N nối cực âm, thường gọi *phân cực thuận*) thì tình hình sẽ trái ngược lại. Hàng rào điện thế giảm độ cao, chỉ còn  $V_{tx} - V$  cho nên hạt dẫn đa số của hai bán dẫn sẽ “tràn qua hàng rào” sang miền đối diện (gọi là hiện tượng “phun hạt dẫn” hoặc “chích hạt dẫn”, từ chữ injection). Tình trạng thiếu hạt dẫn trong vùng nghèo sẽ được giảm bớt, khiến bề dày vùng nghèo thu hẹp ( $l < l_0$ ) và điện trở của vùng này giảm. Dòng hạt dẫn đa số (do hiện tượng “phun hạt dẫn” gây nên) tăng nhanh theo điện áp  $V$ , còn dòng trôi của của hạt dẫn thiểu số thì giảm theo  $V$ . Tuy vậy, dòng hạt dẫn thiểu số này vốn rất bé nên có thể coi như không đổi.

Như vậy dòng tổng hợp qua chuyển tiếp P-N sẽ là:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \approx I_s \exp\left(\frac{V}{\phi T}\right) \quad (2-3-8)$$

Ta gọi là dòng điện thuận. Trị số của nó rất lớn hơn dòng điện ngược và tăng nhanh theo điện áp thuận  $V$



Hình 2.3.2. Chuyển tiếp P - N phân cực thuận (a) và phân bố điện thế theo phương x (b)

Cũng cần lưu ý thêm rằng: điện áp thuận càng tăng, bề dày vùng nghèo càng giảm và độ cao hàng rào thế  $V_{tx} - V$  càng giảm. Khi  $V = V_{tx}$ , hàng rào thế biến mất, dòng qua chuyển tiếp P-N theo chiều thuận sẽ vô cùng lớn, phá hỏng miền tiếp xúc. Đây là trạng thái khi sử dụng cần phải tránh chuyển tiếp P-N phân cực thuận sau này.

Tóm lại, chuyển tiếp P-N (còn gọi: mối nối P-N hay vùng nghèo) là bộ phận quan trọng nhất của tiếp xúc của hai bán dẫn khác loại. Tùy theo điện áp đặt vào theo chiều thuận hay nghịch mà nó có đặc tính khác nhau. Khi phân cực thuận, vùng nghèo hẹp, điện trở nhỏ, dòng điện lớn và tăng nhanh theo điện áp; khi phân cực nghịch, vùng nghèo mở rộng, điện trở rất lớn, dòng chạy qua rất nhỏ và ít thay đổi theo điện áp. Như vậy, chuyển tiếp P-N dẫn điện theo hai chiều không giống nhau. Nếu có điện áp xoay chiều đặt vào thì nó chỉ dẫn điện chủ yếu theo một chiều.

Ta gọi đó là *tính chất van hoặc đặc tính chỉnh lưu*.

Biểu thức dòng điện qua chuyển tiếp P-N, tổng quát hóa cho cả hai trường hợp trên đây, có dạng:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (2-3-9)$$

trong đó  $V$  là *điện áp đặt vào*, lấy dấu *dương* khi phân cực thuận, lấy dấu *âm*, khi phân cực nghịch.

$I_s$  là *dòng ngược bão hòa*, giá trị phụ thuộc vào nồng độ hạt dẫn *thiểu số* trong hai chất bán dẫn:

$$I_s = qS \left( \frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \quad (2-3-10)$$

trong đó:

$q$ : điện tích điện tử.

$S$ : diện tích mặt tiếp xúc

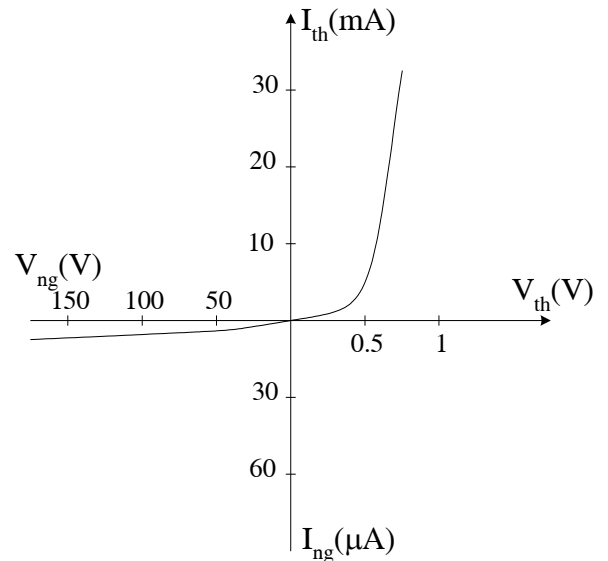
$D_p, D_n$ : *hệ số khuếch tán* của lỗ trống và điện tử

$L_p, L_n$ : *độ dài khuếch tán* của chúng (về ý nghĩa đó là quãng đường trung bình mà hạt dẫn khuếch tán qua để nồng độ giảm đi  $e$  lần).

Thông thường, giá trị  $I_s$  rất nhỏ, nhưng như đã thấy ở (2-1-15), (2-1-16), nồng độ hạt dẫn thiểu số tăng nhanh theo nhiệt độ, cho nên *dòng  $I_s$  cũng tăng nhanh theo nhiệt độ*. Bởi lý do này  $I_s$  còn có tên "*Dòng điện nhiệt*".

Đồ thị nêu quan hệ giữa dòng điện và điện áp của chuyển tiếp P-N, xây dựng theo (2-3-4) có dạng như H.2-3-4: về phía thuận, dòng điện tăng nhanh theo điện áp, còn về phía ngược, dòng điện rất nhỏ, gần như ít thay đổi.

Thật ra đặc tuyến Vôn-Ampe của các chuyển tiếp P-N trong thực tế hơi khác với đặc tuyến lý thuyết ở hình 2-3-4. Để điều chỉnh cho phù hợp nhau, người ta thay (2-3-9) bởi hệ số thức:



Hình 2.3.4. Đặc tuyến Vôn-Ampe của chuyển tiếp P-N

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{m_T}\right) - 1 \right] \quad (2-3-11)$$

Trong đó  $m$  là hệ số hiệu chỉnh, và thường có giá trị:

$$m = 1 \div 2 \quad (2-3-11)$$

Để đặc trưng cho sự tăng nhanh dòng điện ngược theo nhiệt độ, người ta gọi  $\Delta T^*$  là khoảng nhiệt độ đủ làm tăng gấp đôi giá trị dòng điện ngược:

$$\text{Đối với Ge : } \Delta T^* \approx 8^\circ\text{C} \quad (2-3-13a)$$

$$\text{Đối với Si : } \Delta T^* \approx 5^\circ\text{C} \quad (2-3-13b)$$

Tương tự, để đặc trưng cho sự thay đổi theo nhiệt độ của điện áp thuận (ứng với một dòng điện không đổi), người ta dùng hệ số nhiệt của điện áp thuận:

$$\varepsilon_T = \frac{d}{dT} V_{th} \quad (2-3-14a)$$

thông thường :

$$\varepsilon_T = -(2 \div 2,5) \text{ mV}^\circ\text{C} \quad (2-3-14b)$$

Nghĩa là khi nhiệt độ tăng  $1^\circ\text{C}$ , điện áp thuận (ứng với dòng điện không đổi) trên chuyển tiếp P-N giảm đi vài mV.

### 2-3-3. Hiện tượng đánh thủng chuyển tiếp P-N

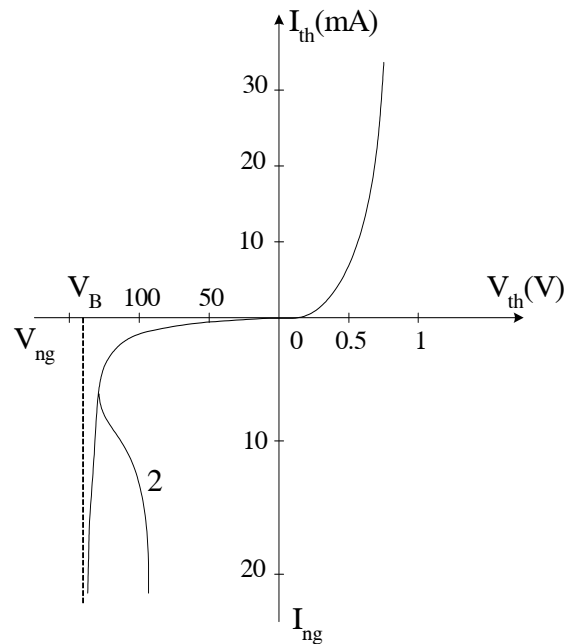
Khi chuyển tiếp P-N bị phân cực nghịch, nếu điện áp ngược tăng đến một giá trị khá lớn nào đó thì dòng điện ngược trở nên tăng vọt, nghĩa là chuyển tiếp P-N dẫn điện mạnh cả theo chiều nghịch, phá hỏng đặc tính van vôn có của nó. Hiện tượng này được gọi là *hiện tượng đánh thủng*. Giá trị điện áp ngược khi xảy ra quá trình này thường ký hiệu là  $V_B$  (*điện áp đánh thủng*)

Nguyên nhân dẫn đến đánh thủng có thể do điện hoặc do nhiệt, vì vậy người ta thường phân biệt hai dạng: *đánh thủng về điện* và *đánh thủng về nhiệt*. Có khi cả hai nguyên nhân đó kết hợp lại với nhau và tăng cường lẫn nhau, gây ra một dạng đánh thủng thứ ba là *đánh thủng điện - nhiệt*.

Đánh thủng về điện phân làm hai loại: *đánh thủng thác lũ* (avalanche) và *đánh thủng xuyên hầm* (tunnel)

Đánh thủng thác lũ thường xảy ra một trong các chuyển tiếp P-N có bề dày lớn, điện trường trong vùng nghèo có trị số khá lớn. Điện trường này gia tốc cho các hạt dẫn, gây ra *hiện tượng ion hóa* vì va chạm làm sản sinh những đôi điện tử - lỗ trống. Các hạt dẫn vừa sinh ra này lại tiếp tục được gia tốc và ion hóa các nguyên tử khác ..., cứ như thế số lượng hạt dẫn tăng lên gấp bội, khiến dòng điện tăng vọt.

Đánh thủng xuyên hầm xảy ra ở những vùng nghèo tương đối hẹp, tức là chuyển tiếp của những bán dẫn có nồng độ tạp  $N_a, N_d$  rất lớn. Điện trường trong vùng nghèo rất lớn, có khả năng gây ra hiệu ứng “xuyên hầm”, tức là điện tử trong vùng hoá trị của bán dẫn P có khả năng “chui qua” hàng rào thế để chạy sang vùng dẫn N, làm cho dòng điện tăng vọt.



Hình 2.3.5

Đặc tuyến Vôn-Ampe của hai dạng đánh thủng nói trên gần như *song song với trục tung* (h.2-3-5, nhánh số 1). Khi nhiệt độ môi trường tăng, giá trị điện áp đánh thủng theo cơ chế xuyên hầm *bị giảm* (tức hệ số nhiệt của  $V_B$  âm), còn điện áp đánh thủng theo cơ chế thác lũ, lại tăng (hệ số nhiệt của  $V_B$  dương).

Đánh thủng về nhiệt xảy ra do *sự tích lũy nhiệt trong vùng nghèo*. Khi có điện áp ngược lớn, dòng điện ngược tăng làm nóng chất bán dẫn, khiến nồng độ hạt dẫn thiểu số tăng và do đó lại làm dòng điện ngược tăng nhanh, dẫn tới đánh thủng. Trị số của điện áp đánh thủng về nhiệt phụ thuộc vào dòng điện ngược ban đầu, vào nhiệt độ môi trường và điều kiện tỏa nhiệt của chuyển tiếp P-N. Đặc tuyến vôn-ampe có đoạn *điện trở âm*, nghĩa là dòng điện ngược tăng vọt trong khi điện áp trên hai đầu chuyển tiếp P-N giảm xuống (nhánh 2 trên H.2-3-5). Đánh thủng về nhiệt thường gây ra những hậu quả tai hại, phá hỏng vĩnh viễn đặc tính chỉnh lưu của chuyển tiếp P-N. Còn đánh thủng về điện, nếu có biện pháp hạn chế dòng điện ngược sao cho công suất tiêu tán chưa vượt quá giá trị cực đại cho phép thì chuyển tiếp P-N vẫn có thể hồi phục lại đặc tính chỉnh lưu của mình.

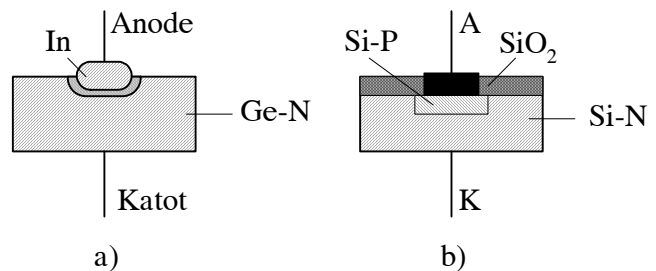
#### 2-4. Diode bán dẫn

Diode bán dẫn là tên gọi chung của một họ linh kiện hai cực, cấu tạo cơ bản dựa trên chuyển tiếp P-N. Điện cực nối với bán dẫn P gọi là *anôt*, nối với bán dẫn N gọi là *katôt*. Nguyên lý hoạt động và đặc tính Vôn-Ampe của chuyển tiếp P-N đã giới thiệu ở 2-3, qua đó thể hiện một tính chất quan trọng và tính chất dẫn điện theo một chiều. Sử dụng tính chất này, người ta chế tạo ra diode tách sóng v.v... Bên cạnh đó, người ta lợi dụng cả những đặc tính khác và chế tạo ra những loại diode chuyên dụng. Dưới đây dưới thiệu vài loại diode thường gặp cùng những thông số đặc trưng của chúng.

##### 2-4-1. diode chỉnh lưu

Trên hình 2-4-1a là kết cấu điển hình của loại diode chỉnh lưu, chế tạo theo *phương pháp hợp kim*.

Trên mặt phẳng đơn tinh thể Ge loại N có đặt một chất thuộc nhóm 3, ví dụ hạt indi (In). Khi nung hệ thống đó trong môi trường thông khí hydrô, In sẽ bị nóng chảy, một bộ phận của Ge sẽ hòa tan vào đấy. Sau đó khi nhiệt độ giảm dần, nồng độ hòa tan của Ge trong In sẽ giảm, dưới đáy giọt In sẽ xuất hiện một lớp Ge tái kết tinh trong đó chứa những nguyên tử In, nghĩa là tạo thành một lớp Ge loại P. Còn phía trên hầu như chỉ có In thuần túy, đóng vai trò như một lớp kim loại. Như vậy là đã hình thành tiếp xúc của Ge loại P và Ge loại N, nghĩa là đã tạo ra chuyển tiếp P-N có tính chỉnh lưu.



Hình 2.4.1. Cấu tạo của diode chỉnh lưu

Người ta gắn hai sợi kim loại (thường bằng Ni) với hạt In và với phiến Ge ban đầu, dùng làm dây dẫn, toàn bộ hệ thống đó được đặt trong một vỏ kim loại (hoặc nhựa) gắn kín, hai dây dẫn nối trực tiếp với hai cực (anôt, katôt) ở bên ngoài.

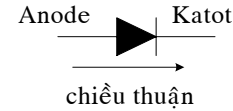
Diode chỉnh lưu cũng có thể chế tạo theo phương pháp khuếch tán (H.2-4-1b)

Chẳng hạn phiến đơn tinh thể Si loại N, được đặt trong lò nhiệt độ cao, bên cạnh nguồn tạp chất thuộc nhóm 3, ví dụ Bore (B). Do tác dụng của nhiệt độ, các nguyên tử B sẽ khuếch tán xuyên qua “cửa sổ” đã khoét sẵn trên màng bảo vệ  $SiO_2$ , thấm sâu vào thể tích của phiến Si loại N, tạo

ra một lớp bán dẫn loại P và từ đó hình thành chuyển tiếp P-N. Sau đó là quá trình gắn điện cực và đóng vỏ.

Như vậy bộ phận cơ bản của diode là *chuyển tiếp P-N*, có đặc tính chỉ dẫn điện chủ yếu theo một chiều và thường được ứng dụng để biến điện xoay chiều thành điện một chiều (do đó có tên *diode chỉnh lưu*).

Hình dáng bề ngoài của vài loại diode chỉnh lưu và ký hiệu quy ước của chúng giới thiệu trên h. 2-4-2. Đặc tuyến trên *Vôn-Ampe lý thuyết*, xây dựng theo biểu thức (2-3-9) đã trình bày ở H.2-3-4. Đặc tuyến của diode chỉnh lưu trong thực tế, (loại chế tạo bằng Silic, nhóm dòng điện nhỏ) như hình 2-4-3. Ta thấy: khi điện áp thuận nhỏ hơn giá trị  $V_\gamma \approx 0,6V$  (đối với diode làm bằng Ge thì dòng điện thuận còn bé, chưa đáng kể. Chỉ khi  $V_{th}$  vượt quá “điện áp mở”  $V_\gamma$  thì  $V_\gamma \approx 0,6V$ ) dòng điện mới tăng nhanh theo điện áp, hơn nữa đoạn đặc tuyến này gần như một đường thẳng với độ dốc không đổi. Vì vậy có thể biểu thị diode phân cực thuận bằng sơ đồ tương đương trên H.2-4-4.



Hình 2.4.2. Ký hiệu của diode bán dẫn

Dòng điện ngược có giá trị rất nhỏ (cỡ  $\mu A$  hay bé hơn). Khi điện áp ngược tăng, dòng điện ngược thực tế tăng dần và khi đạt đến điện áp đánh thủng  $V_B$  (ví dụ  $V_B = 60V$  trên H. 2-4-3) thì dòng ngược tăng vọt. Nếu không có biện pháp hạn chế dòng điện để ngăn ngừa sự vượt quá công suất cho phép thì quá trình đánh thủng này sẽ làm hỏng diode.

Các tham gia số của diode chỉnh lưu bao gồm

1- Điện trở một chiều (điện trở đối với dòng một chiều)

Theo chiều thuận,  $R_{th} = \frac{V_{th}}{I_{th}}$  có giá trị rất bé (mấy  $\Omega$  đến mấy chục  $\Omega$ )

Còn theo chiều nghịch,  $R_{ng} = \frac{V_{ng}}{I_{ng}}$  có giá trị rất lớn (hàng trăm  $K\Omega$ )

2-Điện trở xoay chiều (còn gọi điện trở vi phân)

$$r_d = \frac{dV}{dI} \quad (2-4-1)$$

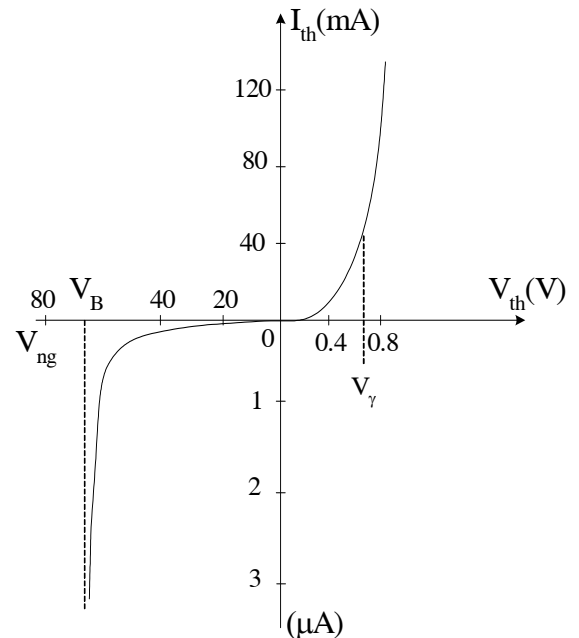
Tham số này chính là nghịch đảo độ dốc đặc tuyến *Vôn-Ampe* của diode.

Về phía thuận, đặc tuyến diode có dạng dốc đứng,  $r_d$  tương đối nhỏ. Còn về phía ngược, trong miền đặc tuyến gần như nằm ngang, dòng điện ngược rất nhỏ, giá trị  $r_d$  tương ứng sẽ rất lớn.

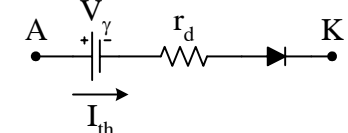
Dựa vào biểu thức tổng quát (2-3-9), ta dễ dàng suy ra:

$$V = \varphi_T \ln \left( \frac{I + I_S}{I_S} \right) \quad (2-4-2)$$

Do đó khi diode phân cực thuận:



Hình 2.4.3. Đặc tuyến V-A của diode Si trong thực tế



Hình 2.4.4. Sơ đồ tương đương của diode phân cực thuận



$$r_d = \frac{dV_{th}}{dI_{th}} = \frac{\varphi_T}{I + I_S} \approx \frac{\varphi_T}{I} \quad (2-4-3a)$$

Ở nhiệt độ thường ( $T = 300^{\circ}\text{K}$ ),  $\varphi_T \approx 25\text{mV}$ , vì vậy có thể xác định:

$$r_d = \frac{25^{(\text{mV})}}{I^{(\text{mA})}} (\Omega) \quad (2-4-3b)$$

Nghĩa là  $r_d$  giảm khi dòng điện thuận tăng.

Còn khi  $r_d$  phân cực ngược, dòng điện ngược xấp xỉ bằng không nên:

$$r_{d,\text{ng}} = \frac{\varphi_T}{I_S} \quad (2-4-4)$$

có giá trị rất lớn và ít thay đổi theo vị trí điểm làm việc.

### 3 – Điện dung tương đương (điện dung chuyển tiếp P-N)

Khi có tín hiệu xoay chiều đặt vào, ngoài điện trở vi phân, diode còn được đặc trưng bởi điện dung tương đương của nó. Trên thực tế, đây chính là điện dung của chuyển tiếp là  $C_o$ . Điện dung này bao gồm hai thành phần:

$$C_o = C_{h,\text{rào}} + C_{k,\text{tán}} \quad (2-4-5)$$

- a) Điện dung hàng rào ( $C_{h,\text{rào}}$ ) liên quan với sự hình thành hai miền điện tích khác nằm đối diện nhau trong vùng nghèo (xem h. 2-3-1b). hai miền điện tích này tương ứng như hai lớp điện tích tụ trên hai bản cực của một tụ điện. Khi tăng dần điện áp phân cực nghịch cho diode, bề trong vùng nghèo tăng, nghĩa là khoảng cách giữa hai lớp điện tích khác dấu của tụ điện càng tăng, cho nên  $C_{h,\text{rào}}$  giảm.

Người ta đã xác định: đối với chuyển tiếp P-N kiểu đột biến (nồng độ tạp chất ở hai bên mặt tiếp xúc thay đổi đột ngột). Đồng thời nồng độ hạt dẫn đa số trong hai chất bán dẫn rất khác nhau (tức là điện trở suất kém nhau rất nhiều lần) thì  $C_{h,\text{rào}}$  giảm theo điện áp ngược với quy luật:

$$C_{h,\text{rào}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l_0} \sqrt{\frac{V_{tx}}{V_{tx} - V}} \quad (2-4-6)$$

Trong đó S: diện tích mặt tiếp xúc P-N,  $\epsilon_0 \epsilon$ : hằng số điện môi của chất bán dẫn,  $V_{tx}$ : hiệu thế tiếp xúc; V: điện áp ngược (lấy dấu âm),  $l_0$ : bề dày vùng nghèo ở trạng thái cân bằng (chứa phân cực).

Còn đối với chuyển tiếp P-N – kiểu biến đổi chậm (nồng độ tạp chất thay đổi từ qua mặt tiếp xúc) thì:

$$C_{h,\text{rào}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l_0} \sqrt[3]{\frac{V_{tx}}{V_{tx} - V}} \quad (2-4-7)$$

Điện dung hàng rào thường phát huy ảnh hưởng khi diode phân cực nghịch. Trong trạng thái đó, điện trở vi phân của diode (mắc song song với  $C_{h,\text{rào}}$ ) có giá trị rất lớn, vì vậy vai trò của điện dung này càng thể hiện rõ.

- b) Điện dung khuếch tán ( $C_{k,\text{tán}}$ ) tương ứng với hiện thực “phun” hạt dẫn qua lại giữa miền P và miền N khi phân cực thuận.

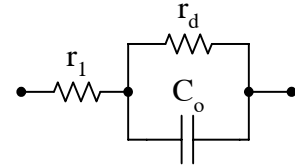
Lúc đó do hàng rào thế giảm thấp, trong mỗi chất bán dẫn được “bơm” vào một số lượng hạt dẫn (từ miền đối diện), tạo nên một nồng độ điện tích không cân bằng. Nồng độ này thay đổi theo sự tăng giảm của điện áp thuận, nghĩa là có sự biến thiên mật độ điện tích theo điện áp. Tính chất này đặc trưng cho một điện áp. Tính chất này đặc trưng cho một tụ điện. Người ta gọi đó là điện dung khuếch tán bởi vì chính sự tích lũy các điện tích không cân bằng này làm cơ sở cho chuyển động khuếch tán của hạt dẫn vào sâu hai miền.

Phân chia làm hai loại điện dung như trên chỉ có tính chất quy ước, nhưng rất thuận tiện cho sử dụng. Và lại, vai trò của hai điện dung đó không giống nhau khi chuyển tiếp P-N được phân cực

khác nhau: Khi có điện áp thuận, sự phân bố điện tích không cân bằng trong hai chất bán dẫn (bên ngoài vùng nghèo) đóng vai trò chính, do đó  $C_{k.tán}$  chiếm vị trí quan trọng. Trái lại khi có điện áp nghịch, điện tích ở bên ngoài vùng nghèo thay đổi ít và do đó  $C_{k.tán}$  đóng vai trò quan trọng.

Như vậy, mạch tương đương của một diode đối với tín hiệu xoay chiều sẽ như h.2-4-5.

$r_1$  là điện trở của hai chất bán dẫn (bên ngoài vùng nghèo), thông thường có thể bỏ qua.  $r_d$  là điện trở vi phân,  $C_o$  là điện dung tương đương của diode. Trị số của chúng thay đổi tùy theo dấu và trị số của điện áp đặt vào.



Hình 2.4.5. Mạch tương đương của diode với tín hiệu xoay chiều

Với tín hiệu tần số thấp, ảnh hưởng của  $C_o$  có thể bỏ qua.

Nhưng khi tần số tín hiệu tăng, có thể bỏ qua. Nhưng khi tần số tín hiệu tăng, vai trò của  $C_o$  ngày càng đáng kể.

Chính điện dung này làm giảm trở kháng theo chiều

ngược ở tần số cao, làm xấu đặc tính chỉnh lưu của diode và làm chậm tốc độ đóng mở của diode khi sử dụng chúng như một khóa điện tử sau diode

#### 4 – Một vài tham số giới hạn khác

Ngoài các tham số đặc trưng cho trạng thái làm việc thông thường trên đây, khi sử dụng, để tránh hư hỏng, ta còn phải chú ý đến các giới hạn không được vượt quá. Đó là:

- Điện áp ngược của đại cho phép  $V_{ng,max}$  (để không có đánh thủng)
- Dòng điện thuận của cực đại cho phép  $I_{max}$
- Công suất tiêu hao cực đại cho phép  $P_{max}$
- Tần số cực đại cho phép của tín hiệu xoay chiều  $f_{max}$

Bảng 2-1 giới thiệu tham số của vài loại diode chỉnh lưu trong thực tế

**Bảng 2-1**

Tên gọi	Dòng chỉnh lưu Trung bình	Điện áp ngược cực đại
1N 4001	1 (Ampe)	50 (volt)
1N4936	1	400
1N5406	3	600
1N1206B	12	600

**Bài tập 2-1.** Cho mạch điện như hình 2-4-6a. Diode D chế tạo từ vật liệu Ge có điện áp mở  $V_\gamma = 0,2V$ , nội trở  $r_d$  không đáng kể. Tải  $R_L = 9\Omega$ , nguồn tín hiệu vào có nội trở  $r_i = 2\Omega$ .

- a) Biết điện áp vào  $v_i$  có dạng xung vuông hoặc hình sin, biên độ 10V. Hãy vẽ dạng sóng và xác định áp trên tải  $v_L(t)$ .
- b) Vẫn câu hỏi trên nhưng khi  $v_i(t)$  là hình sin, biên độ 1V. Xác định giá trị điện áp trên tải tại thời gian  $\omega t = \pi/2$

#### Giải

- a) Trong khoảng thời gian mà  $v_i > V_\gamma$ , diode D dẫn điện, có:

$$v_L(t) = (v_i - V_\gamma) \frac{R_L}{r_i + R_L} \approx v_i(t) \frac{R_L}{r_i + R_L} = 0,9 v_i(t)$$

(coi  $V_\gamma \approx 0$ ).

Trong khoảng thời gian mà  $v_i < V_\gamma$ , diode D khóa,  $i \approx 0$ ,  $v_L(t) = 0$ . Dạng sóng của  $v_L(t)$  xem hình 2-4-6b,c.

- b) Khi  $v_i$  nhỏ, không thể bỏ qua  $V_\gamma$ . Diode chỉ dẫn điện trong khoảng thời gian mà  $v_i > V_\gamma$  (h.2-4-6d), ví dụ trong khoảng  $(t_1, t_2)$  có:

$$v_L(t) = I(t)R_L = \frac{(v_i - V_\gamma)R_L}{r_i + R_L} = \frac{(\sin \omega t - 0,2)}{10} \cdot 9$$

thời gian điểm  $\omega t = \pi/2$

$$v_L = \frac{1 - 0,2}{10} \cdot 9 = 0,72 \text{ V}$$

**Bài tập 2-2.** Nguồn một chiều  $V_i$ , một trở  $R_i$  và nguồn xoay chiều  $v_i$ , nội trở  $r_i$  cùng đặt vào diode D và tải  $R_L$  như h.2-4-7a. Coi nội trở của diode là không đáng kể.

- a) Hãy dùng phép tương đương Thévenin đơn giản hoá mạch điện đã cho.  
 b) Biết  $V_i = 5\text{V}$ ,  $R_i = 1\text{K}\Omega$ ,  $v_i = 10\sin\omega t$ ,  $r_i = 1,5 \text{ K}\Omega$ ,  $R_L = 1,4 \text{ K}\Omega$

Hãy vẽ dạng sóng của dòng điện chạy qua tải cũng như điện áp trên tải, biết rằng diode có dòng ngược  $I_S = 10^{-6} \text{ mA}$  (Bài tập này giúp làm quen với phương pháp đồ thị)

Giải

- a) Hãy thiết lập mạch tương đương Thévenin cho phần mạch ngoài diode (phần mạch giữa hai điểm A-K, hình 2-4-7b)

Áp dụng nguyên lý xếp chồng đối với hai nguồn điện áp  $V_i$  và  $v_i$

Khi chỉ có  $V_i$ , còn  $v_i = 0$  thì điện áp giữa hai điểm A-K là:

$$V_{AK} = V_i \frac{r_i}{R_i + r_i}$$

Khi chỉ có  $v_i$ , còn  $V_i = 0$  thì điện áp giữa hai điểm A-K là:

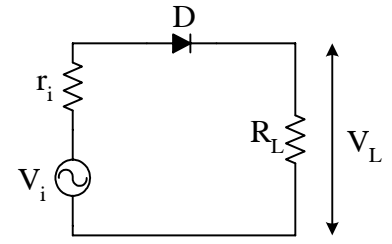
$$v_{AK} = v_i \frac{R_i}{R_i + r_i}$$

Vậy khi tác động đồng thời cả  $V_i$  và  $v_i$  thì sức điện động tương đương thevenin đặt giữa hai điểm A-K là:

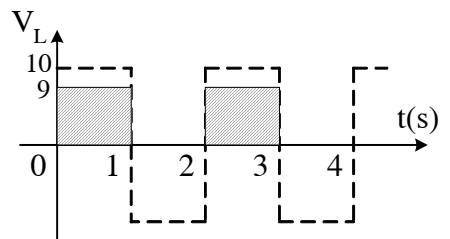
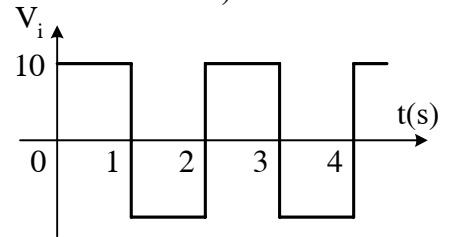
$$v_T = V_i \frac{r_i}{R_i + r_i} + v_i \frac{R_i}{R_i + r_i}$$

Điện trở tương đương thevenin chính là điện trở tương đương của phần mạch xét trên (diode D hở mạch):

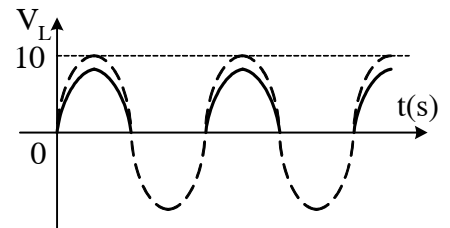
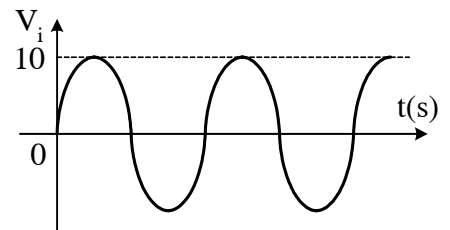
$$R_T = (R_i // r_i) + R_L = \frac{R_i r_i}{R_i + r_i} + R_L$$



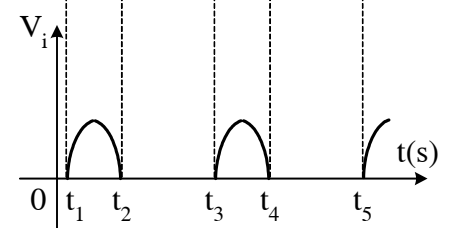
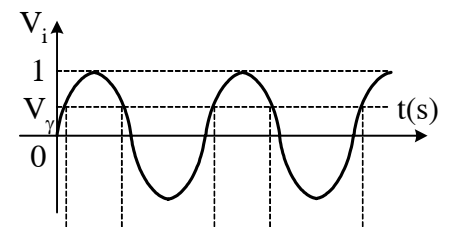
a)



b)



c)



d)

Như vậy mạch h.2-4-7a có thể đơn giản hoá thành mạch ở h. 2-4-7c hoặc h.2-4-7d.

$$b) \text{ Với các số liệu đã cho: } v_T = 5 \frac{1,5}{2,5} + \frac{10 \sin \omega t}{2,5} = 3 + 4 \sin \omega t$$

$$R_T = \frac{1,5}{2,5} + 1,4 = 2k\Omega$$

Tại các thời điểm  $\omega t = 0; \frac{\pi}{3}; \frac{\pi}{2}, \dots, v_T$  có giá trị tương ứng là 3V; 6,46 V; 7V.

Gọi  $v$  là điện áp hạ trên diode theo chiều thuận,  $i$  là dòng điện qua diode và tải  $R_L$ . Theo định luật Ohm cho toàn mạch (h.2-4-7c):

$$i = \frac{v_T - v}{R_T} = -\frac{1}{R_T} v + \frac{v_T}{R_T}$$

$$i = -\frac{1}{2} v + \frac{3 + 4 \sin \omega t}{2} \quad (1) \quad (\text{đơn vị: mA})$$

Quan hệ giữa  $i$  và  $v$  ở (1) có dạng hàm  $y = ax + b$ , biểu diễn bằng một đường thẳng, cắt trục tung tại tung độ  $\frac{v_T}{R_T}$ , cắt trục hoành ở hoành độ  $v_T$ , độ dốc là  $-\frac{1}{R_T}$ . Đường thẳng này gọi là đường tải.

Ví dụ tại  $\omega t = 0$ , giá trị tương ứng của  $v_T$  là 3V, đường tải sẽ là đường AB trên hình 2-4-8 (tung độ điểm A =  $\frac{3V}{2K} = 1,5 \text{mA}$ , hoành độ điểm B: 3V). Tương tự suy ra vị trí đường tải tại thời điểm

$$\omega t = \frac{\pi}{3} \text{ và } \omega t = \frac{\pi}{2} \text{ là CD và EF.}$$

Ngoài quan hệ (1), hai biến  $i$  và  $v$  còn phụ thuộc vào nhau theo đặc tuyến của diode:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{\phi_T}\right) - 1 \right] = 10^{-6} \left[ \exp\left(\frac{V}{25}\right) - 1 \right] \quad (2) \quad (\text{Ở } T = 300^0\text{K})$$

thể hiện bằng đường (2) trên h.2-4-8, với đặc tuyến tĩnh sẽ xác định các giá trị  $i, v$  tức thời trong mạch, ứng với giá trị tương ứng của  $v_T$  (ví dụ tại  $\omega t = 0, v_T = 3V$ , đường tải nằm ở vị trí AB, giao điểm  $Q_0$  có tọa độ là  $i_0 = 1,40 \text{mA}, v_0 = 0,2v$ . Tương tự tại  $\omega t = \frac{\pi}{2}, v_T = 7V$  đường tải nằm ở vị trí EF, giao điểm  $Q_2$  xác định giá trị tương ứng của  $i$  và  $v$  là  $i_2 = 3,35 \text{mA}, v_2 = 0,3V$ )

Trên h.2-4-8 cũng minh hoạ cả dạng sóng  $i(t)$  khi  $v_T$  thay đổi theo hàm  $v_T = 3 + 4 \sin \omega t$ . Điện áp trên tải  $v_T(t) = i(t)R_L$  có dạng giống như  $i(t)$ .

Trên đây là quá trình tìm dòng điện, điện áp tức thời trên diode theo phương pháp đồ thị. Trong thực tế, để đơn giản, với kết quả gần đúng cho phép, người ta thường giả thiết hạ áp thuận trên diode là không đổi (0,3V đối diode Ge, 0,7V đối với diode Silic, do đó dễ dàng xác định ra dòng

$$\text{điện: } i(t) = \frac{v_T - V_\gamma}{R_T}.$$

### 2-4-2. Diode cao tần

Thực chất loại này vẫn là chuyển tiếp P-N nhưng có kích thước bé, hình thành nhờ tiếp xúc của một mũi kim loại với một phiến bán dẫn loại N đặt trong vỏ thủy tinh hoặc vỏ nhựa. Do kích thước mũi tiếp xúc rất bé, điện dung tương đương của diode rất bé, diode loại này làm việc được đến tần số hàng trăm MHz. Chúng thường dùng làm phân tử tách sóng cao tần, xén hoặc ghim điện áp, hạn chế điện độ v.v... Dòng điện cho phép chỉ cỡ mấy mA, điện áp ngược chỉ cho phép khoảng vài chục volt.

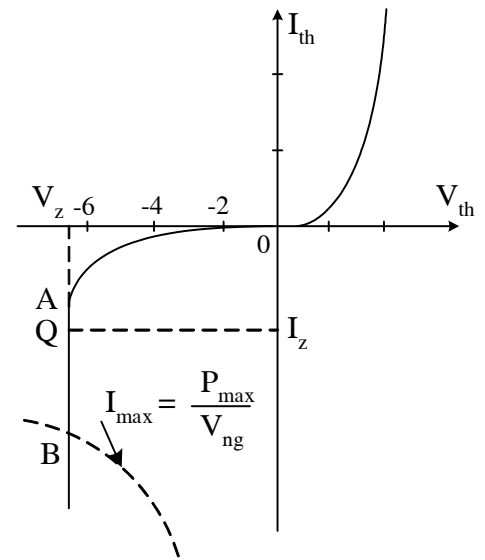
Loại dùng cho tần số siêu cao, ngoài việc điện tích tiếp xúc rất bé, còn phải có hình dạng thích hợp sao cho điện dung và điện cảm ký sinh bé, để dàng mắc trực tiếp vào các ống dẫn sóng hoặc hốc cộng hưởng của các thiết bị siêu cao tần.

Bảng 2-4-2. Tham số của vài loại diode cao tần

Tên gọi	Vật liệu Chế tạo	Công Suất tiêu Tán (w)	Điện áp ngược cực đại (v)	Dòng điện Ngược ( $\mu\text{A}$ ) đo Tại điện áp ...V	Dòng điện Thuận (mA) tại V = 1V
1N461	Si	0,2	30	0,50/25 <sup>v</sup>	15
1N461A	Si	0,2	30	0,50/25 <sup>v</sup>	100
1N462	Si	0,2	70	0,5/25 <sup>v</sup>	5
1N463	Si	0,2	1,75	0,5/175 <sup>v</sup>	5
1N463A	Si	0,2	175	0,5/175 <sup>v</sup>	100
1N914	Si	0,25	100	25/20 <sup>v</sup>	10

### 2-4-3. Diode Zener

Về cấu tạo vẫn là chuyển tiếp P-N, nhưng chế tạo bằng vật liệu chịu nhiệt và tỏa nhiệt tốt, do đó khi điện áp ngược đủ lớn sẽ xảy ra quá trình đánh thủng về điện (đánh thủng thác lũ hoặc đánh thủng tunen) mà ít khi đánh thủng về nhiệt, nghĩa là không phá hỏng diode. Đặc tuyến vôn-ampe trong quá trình đánh thủng gần như song song với trục dòng điện, nghĩa là điện áp giữa katôt và anôt hầu như không đổi (h.2-4-9, đoạn AB). Người ta lợi dụng ưu điểm này để dùng diode Zener làm phân tử ổn định điện áp. Giới hạn trên của phạm vi làm việc chính và trị số dòng điện ngược tối đa cho phép, xác định bởi công suất tiêu hao cực đại của diode  $P_{\max}$  (điểm B trên hình). Ký hiệu quy ước của diode Zener và mạch ổn định tương ứng giới thiệu trên hình 2-4-10 (lưu ý: diode Zener làm việc ở trạng thái phân cực ngược).



Hình 2.4.9. Đặc tuyến V-A của diode Zener

$V_1$ : điện áp một chiều chưa ổn định

$V_2$ : điện áp lấy ra trên tải (đã ổn định)

$R_1$ : điện trở hạn chế dòng điện qua diode, sao cho điểm làm việc nằm trong phạm vi AB cho phép.

Khi  $V_1$  biến động, dòng qua  $R_1$  và  $D_Z$  thay đổi, nhưng điện áp  $V_2$  trên hai đầu  $D_Z$  vẫn gần như không đổi (xem bài tập 2-3 sau này)

Hình 2.4.10. Mạch ổn áp dùng diode Zener

Để đặc trưng cho diode Zener, người ta dùng các tham số sau đây

- Điện áp ổn định  $V_Z$
- Điện trở tương đương (còn gọi điện trở động) tại điểm làm việc (nằm trong miền đánh thủng)

$$r_d = \frac{dV_Z}{dI} \quad (2-4-8)$$

trị số  $r_d$  càng bé chứng tỏ đặc tuyến đánh thủng càng dốc đứng, nghĩa là chất lượng ổn định điện áp càng cao.

c) Điện trở tĩnh xác định bằng tỷ lệ số giữa điểm áp trên diode và dòng điện qua nó

$$R_t = \frac{V_Z}{I_Z} \quad (2-4-9)$$

d) Hệ số ổn định phản ánh tỷ số giữa lượng biến thiên tương đối của dòng điện và lượng biến thiên tương đối của điện áp phát sinh trong quá trình đó:

$$S = \frac{dI_Z/I_Z}{dV_Z/V_Z} = \frac{dI_Z}{dV_Z} \cdot \frac{V_Z}{I_Z} = \frac{R_t}{r_d} \quad (2-4-10)$$

Rõ ràng là điện trở động  $r_d$  càng nhỏ so với điện trở tĩnh  $R_t$  thì độ ổn định đạt được càng cao.

Đôi khi người ta định nghĩa hệ số ổn định bằng tỷ lệ số giữa lượng biến thiên của điện áp vào và lượng biến thiên tương ứng của điện áp ra.

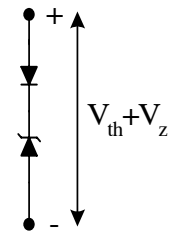
e) Hệ số nhiệt của điện áp ổn định: Hệ số này biểu thị lượng biến thiên tương đối của điện áp ổn định theo nhiệt độ:

$$\theta_T = \frac{1}{V_Z} \cdot \left. \frac{dV_Z}{dT} \right|_{I_Z = \text{const}} \quad (2-4-11)$$

Tùy theo cơ thể đánh thủng thuộc loại thác lũ hay loại tunen mà  $\theta_T$  có giá trị dương hoặc âm, thông thường trị số  $\theta_T$  vào cỡ  $(2 \div 4) \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ .

Trên thực tế, các diode Zener có  $V_Z$  dưới 4V (chế tạo bằng vật liệu Si có điện trở suất nhỏ) thường xảy ra đánh thủng kiểu tunen và có  $\theta_T$  âm. Còn các diode Zener có  $V_Z$  trên 6V (chế tạo bằng vật liệu Si có điện trở suất lớn) thường đánh thủng kiểu thác lũ, với  $\theta_T$  dương. Còn khi  $V_Z$  nằm trong khoảng từ 4V đến 6V thì có thể xảy ra cả hai dạng.

Để có hệ số nhiệt bé, người ta thường mắc nối tiếp diode Zener (phân cực ngược) với một diode chỉnh lưu (phân cực thuận) thành một tổ hợp như H.2-4-11. Hệ số nhiệt dương của diode Zener bị bù trừ bởi hệ số nhiệt âm của diode chỉnh lưu, nhờ vậy tổ hợp sẽ có hệ số nhiệt âm của điện áp  $V_{th} + V_Z$  rất bé, vào cỡ  $5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ .



Hình 2.4.11. Tổ hợp gồm diode Zener và diode chỉnh lưu

Bảng 2-4-3 nêu tham số vài loại diode Zener

Tên gọi	Vật liệu chế tạo	Công suất tiêu tán cực đại (W)	Điện áp ổn định $V_Z$ (V)	Dòng điện ngược danh định (mA)	Điện trở động ( $\Omega$ )
1N702	Si	0,25	2,6	5	60
1N703	Si	0,25	3,4	5	55
1N706	Si	0,25	5,8	5	20
1N707A	Si	0,25	8	5	10
1N708	Si	0,25	5,6	25	3,6
1N711A	Si	0,25	7,5	25	5,3
1N714	Si	0,25	10	12	8
1N758	Si	0,40	10	20	12
1N1525	Si	1	15	13	5,4

**Bài tập 2-3.** Mạch điện như hình 2-4-12,  $R = 300\Omega$ ,  $R_L = 1200\Omega$ . Hãy xác định phạm vi thay đổi cho phép của  $V_i$  để có điện áp trên tải ổn định ở mức 10V.

**Giải**

Chọn loại diode Zener có  $V_Z = 10V$ , ví dụ loại 1N758 ( $P_{max} = 0,4W$ ). Cẩm nang cho đặc tuyến của diode này (h.2-4-13). Phạm vi làm việc cho phép tương ứng với đoạn đặc tuyến gần như song song với trục tung. Chọn:  $I_{min} = 10mA$  (nếu nhỏ quá, điện áp  $V_Z$  không hoàn toàn ổn định).

$I_{max} = 30 mA$  (để không vượt quá công suất tiêu tán cho phép)

Dòng qua tải:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10V}{1,2K} = 8,3^{mA}$$

Áp dụng luật Ohm:

$$V_{imin} = I_{Rmin}R + V_Z = (I_{min} + I_L)R + V_Z = (10 + 8,3)0,3 + 10 = 15,5V$$

$$V_{imax} = I_{Rmax}R + V_Z = (I_{max} + I_L)R + V_Z = (30 + 8,3) 0,3 + 10 = 21,5V$$

Vậy phạm vi cho phép của  $V_i$  là từ 15,5V đến 21,5V

**Bài tập 2-4:** Vẫn dùng mạch h.2-4-12. Biết  $V_i = 12V \pm \Delta V_i$ ,  $R = 300\Omega$ ,  $R_L = 1200\Omega$ .

Diode Zener 1N708 có  $V_Z = 5,6V$ , nội trở  $3,6 \Omega$

- Hãy xác định phạm vi thay đổi điểm làm việc của  $D_Z$  khi  $\Delta V_i = \pm 10\%$
- Tính hệ số ổn định và tính lượng biến thiên của điện áp trên tải.

**Giải**

- Lập sơ đồ tương đương thevenin cho gần mạch ngoài của diode Zener giữa hai điểm K-A sẽ có H. 2-4-14, trong đó:

$$R_T = \frac{R.R_L}{R + R_L} = \frac{300.1200}{300 + 1200} = 240\Omega$$

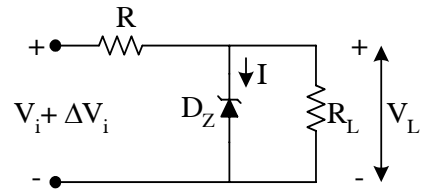
$$V_T = V_i \frac{R_L}{R + R_L} = 12 \frac{1200}{300 + 1200} = 9,6V$$

Đồ thị nêu quan hệ giữa  $I$  và  $V_L$  thỏa mãn hệ thức này là đường tải MN trên hình 2-4-15 (cắt trục hoành tại điểm M có hoành độ  $V_T = 9,6V$ , cắt trục tung tại điểm N có tung độ  $\frac{V_T}{R_T} = \frac{9,6}{240} = 40mA$ )

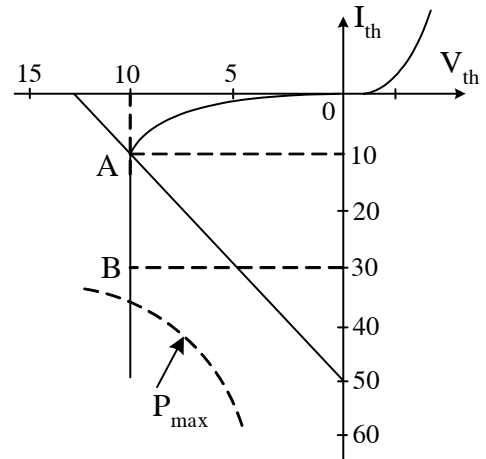
Mặt khác dòng điện  $I$  và điện áp  $V_Z$  (cũng chính là  $V_L$ ) liên quan với nhau theo đặc tuyến của diode Zener 1N708 (nét (2) trên h.2-4-15)

Giao điểm Q của 2 đồ thị nói trên xác định điểm làm việc của diode khi  $V_i = 12V$ :

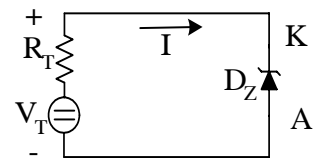
$$V_Z = 5,6V, I = 18 mA$$



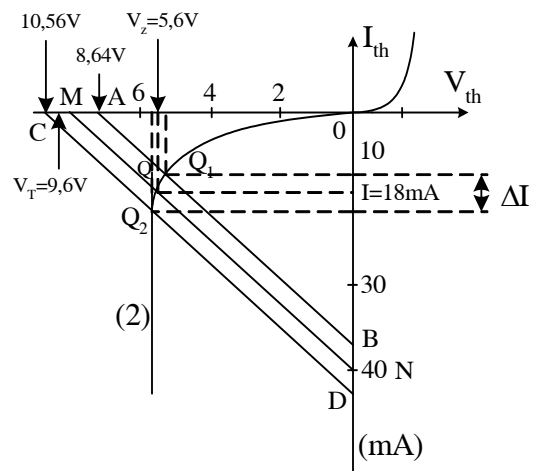
Hình 2.4.12



Hình 2.4.13



Hình 2.4.14



Hình 2.4.15

Nếu điện áp vào thay đổi  $\pm 10\%$  (nghĩa là  $V_i$  dao động trong khoảng từ 10,8V đến 13,2V) thì  $V_T$  thay đổi từ 8,64V đến 10,56V. Đường tải sẽ di chuyển từ vị trí AB đến vị trí CD trên hình vẽ, do đó điểm hoạt động của diode di chuyển trong phạm vi từ  $Q_1$  đến  $Q_2$  (tung độ của  $Q_1, Q_2$  xác định từ đồ thị).

b) Hệ số ổn định của mạch được xác định bằng tỷ số giữa lượng biến thiên của điện áp vào và lượng biến thiên tương ứng của điện áp trên tải:

$$S = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_L}$$

Dựa vào mạch tương đương đối với thành phần biến thiên (thành phần xoay chiều) của sơ đồ h.2-4-12 ta suy ra:

$$S = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_L} = \frac{R + R'}{R'}$$

trong đó  $R'$  là điện trở tương đương (đối với thành phần xoay chiều) của nhánh gồm  $D_Z$  mắc song song với tải  $R_L$

$$R' = r_d // R_L \approx r_d$$

Ở hai bài tập này,  $S = \frac{R + R'}{R'} \approx \frac{300 + 3,6}{3,6} = 84,3$

như vậy :  $\Delta V_L = \frac{\Delta V_i}{S} = \frac{10}{84,3} \% \approx 0,1\%$

**Bài tập 2-5:** Vẫn mạch điện như H. 2-4-12, nhưng  $V_i = 30V = \text{const}$ , còn điện trở tải  $R_L$  thay đổi. Biết  $V_Z = 15V, I_{\max} = 65mA$  (ví dụ loại 1N1525),  $R = 200 \Omega$ . Hãy xác định phạm vi thay đổi cho phép của  $R_L$  sao cho điện áp trên tải luôn ổn định ở mức 15V.

**Giải**

Điện áp vào  $V_i$  giữ không đổi cho nên khi  $R_L$  còn nhỏ, điện áp do  $V_i$  gây ra trên  $R_L$  sẽ nhỏ, chưa đủ gây ra hiện tượng đánh thủng của diode Zener. Điện trở ngược của  $D_Z$  lúc đó khá lớn, vì vậy có thể tính gần đúng:

$$V_L = V_i \frac{R_L}{R + R_L} \quad (1)$$

hay  $R_L = R \frac{V_L}{V_i - V_L}$

Tăng  $R_L$  thì  $V_L$  tăng theo, đến lúc  $V_L = V_Z$  thì xảy ra quá trình đánh thủng và diode có tác dụng ổn áp. Giá trị  $R_L$  tương ứng sẽ là:

$$R_{L\min} = R \cdot \frac{V_Z}{V_i - V_Z} = 200 \frac{15}{30 - 15} = 200\Omega$$

Trong trạng thái đó, dòng qua điện trở  $R$  có giá trị:

$$I_R = \frac{V_i - V_Z}{R} = \frac{30v - 15v}{0,2K} = 75mA \quad (2)$$

(thật ra ở công thức (1) và (2) ta đã coi dòng qua diode, ở trạng thái bắt đầu đánh thủng là  $I_{\min} = 0$ . Nếu tính chính xác hơn phải lấy  $I_R = I_L + I_{\min} > 75 mA$ )

Tiếp tục tăng  $R_L$  thì dòng  $I_L$  càng giảm, còn dòng qua diode  $I$  càng tăng (coi  $I_R \approx \text{const}$ ). Giá trị  $R_L$  sẽ nhỏ nhất khi  $I$  đạt  $I_{\max}$

$$I_{L\min} = I_R - I_{\max} = 75 - 65 = 10mA$$

Giá trị  $R_L$  tương ứng sẽ là :

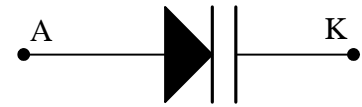
$$R_{L\max} = \frac{V_L}{I_{L\min}} = \frac{15}{10} = 1,5K\Omega$$



Tóm lại phạm vi thay đổi cho phép của tải là từ 200 Ω đến 1,5 KΩ

**2-4-4. Diode biến dung (varicap)**

Diode biến dung là loại linh kiện bán dẫn hai cực, trong đó chuyển tiếp P-N được chế tạo một cách đặc biệt sao cho điện dung của nó thay đổi nhiều theo điện áp ngược đặt vào. Chúng thường được dùng trong các mạch tạo sóng điều tần, mạch tự động điều chỉnh tần số cộng hưởng, trong các bộ khuếch đại tham số hoặc nhân tần. Ký hiệu quy ước như hình 2-4-16.



Hình 2.4.16. Ký hiệu của diode biến dung

Như đã trình bày ở 2-4-1-3, bộ phận cơ bản của diode là vùng nghèo nằm ở hai bên mặt ranh giới. Vùng này bao gồm hai lớp điện tích khác dấu nằm đối diện nhau: các ion âm acceptor bên bán dẫn P và các ion dương donor bên bán dẫn N. Sự phân bố điện tích như vậy tương tự như tình trạng trong một tụ điện phẳng, vì vậy chuyển tiếp P-N được đặc trưng bằng một điện dung, gọi là điện dung hàng rào. Khi chuyển tiếp P-N bị phân cực nghịch, vùng nghèo mở rộng ra, nghĩa là khoảng cách giữa hai lớp điện tích nói trên tăng lên,  $C_{h,rào}$  giảm. Điện áp ngược càng tăng,  $C_{h,rào}$  càng giảm. Quy luật thay đổi của điện dung hàng rào theo điện áp ngược tùy thuộc vào tình trạng phân bố tạp chất ở hai bên mặt tiếp xúc. Trên H. 2-4-17c giới thiệu hàm  $C(V)$  của hai trường hợp: tạp chất phân bố đột biến (nét a) và tạp chất biến đổi chậm (nét b).

Để đặc trưng cho diode biến dung, người ta dùng các tham số sau:

*a) Giá trị danh định của điện dung*

Thông thường giá trị này được đo trong một điều kiện xác định (giá trị điện áp ngược, tần số đo, nhiệt độ môi trường v.v...)

*b) Hệ số thay đổi của điện dung*

Đây là tỷ số giữa hai giá trị điện dung đo được ở hai điện áp ngược khác nhau:

$$K_C = \frac{C_1}{C_2} \tag{2-4-12}$$

Đôi khi, để tổng quát hơn, người ta dùng độ dốc của đặc tuyến  $C(V)$   $\frac{dC}{dV}$  biểu thị tốc độ biến thiên của điện dung  $C$  theo điện áp ngược  $V$ .

*c) Hệ số phẩm chất Q*

Hệ số phẩm chất  $Q$  đặc trưng cho tỷ số giữa công suất tín hiệu hữu ích lấy ra từ varicap và công suất tiêu hao trên nó.

Người ta đã chứng minh rằng hệ số  $Q$  phụ thuộc vào tần số, điện dung hàng rào, điện trở ngược của vùng nghèo và cả điện trở bản thân của hai miền bán dẫn (mắc nối tiếp của vùng nghèo). Tần số tương ứng với  $Q = 1$ , được gọi là tần số giới hạn. Bảng 2-4-4 nêu một số Varicap thường gặp.

**Bảng 2-4-4. một số varicap thường gặp**

Tên gọi	Điện áp đánh thủng Khi $I_S = 10A$	Điện dung của Varicap (p.F) đo ở $V_{ng} = 4V$ , $f = 1MHz$ , $T_a = 25^\circ C$		
		Giá trị tối thiểu	Giá trị danh định	Giá trị tối đa
1N5139	60V	6,1pF	6,8pF	7,5pF
1N5139A	60	6,5	6,8	7,1
1N51441A	60	11,4	12	12,6
1N5144	60	19,8	22	24,2

1N5148	60	42,3	47	51,7
MV1866D	60	9	10	11
MV1878	60	42,3	47	51,7
MV2115	30	90	100	110
MV1666	15	297	330	362

Các Varicap có điện dung bé (chế tạo từ GaAS hoặc Ge), thường dùng cho các mạch tần số cao, còn lại điện dung lớn (phần nhiều chế tạo từ Si) dùng cho tần số thấp. Một đặc điểm quan trọng là điện dung của Varicap gần như thay đổi một cách tức thời theo điện áp ngược đặt vào. Chính nhờ vậy người ta thường dùng varicap làm tụ điện trong mạch cộng hưởng của bộ tạo sóng cao tần. Trên 2 cực của Varicap lúc đó, ngoài điện áp một chiều để xác định điểm việc làm việc tĩnh, còn có tín hiệu xoay chiều gây điều biến điện dung và kết quả là sóng cao tần tạo ra bị biến điệu tần số (sóng điều tần).

#### 2-4-5. Diode tunen (tunnel)

Diode tunen (còn gọi diode xuyên hầm) cũng là loại dụng cụ hai cực có chuyển tiếp P-N nhưng khác với các loại diode trước đây, nồng độ tạp acceptor trong bán dẫn P và nồng độ tạp donor trong bán dẫn N ở diode tunen có giá trị rất lớn (cỡ  $10^{19}$  nguyên tử trong một  $\text{cm}^3$ ); do đó vùng nghèo rất hẹp (cỡ  $10^{-6}$  cm) và điện trường tiếp xúc trong vùng này đạt được khá lớn (gần  $10^6$  V/cm).

Ký hiệu quy ước và đặc tuyến vôn-ampe nêu trên h. 2-4-18 trong đoạn đặc tuyến AB, tương ứng với điện trở vi phân âm (dòng điện giảm trong khi điện áp trên diode tăng) đóng vai trò rất quan trọng.

Giải thích sự hình thành dạng đặc tuyến của diode tunen dựa trên cấu trúc vùng năng lượng của chất bán dẫn suy biến (bán dẫn có nồng độ tạp rất cao ký hiệu P + hoặc N + ). Ở đây chỉ tóm tắt sơ lược.

Do pha tạp với nồng độ lớn, vùng nghèo của chuyển tiếp P + - N + trở nên rất hẹp, hiệu thế tiếp xúc giữa hai bán dẫn suy biến lại rất cao, cho nên điện trường tiếp xúc giữa hai bán dẫn suy biến lại rất cao, cho nên điện trường tiếp xúc có cường độ rất lớn. Nói cách khác tồn tại một hàng rào điện thế cao trong một vùng rất mỏng. Giảm đồ năng lượng của hai bán dẫn bị uốn cong một cách trầm trọng tại vùng tiếp xúc (h.2-4-19). Hậu quả là một số mức năng lượng của điện tử trong vùng dẫn N trở nên ngang hàng với các mức năng lượng của điện tử trong một vùng hoá trị của bán dẫn P (miền gạch chéo trên h. 2-4-19b). Do đó sẽ có những điện tử đi từ vùng này sang vùng kia theo kiểu “xuyên hầm” mà không phải “leo qua” hàng rào điện thế của chuyển tiếp P-N. Ta gọi đó là hiệu ứng tunen. Dòng điện do điện tử và lỗ trống “chui vào” tạo nên gọi là dòng điện tunen.

Ở trạng thái cân bằng (chưa phân cực), dòng tunen từ hai phía ngược chiều nhau và triệt tiêu nhau nên dòng tổng bằng không.

Khi diode tunen bị phân cực nghịch, giảm đồ năng lượng bị uốn cong trầm trọng hơn (h.2-4-20), số mức năng lượng bên P nằm ngang hàng với mức còn trống bên N sẽ càng nhiều thêm (miền gạch đậm trên h. 2-4-20b), nghĩa là dòng tunen càng tăng. (Thật ra ngoài dòng tunen vẫn có dòng dẫn do hạt dẫn thiểu số tạo nên như ở các diode thông thường, nhưng trị số dòng này chỉ rất bé). Điện áp phân cực nghịch càng tăng thì dòng tunen nói trên sẽ càng mạnh. Chính vì vậy diode tunen có dòng ngược lớn và tăng nhanh theo điện áp ngược (đoạn OR trên hình 2-4-18).

Khi phân cực thuận, giảm đồ năng lượng bị uốn cong ít hơn. Để dễ hình dung ta coi như các mức năng lượng của bán dẫn P vẫn giữ nguyên, còn các mức của bán dẫn N nâng cao dần theo giá trị điện áp thuận.

Ở đoạn OA của đặc tuyến vôn ampe, dòng tunen tăng dần theo điện áp vì số lượng của điện tử bán dẫn N có khả năng “chui rào” sang bán dẫn P (tương ứng với diện tích miền gạch đậm trên H. 2-4-21b) tăng vì V tăng. Khi điện áp thuận đạt tới giá trị sao cho mức Fecmi  $W_{Fn}$  dâng lên ngang hàng với mức  $W_V$  của bán dẫn P, diện tích miền gạch đậm nói trên cực đại, nghĩa là dòng tunen đạt cực đại (điểm A trên đặc tuyến).

Sau đó, nếu tiếp tục tăng điện áp thuận, các mức năng lượng của bán dẫn N tiếp tục dâng cao (H.2-4-21c). Một số mức của bán dẫn N trở nên nằm đối diện với vùng cấm của bán dẫn P (tức là vùng không thể tiếp nhận điện tử chạy tới), vì vậy diện tích miền gạch đậm giảm dần, nghĩa là dòng tunen giảm dần (đoạn AB trên đặc tuyến).

Khi điện áp thuận tăng tới giá trị sao cho mức  $W_C$  của bán dẫn N dâng lên ngang hàng với  $W_V$  của bán dẫn P (h. 2-4-21d), toàn bộ các mức trong vùng dẫn của bán dẫn N không còn “chui rào” sang bán dẫn P được nữa, dòng tunen giảm xuống bằng không (điểm B trên đặc tuyến).

Kể từ giá trị đó trở đi, nếu tiếp tục tăng V chạy qua diode chỉ còn lại thành phần dòng khuếch tán (do hạt dẫn vượt qua hàng rào chế tạo nên) như ở các diode thông thường.

Dòng này tăng theo V với quy luật hàm mũ (biểu thức 2-3-8), thể hiện ở đoạn BC trên đặc tuyến. Thật ra, ngay cả phạm vi điện áp V bé, dòng này vẫn tồn tại, nhưng lúc đó trị số dòng này nhỏ và bị dòng tunen lấn át.

Cũng cần lưu ý thêm rằng: tuy đặc tuyến thuận có dạng hình chữ N như hình 2-4-18 nhưng khi đo hoặc hiện đặc tuyến trên lao động ký, thường đoạn AB rất khó nhìn thấy.

Các tham số đặc trưng cho diode tunen bao gồm:

- Tọa độ của đỉnh A :  $I_p, V_p$  (còn gọi là dòng điện đỉnh và điện áp đỉnh)
- Tọa độ của điểm trũng B:  $I_v, V_v$  (Dòng điện trũng, điện áp trũng).

Các diode tunen thường có:

$$I_p = 1 \div 100\text{mA}, I_v = 0,1 \div 5\text{mA}$$

$$V_p = 50 \div 100\text{mV}, V_v = 300 \div 400\text{mV}$$

- Điện trở âm tương đương

$$R_D = \frac{dV}{dI} \text{ (trong đoạn AB)}$$

Đây cũng chính là nghịch đảo độ dốc đoạn AB trên đặc tuyến. Do đặc tuyến không phải là đường thẳng cho nên giá trị  $R_D = - (5\Omega \div 150\Omega)$ . Thực nghiệm cho thấy khi chúng ta phân cực V  $\approx 1,8V_p$  thì trị số  $R_D$  nhỏ nhất. Lệch khỏi giá trị điện áp phân cực đó về hai phía thì  $R_D$  tăng dần.

- Điện áp thuận ứng với giá trị dòng khuếch tán bằng dòng tunen cực đại (hoành độ điểm C trên hình 2-4-18).

Thông thường  $V_F = (400 \div 500) \text{ mV}$

Tên gọi	$V_p$ (mV)	$I_p$ (mA)	$V_v$ (mV)	$I_v$ (mA)	Điện dung tương đương (PF)
1N3712	65	1	335	0,18	10
1N3713	65	1	330	0,14	5
1N3720	70	22	350	4,8	150

Sơ sở tương đương của diode tunen khi làm việc ở vùng điện trở âm như H. 2-4-22.  $R_D$  đặc trưng cho điện trở âm;  $C_0$  là điện dung hàng rào của chuyển tiếp P-N (cỡ  $10 \div 50 \text{ pF}$ );  $r_s$  là điện trở của phiến bán dẫn và dây nối (cỡ  $1\Omega$ );  $L_s$ : điện cảm ký sinh của các dây nối, thường rất nhỏ (cỡ  $0,5 \text{ nH}$ ). Do đó  $L_s$  và  $C_0$  nên mạnh sẽ cộng hưởng ở một tần số nào đó gọi là tần số cộng hưởng riêng  $f_0$ . Thông thường  $f_0$  vào cỡ hàng trăm MHz cho đến một vài GHz.

Diode tunen thường được ứng dụng để khuếch đại và tạo dao động siêu cao tần. Ngoài ra còn được dùng trong các mạch đóng mở với hai trạng thái ổn định phân biệt. Tốc độ chuyển đổi trạng thái có thể đạt rất cao. Nhờ được chế tạo từ bán dẫn suy biến, đặc tuyến và tham số của diode tunen chịu ảnh hưởng rất ít của nhiệt độ, phạm vi làm việc của nhiệt độ cho phép của diode tunen thường rất rộng (loại chế tạo từ Ge có thể làm việc đến 200<sup>0</sup>C, loại chế tạo từ GaAs: đến 400<sup>0</sup>C)

Trên h.2-4-23 minh hoạ một mạch khuếch đại dòng dùng diode tunen. Nguồn một chiều E để xác định điểm làm việc tĩnh (thường chọn Q ở trung điểm của đoạn điện trở âm AB). Nguồn tín hiệu cao tần cần khuếch đại  $e_s$  sẽ gây ra một dòng cao tần qua diode là  $i_D = \frac{e_s}{R_D}$ , và dòng qua

tải là  $i_L = \frac{e_s}{R_L}$  nghĩa là dòng tín hiệu tổng  $i_s = i_D + i_L = \frac{e_s}{R_D} + \frac{e_s}{R_L}$ . Vì  $R_D$  âm, cho nên ký hiệu  $R_D = -|R_D|$ . Từ đó suy ra hệ số khuếch đại dòng điện của mạch bằng:

$$K_i = \frac{i_L}{i_s} = \frac{|R_D|}{|R_D| - R_L}$$

rõ ràng là khi  $R_L$  nhỏ hơn  $|R_D|$  nhưng xấp xỉ  $|R_D|$  thì  $K_i$  rất lớn.

Trên đây là trình bày một số loại diode thường gặp. Kỹ thuật điện tử ngày này còn sử dụng nhiều loại diode khác, ví dụ như diode nghịch đảo (đặc tuyến vôn-ampe trái ngược với đặc tuyến của diode thông thường, dòng điện thuận bé, còn dòng ngược lớn và tăng nhanh theo điện áp ngược) thường dùng để tách sóng hoặc trộn sóng ở giải siêu cao tần; diode Schottky (thực chất là tiếp xúc của kim loại và bán dẫn, trong đó không có hiện tượng tích lũy hạt dẫn không cân bằng, đồng thời điện dung bản thân rất bé, vì vậy làm việc được với tần số rất cao) thường dùng cho các mạch đóng mở tốc độ nhanh. Giao trình này không đi sâu vào các loại đó.

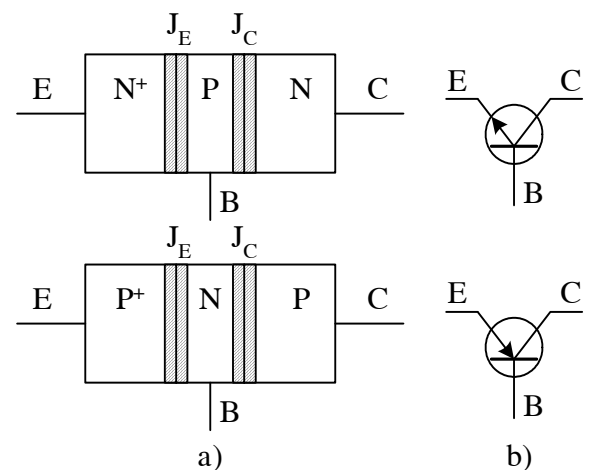
## 2-5. TRANSISTOR HAI CỰC TÍNH (BIPOLAR JUNCTION TRANSISTOR - BJT)

Transistor cực tính, thường gọi tắt BJT, là một loại linh kiện bán dẫn ba cực có khả năng khuếch đại tín hiệu hoặc hoạt động như một khoá đóng mở, rất thông dụng trong ngành điện tử. Nó sử dụng cả hai loại hạt dẫn: điện trở và lỗ trống, vì vậy xếp vào loại hai cực tính.

### 2-5-1 . Cấu tạo

BJT được tạo thành bởi hai chuyển tiếp P-N nằm rất gần nhau trong vùng một phiến bán dẫn đơn tinh thể. Về mặt cấu tạo, có thể xem như BJT cho ba lớp bán dẫn tiếp xúc nhau tạo nên, trong đó lớp ở giữa có bề dày rất bé (cỡ 10<sup>-4</sup>cm) và khác kiểu dẫn điện với hai lớp bên cạnh. Chẳng hạn lớp ở giữa là bán dẫn loại P thì hai lớp bên cạnh là loại N, tạo nên transistor kiểu N-P-N. còn nếu lớp ở giữa thuộc loại N thì hai lớp bên cạnh thuộc loại P, tạo nên kiểu P-N-P (hình 2-5-1a).

Nồng độ tạp chất trong ba lớp bán dẫn cũng không giống nhau. Lớp có nồng độ tạp chất cao nhất (ký hiệu N<sup>+</sup> hoặc P<sup>+</sup> trên hình vẽ), nghĩa là nồng độ hạt dẫn đa số của nó lớn nhất, gọi là miền phát (hay miền emitter) lớp đối diện (ký hiệu N hoặc P) có nồng độ tạp chất hơn, gọi là miền thu (hay miền collector). Lớp ở giữa, có nồng độ tạp chất rất thấp (do đó nồng độ hạt dẫn đa số của



Hình 2.5.1. Cấu tạo (a) và ký hiệu (b) của BJT

lớp này tương đối nhỏ) gọi là miền nền (còn gọi: miền base, hoặc miền gốc). Ba sợi kim loại được gắn với ba lớp nói trên, dùng làm điện cực của transistor. Người ta gọi chúng là cực emitter (ký hiệu bằng chữ E) cực base (ký hiệu bằng chữ B) cực collector (ký hiệu bằng chữ C) Các lớp bán dẫn được đặt trong một vỏ kín (bằng nhựa hoặc bằng kim loại) chỉ có ba điện cực thò ra ngoài. Ký hiệu quy ước của hai loại transistor N-P-N, P-N-P nêu trên h.2-5-1b. Mũi tên vẽ trên cực E cũng trùng với chiều dòng điện chạy qua cực đó.

Do cấu tạo như trên vẽ hình thành 2 chuyển tiếp P-N rất gần nhau. Chuyển tiếp thứ nhất ở ranh giới miền phát và miền nền, gọi là chuyển tiếp emitter, ký hiệu là  $J_E$ . Chuyển tiếp thứ hai, ở ranh giới miền nền và miền thu, gọi là chuyển tiếp collector, ký hiệu là  $J_C$ . Hoạt động của BJT chủ yếu dựa trên sự tương tác giữa hai chuyển tiếp rất gần nhau này.

### 2-5-2. Nguyên tắc hoạt động và khả năng khuếch đại của BJT

Hãy xét nguyên tắc hoạt động của loại N-P-N làm ví dụ (loại P-N-P cũng tương tự). Sơ đồ mạch điện như hình 2-5-2. Nguồn  $E_1$  (có sức điện động moat vài Volt) làm cho chuyển tiếp Emitter  $J_E$  phân cực thuận. Nguồn  $E_2$  (thường cỡ 5 đến 20V) làm cho chuyển tiếp collector  $J_C$  phân cực nghịch.  $E_1, E_2$  được gọi là nguồn điện áp phân cực.  $R_E, R_C$  là các điện trở phân cực ( $R_C$  còn có tên là điện trở tải đối với dòng một chiều collector).

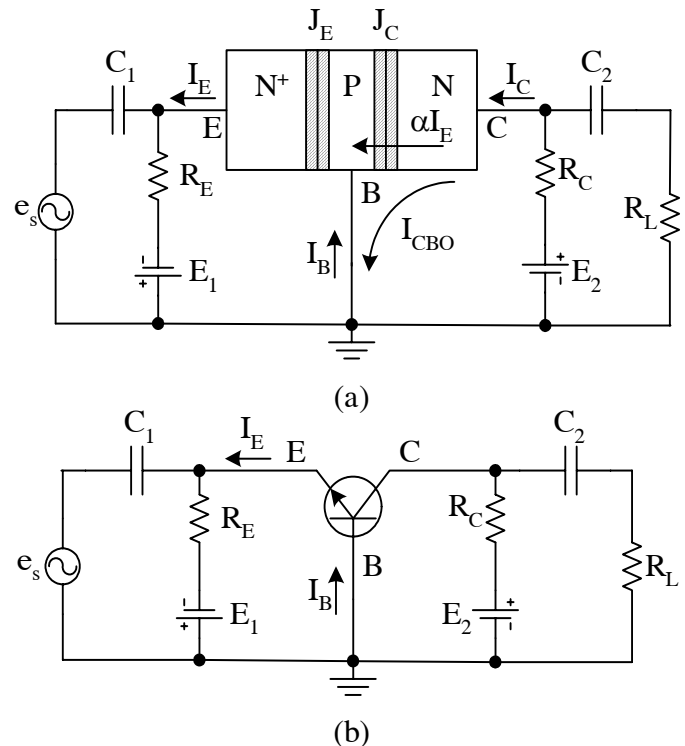
Để đơn giản, giả thiết ban đầu nồng độ tạp chất phân bố đều trong các lớp bán dẫn, đồng thời ta chỉ chú ý đến điện trở của các vùng nghèo  $J_E, J_C$ .

Thật ra, cấu trúc BJT trong thực tế có tiết diện của ba lớp bán dẫn không giống nhau; điện trở bản thân của miền base và miền collector trong một số trường hợp không thể bỏ qua; tạp chất phân bố trong các lớp không đều mà tuân theo một quy luật nào đó, tùy công nghệ chế tạo.

Khi chưa có nguồn  $E_1, E_2$  tác dụng, cũng giống như quá trình xảy ra ở diode, trong mỗi vùng nghèo  $J_E, J_C$  sẽ tồn tại một điện trường tiếp xúc (hướng từ N sang P), tương ứng với một hiệu thế tiếp xúc nào đó. Hiệu thế này đóng vai trò như một hàng rào điện thế, duy trì trạng thái cân bằng của chuyển tiếp (cân bằng giữa dòng trôi của hạt dẫn thiểu số và dòng khuếch tán của hạt dẫn đa số, khiến cho dòng điện tổng hợp qua mỗi chuyển tiếp bằng không).

Khi có nguồn  $E_2$ , chuyển tiếp  $J_C$  bị phân cực nghịch, hàng rào điện thế và điện trường tiếp xúc trong vùng nghèo này tăng. Tương tự như diode phân cực nghịch, qua vùng nghèo  $J_C$  sẽ có một dòng điện rất nhỏ (do hạt dẫn thiểu số của miền base và miền collector tạo nên), ký hiệu là  $I_{CBO}$ . Ta gọi đó là dòng điện ngược collector.

Nếu có thêm nguồn  $E_1$ , chuyển tiếp  $J_E$  sẽ phân cực thuận. Hàng rào điện thế trong  $J_E$  hạ thấp (so với trạng thái cân bằng) khiến điện tử từ miền  $N^+$  tràn qua miền P, lỗ trống từ miền P tràn qua miền  $N^+$  (hiện tượng “phun hạt dẫn”). Sau đó các hạt dẫn không cân bằng này tiếp tục khuếch tán. Trên đường khuếch tán, chúng sẽ tái hợp với nhau. Nhưng do nồng độ đa số trong hai miền chênh lệch nhau xa ( $n_n \gg p_p$ ) cho nên trong các số điện tử phun từ miền  $N^+$  vào miền P, chỉ một



Hình 2.5.2. Mạch khuếch đại dùng BJT loại N-P-N (Sơ đồ base chung)

bộ phận rất nhỏ tái hợp, còn tuyệt đại đa số vẫn có thể khuếch tán qua miền base tới vùng nghèo  $J_C$  (khả năng bị tái hợp trên đường đi chỉ rất ít vì miền base rất mỏng, nồng độ lỗ trống ở miền này cũng không cao lắm). Khi tới vùng nghèo  $J_C$  các điện tử nói trên lập tức bị điện trường trong  $J_C$  hút về phía collector tạo nên dòng điện trong mạch collector.

Nếu gọi  $I_E$  là dòng điện chạy qua cực emitter (tương ứng với chuyển động của điện tử từ miền  $N^+$  sang miền P thì dòng điện tạo nên bởi số điện tử chạy tới collector vừa nói ở trên sẽ là  $\alpha I_E$ , trong đó  $\alpha$  đại diện cho tỷ số giữa số lượng điện tử tới được collector (không bị hao hụt dọc đường đi vì tái hợp) và tổng số điện tử tái phát đi từ emitter:

- (1) Ngoài hình thức khuếch tán, trong nhiều loại BJT hiện nay, hạt dẫn còn vượt qua miền base nhờ chuyển động trôi dưới tác dụng của điện trường. Điện này tự hình thành trong miền base do hậu quả của sự phân bố tạp chất ban đầu là không đều.
- (2) Lưu ý rằng chiều dòng điện ước là chiều chuyển động của điện tích dương, ngược với chiều chuyển động thực của điện tử.

$$\alpha = \frac{\text{số lượng điện tử tới được cực C}}{\text{tổng số điện tử phát đi từ cực E}}$$

Thông thường  $\alpha = 0,95 \div 0,99$  (nghĩa là tỷ lệ hao hụt dẫn dọc đường đi từ cực E tới cực C chỉ rất nhỏ).  $\alpha$  có tên là hệ số truyền đạt dòng điện phát. Như vậy dòng điện tổng trong mạch collector bao gồm hai thành phần:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (2-5-2)$$

$I_{CBO}$  là dòng điện ngược vốn có của chuyển tiếp  $J_C$  (phân cực nghịch bởi  $E_2$ ), còn  $\alpha I_E$  đại diện cho dòng hạt dẫn chạy từ cực E tới (do  $J_E$  phân cực thuận bởi  $E_1$ )

Trong miền base, một số lỗ trống phun sang miền  $N^+$  và tái hợp với điện tử, gây nên sự thiếu hụt điện tích dương. Để bù lại, các điện tích sẽ từ nguồn  $E_1$  chạy vào miền base thông qua cực B, tạo nên dòng điện trong mạch base  $I_B$ . Dựa vào định luật dòng điện điểm nút (hoặc dựa vào quá trình vật lý vừa nêu trên đây) ta dễ dàng suy ra rằng:

$$I_E = I_B + I_C \quad (2-5-3)$$

Trị số  $I_B$  thường rất nhỏ so với  $I_C$  và  $I_E$ .

Trên đây là hoạt động của BJT cùng các dòng điện  $I_E, I_B, I_C$  khi có các nguồn điện áp  $E_1, E_2$  khiến chuyển tiếp  $J_E$  phân cực thuận và  $J_C$  phân cực nghịch. Ta thấy rõ: nếu  $I_E$  biến đổi thì dòng  $I_C$  cũng biến đổi theo. Bây giờ nếu có thêm dòng tín hiệu xoay chiều  $e_s$  (biên độ rất nhỏ) thông qua tụ  $C_1$  đặt vào giữa cực E và cực B, nghĩa là xếp chồng lên điện áp phân cực vốn có của chuyển tiếp  $J_E$ , thì mức độ phân cực của  $J_E$  sẽ thay đổi moat cách tuần hoàn theo chu kỳ tín hiệu. Do đó dòng điện tử từ cực E đi tới cực C sẽ tăng giảm theo quy luật của  $e_s$ , nghĩa là dòng collector  $I_C$  thay đổi theo  $e_s$ . Dòng này tạo ra trên  $R_C$  một điện áp, biến thiên cùng quy luật với  $e_s$  nhưng biên độ lớn hơn  $e_s$  nhiều (nhờ  $R_C$  khá lớn). Ta nói rằng transistor đã khuếch đại tín hiệu.

Rõ ràng là có thể coi dòng collector như bao gồm hai thành phần: thành phần không đổi (ứng với trạng thái tĩnh, khi chỉ có các điện áp phân cực  $E_1, E_2$ , thường gọi là thành phần một chiều) và thành phần biến thiên theo sự điều khiển của điện áp tín hiệu  $e_s$  (ứng với trạng thái động, thường gọi là thành phần xoay chiều).

$$i_c = I_C + i_{cxc} \quad (2-5-4)$$

Tương ứng, điện áp trên  $R_C$  cũng là tổng của 2 thành phần: điện áp một chiều  $I_C R_C$  (ứng với trạng thái tĩnh) và điện áp xoay chiều  $i_c R_C$  (ứng với trạng thái động). Trên h. 2-5-2, tụ  $C_2$  chỉ cho phép riêng thành phần xoay chiều truyền qua tải. Như vậy, điện áp xoay chiều lấy ra trên  $R_L$  chính là hình ảnh đã khuếch đại của tín hiệu vào  $e_s$ .

Nguyên tắc hoạt động và khả năng khuếch đại của BJT, loại P-N-P hoàn toàn tương tự, chỉ khác là để cho  $J_E$  phân cực thuận,  $J_C$  phân cực nghịch, cực tính của các nguồn một chiều  $E_1, E_2$  phải đổi ngược lại (h.2-5-3). Chiều của các dòng điện cũng thay đổi. Tạo nên dòng collector trong trường hợp này là các lỗ trống phun từ miền  $P^+$  qua miền N và khuếch tán tới miền collector loại P.

Ghi chú:

- 1) Chế độ làm việc như trên của BJT ( $J_E$  phân cực thuận,  $J_C$  phân cực nghịch) gọi là chế độ khuếch đại. Ngoài ra, BJT còn có thể làm việc ở chế độ khoá (hay chế độ đóng mở). Ở chế độ đó, hoặc cả hai chuyển tiếp  $J_E, J_C$  đều phân cực nghịch (trạng thái khoá hay trạng thái tắt), hoặc cả hai chuyển tiếp  $J_E, J_C$  đều phân cực thuận (trạng thái dẫn bão hoà, còn gọi trạng thái mở), BJT liên tục giao hoán giữa hai trạng thái này.

- 2) Phân tích trên đây chưa để ý đến hiện tượng bề dày miền base bị điều biến bởi điện áp đặt vào collector (hiệu ứng Early).

Thật vậy do vùng nghèo  $J_E, J_C$  (nhất là  $J_C$ ) có một bề dày nhất định, lấn vào thể tích miền base cho nên bề dày thực tế của miền này thu hẹp. Ở trạng thái động, điện áp  $V_{CB}$  (hoặc  $V_{CE}$ ) luôn thay đổi theo tín hiệu, khiến bề dày vùng nghèo thay đổi và do đó bề dày thực tế của miền base thay đổi theo. Chính hiệu ứng này gây ra một số hậu quả, ví dụ như vai trò điện dung khuếch tán của chuyển tiếp  $J_C$ , ảnh hưởng của ngõ ra transistor đối với ngõ vào (hiện tượng hồi tiếp nội bộ trong bản thân transistor) v.v...

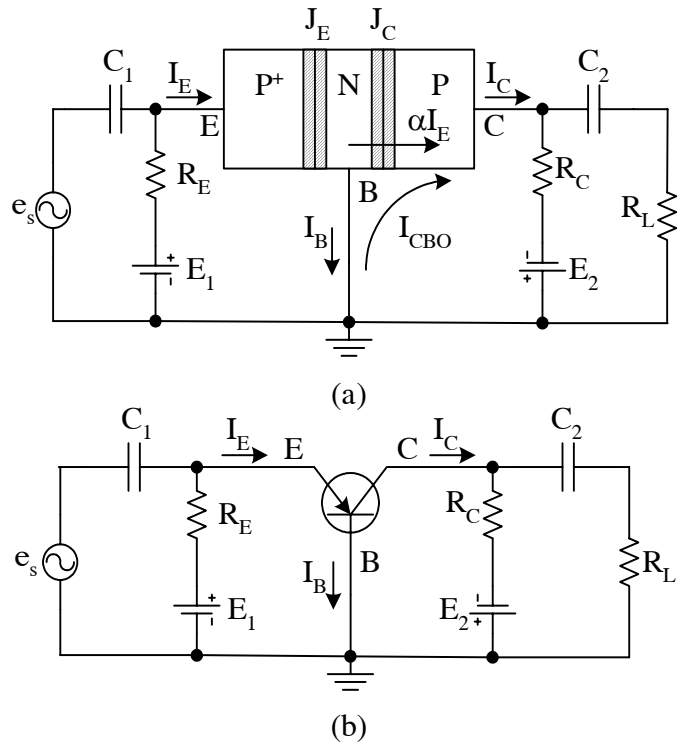
### 2-5-3. Ba sơ đồ cơ bản của BJT

Như đã biết, BJT có 3 điện cực: emitter, base, collector (còn gọi: cực phát, cực nền, cực thu). Tùy theo việc chọn điện cực làm nhánh chung cho mạch vào và mạch ra mà có 3 sơ đồ cơ bản sau đây:

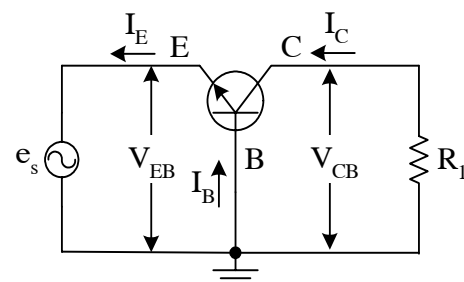
#### 1) Mạch base chung (nền chung) (viết tắt B.C)

Mạch vừa khảo sát trên đây thuộc loại này. Tín hiệu cần khuếch đại đưa vào giữa cực E và cực B, tín hiệu sau khi đã khuếch đại lấy ra giữa cực C và cực B. Cực B là cực chung của mạch vào và mạch ra (h.2-5-2 hoặc 2-5-3). Như vậy dòng điện vào là dòng emitter, dòng điện ra là dòng collector, điện áp vào là  $V_{EB}$ , còn điện áp ra là  $V_{CB}$ .

Nếu không vẽ mạch phân cực (mạch tạo điện áp một chiều cho các chuyển tiếp  $J_E$  và  $J_C$ ) thì sơ đồ base chung có dạng đơn giản hóa như h.



Hình 2.5.3. Mạch khuếch đại dùng BJT loại P-N-P

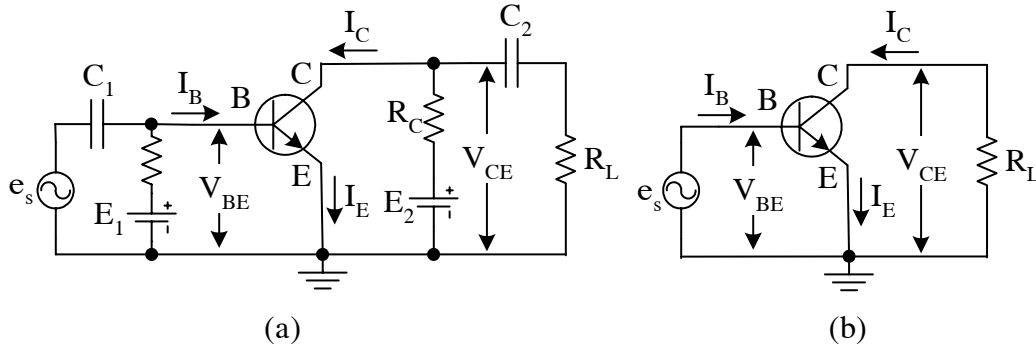


Hình 2.5.4. Mạch base chung đơn giản hoá

2-5-4 (vẽ cho loại N-P-N). Trên hình này cũng ghi 4 tham số về dòng và áp thường dùng. Các hệ thức (2-5-2), (2-5-3) chính là các hệ thức cơ bản của mạch B.C.

**2) Mạch emiter chung (phát chung, viết tắt E.C)**

Cực E là cực chung giữa mạch vào và mạch ra. Dòng điện vào:  $I_B$ , dòng điện ra  $I_C$ , điện áp vào  $V_{BE}$ , điện áp ra  $V_{CE}$ .



Hình 2.5.5. Mạch emiter chung

Mạch đầy đủ và mạch đơn giản hóa: h. 2-5-5a và b (transistor NPN).

Để thiết lập hệ thức giữa dòng ra và dòng vào của mạch E.C, ta vẫn xuất phát từ nguyên lý hoạt động của BJT, thể hiện ở công thức (2-5-2).

Thật vậy, thay  $I_E$  theo (2-5-3) vào công thức này ta có:

$$I_C = \alpha(I_B + I_C) + I_{CBO}$$

Sau vài phép biến đổi đơn giản, sẽ đi đến:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} = \beta I_B + I_{CEO} \tag{2-5-5}$$

$$\text{trong đó: } \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \tag{2-5-6}$$

gọi là hệ số khuếch đại dòng điện của mạch E.C

$$\text{Hoặc suy ngược lại } \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \tag{2-5-6a}$$

$$I_{CEO} = \frac{1}{1 - \alpha} I_{CBO} = (\beta + 1)I_{CBO} \tag{2-5-7}$$

đóng vai trò tương tự dòng  $I_{CBO}$  trong công thức (2-5-2) của mạch B-C, nên được gọi là dòng điện ngược collector của mạch E.C

thông thường, BJT có  $\alpha = 0,95 \div 0,99$ . Tương ứng  $\beta = 19 \div 99$ .

$$I_{CBO} = (0,01 \div 0,1) \mu A, I_{CEO} = (1 \div 10) \mu A .$$

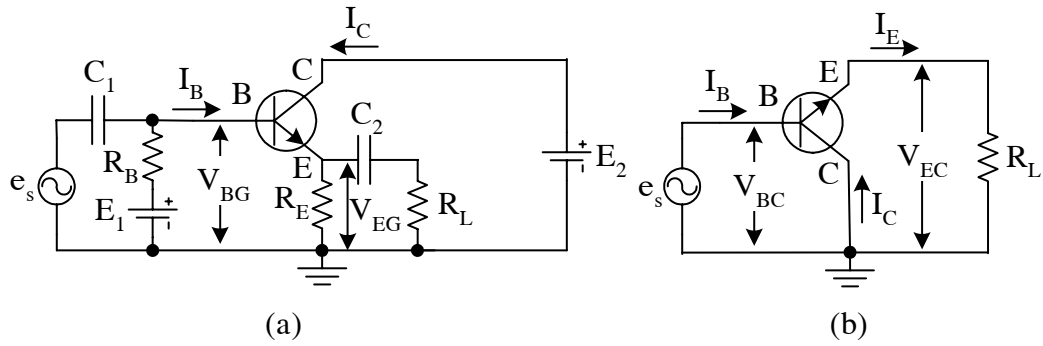
Hệ thức (2-5-5) là hệ thức cơ bản của mạch EC.

Lưu ý rằng ở mạch BC, hệ số  $\alpha$  xấp xỉ bằng 1, dòng  $I_{CBO}$  rất nhỏ. Còn ở mạch E.C, hệ số  $\beta$  rất lớn hơn 1, dòng  $I_{CEO}$  tuy lớn hơn  $I_{CBO}$  nhiều, nhưng so với giá trị  $\beta I_B$  thì vẫn không đáng kể.

**3) Mạch collector chung (thu chung, viết tắt: C.C)**

Mạch như h. 2-6-6a (transistor loại NPN). Nguồn  $E_2$  có nội trở rất bé, mắc giữa cực C và đất, vì vậy đối với tín hiệu xoay chiều thì cực C coi như đẳng thế với đất (điểm G trên hình). Chính vì vậy, ở mạch này, tín hiệu cần khuếch đại đưa vào giữa cực B và G, tương đương như đưa vào giữa B và C. Tín hiệu sau khi đã khuếch đại, lấy ra giữa E và G, tương đương như lấy ra giữa E và C. Rõ ràng cực C là nhánh chung của mạch vào và mạch ra, do đó có tên gọi mạch collector chung.





Hình 2.5.6. Mạch collector chung

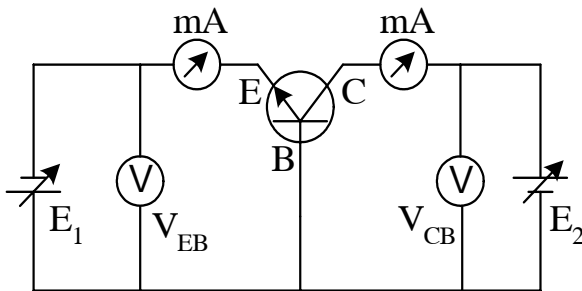
Mạch tương đương còn giản hóa (không vẽ các mạch phân cực) như h. 2-5-6b. Do các đặc điểm của nó (điện áp ra đồng pha và xấp xỉ điện áp vào, điện trở vào rất lớn, điện trở ra rất nhỏ) mạch C.C còn được gọi là mạch theo điện áp (voltage follower) hoặc mạch tải emitter.

### 2-5-4 Đặc tuyến vôn-ampe của BJT

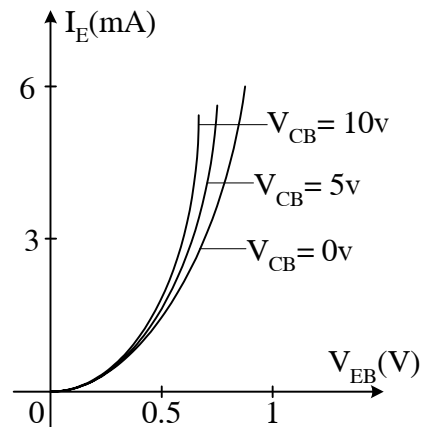
Đồ thị diễn tả các mối tương quan giữa dòng điện và điện áp trên BJT được gọi là đặc tuyến vôn-ampe (hay đặc tuyến tĩnh). Người ta thường phân biệt thành 4 loại đặc tuyến: đặc tuyến vào (nêu quan hệ giữa dòng điện và điện áp ở ngõ vào), đặc tuyến ra (nêu quan hệ giữa dòng điện và điện áp ở ngõ ra), đặc tuyến truyền đạt dòng điện (nêu sự phụ thuộc của dòng điện ra theo dòng điện vào) và đặc tuyến hồi tiếp điện áp (nêu sự biến đổi của điện áp giữa hai ngõ vào khi điện áp ra thay đổi). Dưới đây chỉ giới thiệu 3 loại đặc tuyến thường dùng nhất cho từng kiểu mạch cơ bản.

#### 1 – Mạch base chung (B.C)

a) Họ đặc tuyến vào



Hình 2.5.7. Mạch lấy đặc tuyến của BJT mắc B-C



Hình 2.5.8. Họ đặc tuyến vào tĩnh của BJT mắc B-C

Mắc BJT theo sơ đồ B.C ở trạng thái tĩnh (tức là chỉ có điện áp một chiều phân cực, xem h. 2-5-7).  $E_1, E_2$  là các nguồn điện áp một chiều có thể thay đổi giá trị. Các đồng hồ mA kế (hoặc  $\mu A$  kế) dùng để đo dòng điện, còn các volt kế đo điện áp giữa hai cực. Giữ điện áp  $V_{CB} = \text{const}$ , lần lượt thay đổi giá trị  $E_1$  rồi đọc các cặp giá trị tương ứng của  $I_E$  và  $V_{EB}$ , kết quả sẽ được đồ thị  $I_E =$

$$f(V_{EB}) \Big|_{V_{CB} = \text{const}} \quad \text{như h. 2-5-8.}$$

Ta gọi đó là đặc tuyến vào của BJT mắc B.C. Tập hợp nhiều đặc tuyến vào (mỗi đường ứng với một giá trị không đổi của  $V_{CB}$ ) tạo nên họ đặc tuyến vào.

Để dàng nhận ra rằng dạng đặc tuyến này tương tự như đặc tuyến thuận của diode, bởi vì giữa cực E và cực B của BJT có chuyển tiếp  $J_E$  phân cực thuận. Các đặc tuyến vào nằm rất sát nhau thể hiện điện áp ngõ ra  $V_{CB}$  ảnh hưởng rất ít đến dòng điện ở ngõ vào.

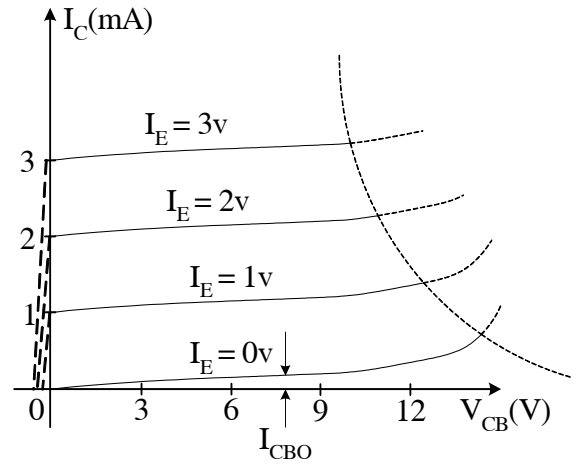
b) Họ đặc tuyến ra

Nếu lần lượt giữa dòng  $I_E$  bằng các giá trị nhất định, thay đổi nguồn  $E_2$  rồi xác định các cặp giá trị tương ứng của  $I_C$  và  $V_{CB}$ , ta sẽ có họ đặc tuyến ra của mạch B.C

$$I_C = f(V_{CB}) \Big|_{I_E = \text{const}}$$

như h. 2-5-9. Họ đặc tuyến này có mấy đặc điểm:

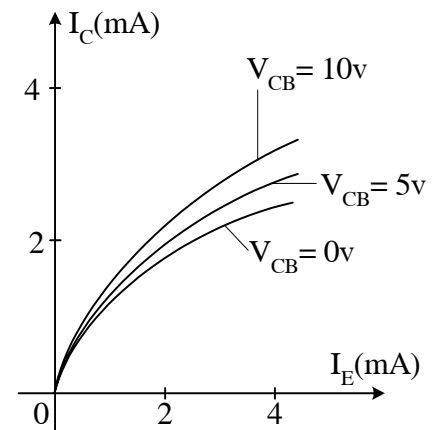
- Đặc tuyến gần như song song với trục hoành, cắt trục tung ở các tung độ khác nhau. Điều này chứng tỏ ngay cả khi  $V_{CB} = 0$ , dòng  $I_C$  vẫn có một giá trị khác không nào đó và việc tăng  $V_{CB}$  ảnh hưởng rất ít đến giá trị số của  $I_C$ . Dựa vào nguyên lý hoạt động của BJT, ta dễ dàng giải thích được điều này.
- Đường thấp nhất trên hình vẽ (ứng với  $I_E = 0$ ) chỉ cách trục hoành một khoảng rất hẹp. Tung độ này chính là giá trị dòng điện ngược collector, bởi vì, theo (2-5-2), khi  $I_E = 0$  (tức E hở mạch) thì  $I_C = I_{CBO}$ . Dòng này vốn có giá trị rất nhỏ.



Hình 2.5.9. Họ đặc tuyến ra tĩnh của BJT mắc B-C

Phạm vi rất hẹp, phía dưới đặc tuyến này gọi là miền tắt (hoặc miền khóa). Nó tương ứng với trạng thái khóa của BJT (cả hai chuyển tiếp  $J_E, J_C$  đều phân cực nghịch).

- Trị số  $I_E$  càng tăng, đặc tuyến càng dịch lên phía trên, nghĩa là  $I_C$  càng tăng theo. Đó là vì số hạt dẫn đa số của miền emitter phun vào miền base càng lớn thì số hạt dẫn tới được cực collector cũng sẽ càng nhiều.
- Có thể coi mỗi đặc tuyến bao gồm 3 đoạn. Đoạn gần như song song với trục hoành (vừa nhận xét ở trên) ứng với trạng thái khuếch đại thông thường của BJT ( $J_E$  phân cực thuận,  $J_C$  phân cực nghịch). Đoạn chếch xiên ở bên trái trục tung (vẽ nét đứt) tương ứng với trạng thái dẫn bão hòa của BJT (cả hai chuyển tiếp  $J_E, J_C$  đều phân cực thuận). Còn đoạn thứ ba bên phải (vẽ chấm chấm) chính là quá trình đánh thủng chuyển tiếp  $J_C$ , xảy ra khi  $V_{CB}$  quá lớn làm dòng  $I_C$  tăng vọt. Đây là miền cấm sử dụng để khởi phá hỏng BJT.



Hình 2.5.10. Họ đặc tuyến truyền đạt dòng điện của BJT mắc B-C

c) Đặc tuyến truyền đạt dòng điện

$$I_C = f(I_E) \Big|_{V_{CB} = \text{const}} \tag{h.2-5-10}$$

Nó có dạng gần tuyến tính, phù hợp với hệ thức lý thuyết (2-5-2) (coi  $\alpha$  là không đổi). Trên thực tế, hệ số  $\alpha$  chỉ là hằng số khi dòng điện  $I_E$  tương đối nhỏ. Còn khi  $I_E$  khá lớn, nghĩa là dòng hạt dẫn khuếch tán qua miền base có mật độ lớn thì tỷ lệ phần trăm số hạt dẫn bị tái hợp trên đường

đi sẽ tăng lên, khiến  $\alpha$  giảm. Điều này làm cho đặc tuyến ở vùng dòng điện lớn ngày càng lệch khỏi quy luật tuyến tính.

## 2. Mạch emitter chung (E.C)

Tương tự như mạch B.C, mạch này cũng có 3 họ đặc tuyến thông dụng.

a) Đặc tuyến vào

$$I_B = f(V_{BE}) \Big|_{V_{CE} = \text{const}}$$

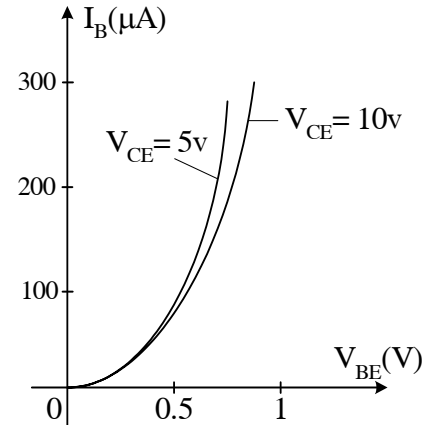
phản ánh quan hệ giữa dòng và áp của chuyển tiếp  $J_E$  ở ngõ vào (h. 2-5-11). Thực chất đây vẫn là nhánh thuận của đặc tuyến diode.

b) Đặc tuyến ra

$$I_C = f(V_{CE}) \Big|_{I_B = \text{const}} \quad (\text{h. 2-5-12})$$

So với đặc tuyến ra của mạch B.C, họ đặc tuyến này của mạch E.C có một vài khác biệt:

- Đường thấp nhất (ứng với  $I_B = 0$ ) phản ánh giá trị dòng điện ngược collector của mạch E.C ( $I_{CEO}$ ). Dòng này lớn hơn dòng  $I_{CBO}$  của mạch B.C (hệ thức 2-5-7), vì vậy khoảng cách giữa đặc tuyến này và trục hoành cũng lớn hơn. Phạm vi phía dưới đặc tuyến này vẫn gọi là miền tắt (hoặc miền khóa), ứng với trạng thái cả  $J_E$  và  $J_C$  đều phân cực nghịch.
- Các đặc tuyến phía trên (ứng với  $I_B \neq 0$ ) vẫn bao gồm ba đoạn. Đoạn chệch xiên (ứng với trạng thái dẫn bão hòa của BJT) lúc này nằm ở bên phải trục tung (trong phạm vi  $V_{CE}$  từ 0V đến cỡ 1,2V). Khi  $V_{CE} = 0$ , dòng  $I_C$  sẽ giảm về không, mọi đặc tuyến đều đi qua gốc toạ độ – Đoạn nằm ngang (ứng với trạng thái khuếch đại của BJT) có độ dốc lớn hơn so với đặc tuyến mạch B.C – Còn đoạn dốc đứng (vẽ chấm chấm bên phải) ứng với quá trình đánh thủng.



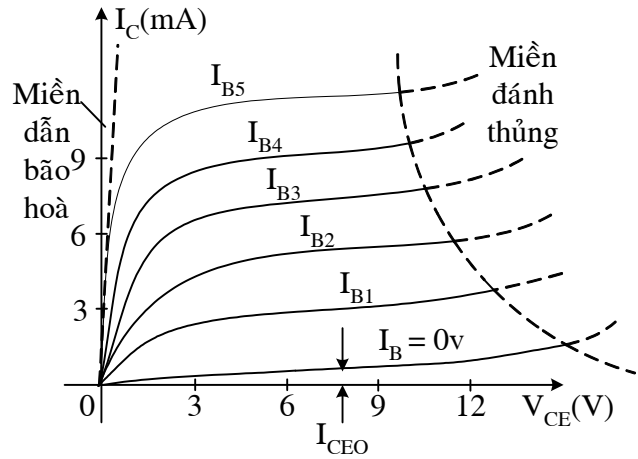
Hình 2.5.11. Họ đặc tuyến vào tĩnh của BJT mắc E-C

Giải thích các điều trên cần dựa vào đặc điểm của mạch E.C. Ở đây nguồn  $E_2$  (và do đó điện áp  $V_{CE}$ ) không chỉ gây ra sự phân cực nghịch của chuyển tiếp  $J_C$  mà còn có một phân lượng nhỏ hạ trên chuyển tiếp  $J_E$ , khiến  $J_E$  phân cực thuận. Vì vậy khi  $V_{CE}$  tăng (bằng cách tăng nguồn  $E_2$ ) thì tình trạng phân cực thuận của  $J_E$  cũng tăng, khiến dòng  $I_C$  tăng nhanh. Ngoài ra còn do hiệu ứng Early: khi  $V_{CE}$  tăng, chiều dày thực tế của miền base thu hẹp, số hạt dẫn hao hụt trên đường đi giảm bớt và số tới được collector sẽ nhiều lên. Hai lý do trên làm cho đặc tuyến có độ dốc lớn hơn.

Mặt khác :  $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$

$J_E$  phân cực thuận nên  $V_{BE}$  hầu như ít thay đổi, do đó  $V_{CB}$  giảm dần theo quá trình của  $V_{CE}$ . Khi  $V_{CE}$  giảm đến một giá trị khá bé nào đó (tương ứng với điểm uốn trên đặc tuyến – ranh giới giữa đoạn chệch xiên và đoạn nằm ngang) thì  $V_{CB}$  trở nên bằng không. Sau đó, trong khi  $V_{CE}$  tiếp tục giảm thì  $V_{CB}$  đổi dấu, nghĩa là  $J_C$  trở nên phân cực thuận. Lúc này, qua miền base sẽ có thêm dòng điện thuận của  $J_C$  (chạy ngược chiều dòng  $I_C$ ) làm dòng tổng hợp giảm. Quá trình này tương ứng với trạng thái dẫn bão hòa của BJT (đoạn đặc tuyến chệch xiên cạnh trục tung).

Khi tăng  $V_{CE}$  lên khá lớn sẽ đánh thủng chuyển tiếp  $J_C$  - Quá trình này tương tự như ở mạch B.C nhưng giá trị  $V_{CE}$  tương ứng thường nhỏ hơn điện áp đánh thủng  $V_{CB}$  ở mạch B.C. Điều này bắt nguồn từ hiện tượng một bộ phận nhỏ của  $V_{CE}$  hạ trên  $J_E$  và làm phân cực thuận chuyển tiếp này như đã nhận xét ở trên. Khi  $V_{CE}$  lớn, dòng hạt dẫn từ emitter phun vào miền base sẽ rất lớn, tạo tiền đề quá trình đánh thủng (thác lũ hoặc tunen) xảy ra sớm hơn.



Hình 2.5.12. Họ đặc tuyến ra tính của BJT mắc E-C

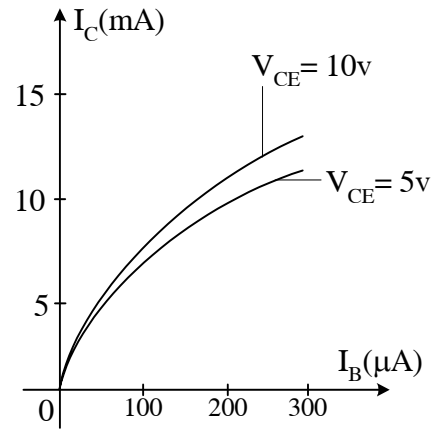
Ở các transistor tần số cao, bề dày miền base rất mỏng, còn có thể đánh thủng dưới dạng khác: khi  $V_{CE}$  lớn, vùng nghèo  $J_C$  mở rộng tới mức choán hết cả thể tích miền base, gây ra nối tắt giữa hai miền C-E.

c) Đặc tuyến truyền đạt dòng điện

$$I_C = f(I_B) \Big|_{V_{CE} = \text{const}} \quad (\text{xem h. 2-5-13})$$

Quan hệ này, một cách lý thuyết, có thể suy ra từ hệ thức (2-5-5). Độ dốc của đặc tuyến chính là hệ số khuếch đại dòng điện  $\beta$ . Trong phạm vi dòng điện lớn, giá trị  $\beta$  giảm, cho nên đặc tuyến không còn tuyến tính nữa.

Để vẽ đặc tuyến này (cũng như ở mạch B.C) không nhất thiết phải tiến hành đo từng cặp trị giá tương ứng của  $I_C$ ,  $I_B$  (hoặc  $I_C$ ,  $I_E$  ở mạch B.C) mà có thể ngoại suy từ họ đặc tuyến ra.



Hình 2.5.13. Họ đặc tuyến truyền đạt dòng điện của BJT mắc E-C

### 3. Mạch collector chung (C.C)

- Họ đặc tuyến vào và tính chất lý thuyết của mạch C.C

$$I_B = f(V_{BC}) \Big|_{V_{CE} = \text{const}}$$

trên thực tế ít dùng

Còn đặc tuyến ra

$$I_E = f(V_{EC}) \Big|_{I_B = \text{const}}$$

và đặc tuyến truyền đạt dòng điện

$$I_E = f(I_B) \Big|_{V_{EC} = \text{const}}$$

Thì gần giống đặc tuyến tương ứng của mạch E.C, bởi vì  $I_E \approx I_C$ .

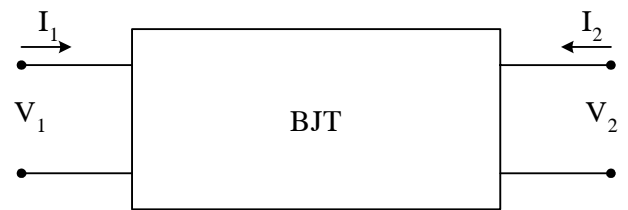
### 2-5-5. Tham số xoay chiều và mạch tương đương của BJT

#### 1. Tham số xoay chiều

Các họ đặc tuyến tĩnh giới thiệu trên đây biểu thị quan hệ giữ dòng và áp một chiều trên các điện cực. Chúng giúp ta hình dung rõ ràng sự hoạt động của BJT khi một trong những dòng điện

(hoặc điện áp) của nó thay đổi. Điều này đặc biệt tiện lợi khi lựa chọn vị trí điểm làm việc ban đầu (điểm làm việc tĩnh) của BJT hoặc khi BJT làm việc với tín hiệu lớn (điện áp vào và điện áp ra tăng giảm trong một phạm vi rộng và do đó điểm làm việc tức thời của BJT di chuyển trên một khoảng dài của đặc tuyến). Trên thực tế, nhiều khi BJT làm việc với tín hiệu nhỏ, có nghĩa là trên cơ sở các điểm áp một chiều phân cực cho hai chuyển tiếp  $J_E, J_C$  (xác định trên điểm làm việc tĩnh của BJT) nay có thêm điện áp xoay chiều  $e_s$  biên độ nhỏ đưa đến ngõ vào để BJT khuếch đại thành tín hiệu xoay chiều đáng kể trên tải ngõ ra. Trong trạng thái đó, (gọi là trạng thái động tín hiệu nhỏ), một cách gần đúng, có thể coi BJT như một phần tử tuyến tính, tức là phân tử mà quan hệ giữa dòng và áp trên nó thể hiện bằng những hàm bậc nhất. Điều này là hoàn toàn cho phép bởi vì, như thấy rõ từ các đồ thị ở phần trên trong phạm vi hẹp của điện áp hoặc dòng điện, đặc tuyến vôn-ampe của BJT coi như những đoạn thẳng với độ dốc không đổi.

Với quan niệm như vậy, có thể thay thế BJT ở trạng thái động tín hiệu nhỏ bằng một mạng bốn cực tuyến tính như h.2-5-14. Ở đây, một cách tổng quát, ký hiệu điện áp và dòng điện ở ngõ vào là  $V_1, I_1$  (hoặc  $V_i, I_i$ ) ở ngõ ra là  $V_2, I_2$  (hoặc  $V_o, I_o$ ) với chiều quy ước như hình vẽ. Sau này, khi áp dụng cho từng sơ đồ cụ thể (B.C, E.C hay C.C) thì các đại lượng kể trên sẽ là những điện áp hay dòng điện trên các cực tương ứng của transistor, đồng thời tùy theo loại BJT (N-P-N hay P-N-P) mà chúng có dấu (hoặc chiều) thích hợp.



Hình 2.5.14. Mạng bốn cực thay thế cho BJT

Khi diễn tả quan hệ giữa  $V_1, I_1, V_2, I_2$  có thể có sáu cách chọn biến số như ghi trên bảng sau:

Biến số	$I_1, I_2$	$V_1, V_2$	$I_1, V_2$	$V_1, I_2$	$V_2, I_2$	$V_1, I_1$
Hàm số	$V_1, V_2$	$I_1, I_2$	$V_1, I_2$	$I_1, V_2$	$V_1, I_1$	$V_2, I_2$

Trên thực tế chỉ thông dụng 3 cách đầu và tương ứng với chúng có 3 hệ tham số đặc trưng cho BJT: hệ tham số  $z, y$  và  $h$ . Dưới đây chỉ trình bày loại thông dụng nhất: hệ tham số  $h$ .

Thật vậy, nếu chọn  $I_1, V_2$  làm hai biến độc lập, còn  $V_1, I_2$  là hàm của chúng thì hoạt động và tính năng của BJT (cũng là của mạng 4 cực tương đương) có thể diễn tả bởi hai quan hệ hàm sau đây:

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= f_1(I_1, V_2) \\ I_2 &= f_2(I_1, V_2) \end{aligned} \right\} \quad (2-5-8)$$

Áp dụng cách tính vi phân toàn phần của một hàm hai biến ta có:

$$dV_1 = \frac{\partial V_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial V_1}{\partial V_2} dV_2 \quad (2-5-8)$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial V_2} dV_2 \quad (2-5-10)$$

Gọi  $\frac{\partial V_1}{\partial I_1} = h_{11}$  (hoặc  $h_i$ ) (2-5-11)

$$\frac{\partial V_1}{\partial V_2} = h_{12} \quad (\text{hoặc } h_r) \quad (2-5-12)$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial I_1} = h_{21} \quad (\text{hoặc } h_f) \quad (2-5-13)$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial V_2} = h_{22} \quad (\text{hoặc } h_o) \quad (2-5-14)$$

đồng thời ký hiệu các lượng biến thiên  $dV_1, dV_2, dI_1, dI_2$  bằng các chữ thường  $v_1, v_2, i_1, i_2$  (chúng cũng đại diện cho các điện áp và dòng điện xoay chiều do nguồn tín hiệu  $e_s$  gây ra trên các cực của BJT ở trạng thái động), hệ phương trình trên trở thành:

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \end{cases} \quad (2-5-15), (2-5-16)$$

Ta gọi đây là hệ phương trình cơ bản dùng tham số h. Nó diễn tả quan hệ giữa dòng và áp trên ngõ vào và ngõ ra của mạng 4 cực (đại diện cho transistor) nói cách khác: nó gián tiếp phản ánh mối quan hệ tiềm ẩn bên trong transistor khi làm việc ở trạng thái động tín hiệu nhỏ.

Từ hệ phương trình cơ bản dùng tham số h, ta rút ra ý nghĩa của từng tham số:

$$h_{11} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2=0} \quad \text{hoặc } h_i$$

là điện trở vào (tổng quát hơn: trở kháng vào) của BJT khi điện áp xoay chiều ở ngõ ra bị ngắn mạch.

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0} \quad \text{hoặc } h_f$$

là hệ số khuếch đại dòng điện (hoặc: độ lợi dòng) của BJT khi ngõ ra bị ngắn mạch đối với tín hiệu xoay chiều.

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{hoặc } h_o$$

là điện dẫn ra (tổng quát hơn: dẫn nạp ra) của BJT khi dòng xoay chiều ở ngõ vào bị hở mạch.

$$h_{12} = \left. \frac{v_1}{v_2} \right|_{i_1=0} \quad \text{hoặc } h_r$$

là hệ số truyền ngược về điện áp (còn gọi: hệ số hồi tiếp điện áp) của BJT khi hở mạch ngõ vào đối với tín hiệu xoay chiều.

Như vậy, phẩm chất, tính năng của transistor sẽ thể hiện qua giá trị các tham số  $h_{ij}$  của chúng. Các  $h_{ij}$  được gọi là các tham số xoay chiều (hoặc tham số vi phân) của BJT. Về mặt đơn vị đo,  $h_{11}$  (hoặc  $h_i$ ) có thứ nguyên điện trở ( $\Omega, K\Omega$ ),  $h_{22}$  (hoặc  $h_o$ ) có thứ nguyên điện dẫn (mho hoặc siement), còn  $h_{12}$  (hoặc  $h_r$ ) và  $h_{21}$  (hoặc  $h_f$ ) chỉ là hệ số, không thứ nguyên. Vì lý do này, h được gọi là tham số hỗn hợp (hybrid).

Sau này khi áp dụng cho từng sơ đồ cụ thể, tùy theo BJT mắc kiểu nào (B.C, E.C hay C.C) mà các tham số có thêm chỉ số tương ứng. Ví dụ  $h_{11B}$  (hoặc  $h_{iB}$ ) là điện trở vào của mạch E.C, v.v...).

Bên cạnh tham số  $h_{21}$  (hoặc  $h_f$ ) nhiều khi người ta còn dùng tham số “hỗ dẫn”:

$$g_m = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2=0}$$

$g_m$  nêu ảnh hưởng của điện áp vào đối với dòng điện ra. Dễ dàng chứng minh được:

$$g_m = \frac{h_{21}}{h_{11}} \quad \text{hay} \quad g_m = \frac{h_f}{h_i} \quad (2-5-21)$$

$$\text{Áp dụng cho mạch E.C thì } g_m = \frac{h_{fE}}{h_{iE}} \quad \text{hay } h_{fE} = g_m h_{iE} \quad (2-5-22)$$

Ngoài hệ tham số h, người ta còn dùng cả tham số khác: tham số z (hay tham số trở kháng), tham số y (hay tham số dẫn nạp).

Quá trình hệ phương lập hệ phương trình cơ bản đối với các tham số này vẫn tương tự như trên (chỉ khác ở cách chọn biến và hàm). Ý nghĩa của từng tham số  $z_{ij}$ ;  $y_{ij}$  vẫn được suy luận một cách tương tự.

Chẳng hạn  $z_{11} = \frac{v_1}{i_1} \Big|_{i_2=0}$  là điện trở vào của BJT khi hở mạch xoay chiều ở ngõ ra

$y_{22} = \frac{i_2}{v_2} \Big|_{v_1=0}$  là điện dẫn ra của BJT khi ngõ vào bị ngắn mạch điện áp xoay chiều v.v...

Giữa tham số z, y, và h có liên hệ chặn chẽ với nhau. Biết một hệ tham số, có thể tính ra giá trị của hệ tham số khác.

Cũng cần lưu ý rằng về mặt toán học, các tham số xoay chiều giới thiệu trên đây thực chất là những đạo hàm riêng. Chúng biểu thị cho các độ dốc (hoặc nghịch đảo độ dốc) của những đặc tuyến tĩnh tương ứng. Vì vậy trị số của từng tham số  $h_{ij}$  (hoặc  $z_{ij}$ ,  $y_{ij}$ ) thay đổi theo điểm làm việc của BJT. Mặt khác, các tham số xoay chiều chỉ có ý nghĩa khi BJT làm việc với tín hiệu nhỏ.

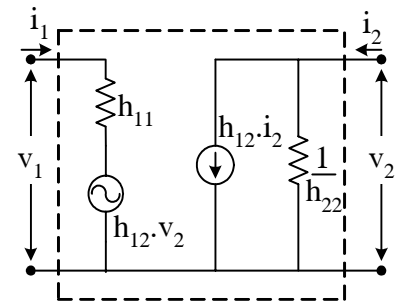
### 2. Mạch tương đương của BJT

Dựa vào hệ phương trình cơ bản (2-5-15), (2-5-16), ta vẽ được mạch tương đương dùng tham số h của BJT (đối với tín hiệu xoay chiều biên độ nhỏ, tần số thấp) như h. 2-5-15a. Trong mạch vào, ngoài điện trở vào  $h_{11}$  (hoặc  $h_i$ ) còn có nguồn điện áp  $h_{12}v_2$  (hoặc  $h_r v_o$ ). Nó thể hiện ảnh hưởng của ngõ ra đối với ngõ vào, tức là thể hiện sự truyền điện áp theo chiều ngược (hiện tượng hồi tiếp nội bộ của BJT). Trên thực tế, các BJT thường có  $h_{12}$  (hay  $h_r$ ) rất bé (cỡ  $10^{-3} \div 10^{-4}$ ), vì vậy nguồn điện áp hồi tiếp  $h_{12}v_2$  (hay  $h_r v_o$ ) có thể bỏ qua. Ở mạch ra, nguồn dòng điện  $h_{21}i_1$  (hoặc  $h_{fi}$ ) phản ánh khả năng khuếch đại dòng của BJT (hễ ngõ vào có dòng  $i_1$  thì ở ngõ ra có dòng tương ứng là  $h_{21}i_1$ ; nguồn dòng này có nội trở vô cùng lớn). Điện dẫn ra  $h_{22}$  (hoặc  $h_o$ ) cũng chính là độ dốc đặc tuyến ra của BJT. Thông thường  $h_{22}$  rất bé (tức là điện trở ra  $\frac{1}{h_{22}}$  rất lớn) nên có thể bỏ qua nhánh này. Như

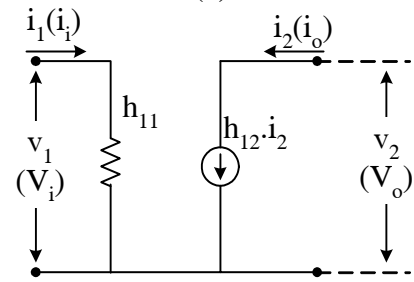
vậy sơ đồ tương đương đơn giản hóa (dùng tham số h) sẽ như h.2-5-15b. Khi áp dụng cho BJT mắc E.C sẽ có sơ đồ h. 2-5-15c, rất thông dụng về sau. Ở đây nguồn dòng  $h_{FE} i_B$  còn có thể viết dưới dạng khác khi lợi dụng quan hệ (2-5-22):

$$h_{FE} i_B = h_{FE} \frac{V_{BE}}{h_{IE}} = g_m v_{BE} \quad (2-5-15b)$$

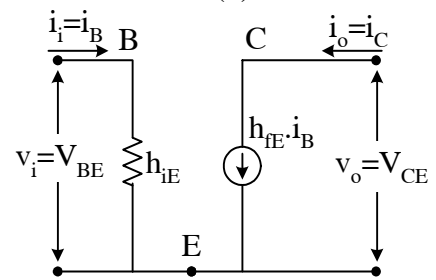
bên cạnh sơ đồ tương đương trên đây (gọi là sơ đồ toán học), người ta còn dùng sơ đồ vật lý gọi như vậy vì sơ đồ này phản ánh cấu trúc vật lý thực như transistor).



(a)

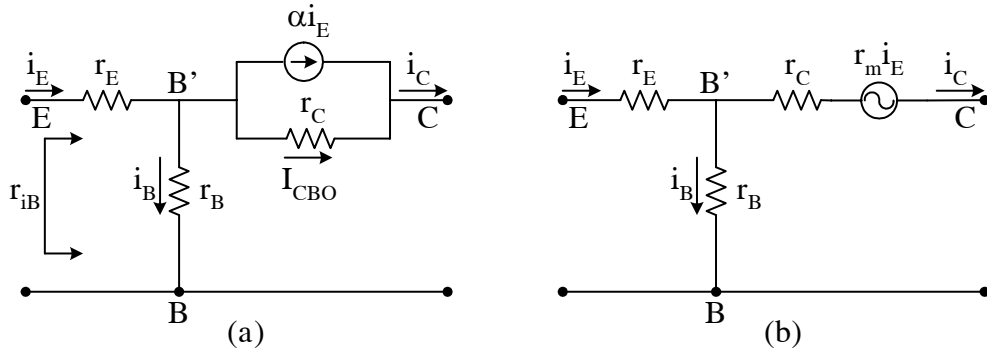


(b)



(c)

Hình 2.5.15. Mạch tương đương dùng tham số h của BJT (a) dạng đơn giản hoá (b) và dạng đơn giản hoá áp dụng cho BJT mắc E.C (c)



Hình 2.5.16. Sơ đồ tương đương vật lý dùng nguồn dòng (a) dùng nguồn áp (b) của BJT mắc B.C

Chẳng hạn khi BJT mắc B.C (nền chung), mô phỏng theo cấu trúc thực của transistor ta có sơ đồ tương đương như h. 2-5-16a. Ở đây  $r_E$  là điện trở tương đương của vùng nghèo

$$r_E = \frac{dV_{EB'}}{dI_E} \approx \frac{dV_{EB}}{dI_E} \quad (2-5-24b)$$

$r_E$  cũng chính là nghịch đảo độ dốc của đặc tuyến vào (h.2-5-8) va, theo (2-4-3b), ở nhiệt độ thường có thể tính  $r_E = \frac{25[mV]}{I_E[mA]}$  (2-5-24b)

$r_B$  là điện trở bản thân của miền base đối với dòng điện  $I_B$ . Thông thường các BJT công suất nhỏ có  $r_B = 100 \div 300\Omega$ .

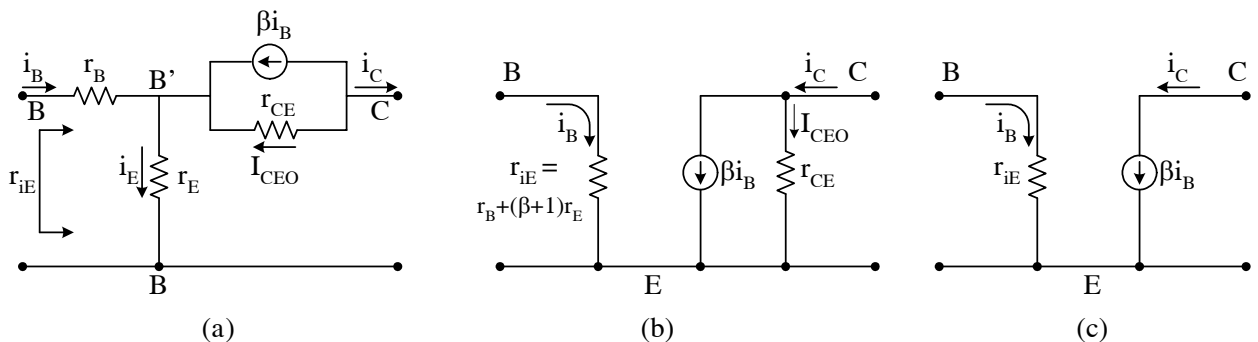
$r_C$  là điện trở tương đương của vùng nghèo collector

$$r_C = \left. \frac{dV_{CB'}}{dI_C} \right|_{I_E = \text{const}} \approx \left. \frac{dV_{CB}}{dI_C} \right|_{I_E = \text{const}}$$

Do  $J_C$  phân cực nghịch cho nên  $r_C$  thường rất lớn (hàng  $M\Omega$ ). Nó cũng chính là nghịch đảo độ dốc đặc tuyến ra (h.2-5-9). Do  $r_C$  lớn nên các đặc tuyến này gần như song song với trục hoành (độ dốc rất nhỏ). Trên thực tế do hiệu ứng Early cho nên đặc tuyến ra vẫn có một độ dốc nào đó. Nói cách khác giá trị  $r_C$  không phải là vô cùng lớn.

Nguồn dòng  $\alpha i_E$  phản ánh khả năng khuếch đại dòng điện (chính xác hơn khả năng truyền đạt dòng điện) của BJT mắc B.C (khi ngõ vào có dòng  $i_E$  thì ở ngõ ra có dòng tương ứng là  $\alpha i_E$ ).

Nguồn điện áp hồi tiếp nội bộ ở trong mạch vào đã bỏ qua không vẽ.



Hình 2.5.17. Sơ đồ tương đương vật lý của BJT mắc E.C

Cũng có thể biến đổi thành dạng sơ đồ tương đương dùng nguồn áp như h. 2-5-16b, với:

$$r_m = \alpha r_C \quad (2-5-26)$$

Hệ số  $\alpha$  chứa trong nguồn dòng hoặc nguồn áp trên h. 2-5-16 là hệ số truyền đạt dòng điện xoay chiều của mạch B.C, tương ứng với tham số  $h_{fb}$ . Nó không đồng nhất với khái niệm “hệ số truyền đạt dòng điện tĩnh” (dòng một chiều) đã định nghĩa ở (2-5-1). Tuy vậy, do giá trị hai tham số này thường xấp xỉ nhau, cho nên người ta vẫn dùng



chung một ký hiệu  $\alpha$ . Cũng với lý do tương tự, ở mạch E.C (h.2-5-17) nguồn dòng điện là  $h_{FE} i_B$  nhưng người ta vẫn quen ký hiệu là  $\beta i_B$ .

Khi BJT mắc EC (phát chung), sơ đồ tương đương vật lý có dạng như h.2-5-17a. Ở đây:

$$r_{CE} = \left. \frac{dV_{CB'}}{dI_C} \right|_{I_B = \text{const}} \approx \left. \frac{dV_{CE}}{dI_C} \right|_{I_B = \text{const}} \quad (2-5-27)$$

Nó chính là nghịch đảo độ dốc đặc tuyến ra của BJT mắc E.C (h. 2-5-12)

Như đã nói ở phần trước, đặc tuyến có độ dốc lớn hơn so với đặc tuyến ra của mạch B.C vì vậy trị số  $r_{CE}$  tuy khá lớn nhưng vẫn nhỏ hơn  $r_C$ .

Ở mạch vào của h. 2-5-17a, ta nhận thấy:

$$V_{BE} = V_{BB'} + V_{B'E} = i_B r_B + I_E r_E = i_B [r_B + (\beta + 1)r_E] = i_B r_{IE} \quad (2-5-28)$$

$$\text{trong đó: } r_{IE} = r_B + (\beta + 1)r_E \quad (2-5-29)$$

là điện trở vào của transistor mắc E.C (cũng chính là  $h_{1IE}$  hoặc  $h_{iE}$ )

Mặt khác, ở mạch ra có:  $r_{CE} \gg r_E$

Do đó có thể biến đổi h.2-5-17a thành mạch tương đương đơn giản hơn như h.2-5-17b, hoặc 2-5-17c (khi coi  $r_{CE}$  rất lớn)

Tóm lại, khi làm việc ở chế độ tín hiệu nhỏ, có thể thay thế BJT bằng một trong hai sơ đồ tương đương của nó: sơ đồ toán học (dùng một trong các hệ tham số  $h, y, z$ ) và sơ đồ vật lý (dùng các tham số  $r_E, r_B, r_C, r_{CE}, \alpha, \beta, \dots$ ). Việc thay thế như vậy giúp có sự phân tích toán các loại lượng được đơn giản và tiện lợi. Ta sẽ ứng dụng các sơ đồ tương đương này, kết hợp với nguồn tín hiệu ở ngõ vào, điện trở tải ở ngõ ra, cùng các điện trở phân cực để khảo sát các tham số cơ bản của tầng khuếch đại dùng BJT ở phần 4-5 sau này.

Cũng cần lưu ý rằng những sơ đồ tương đương trên đây chưa kể đến điện dung của các chuyển tiếp P-N, cũng như quan hệ phụ thuộc tần số của các tham số  $\alpha, \beta, \dots$  vì vậy chúng chỉ dùng cho BJT làm việc ở tần số thấp hoặc trung bình. Khi làm việc ở tần số cao mạch tương đương của BJT sẽ được tạp hơn.

### 2-5-5. Các tham số giới hạn của BJT

Ngoài các tham số một chiều và xoay chiều (đặc trưng cho chế độ làm việc thông thường của BJT) giới thiệu ở trên, khi sử dụng, để tránh hư hỏng ta cần lưu ý các tham số giới hạn sau đây:

#### 1. Dòng cực đại cho phép

Tùy theo diện tích mặt tiếp xúc, vật liệu và công nghệ chế tạo, điều kiện tỏa nhiệt v.v... mỗi BJT chỉ có phép một dòng điện tối đa trên mỗi điện cực. Ta thường ký hiệu các giới hạn này là  $I_{E\max}, I_{B\max}, I_{C\max}$

#### 2. Điện áp cực đại cho phép $V_{CB\max}, V_{CE\max}, V_{BE\max}$

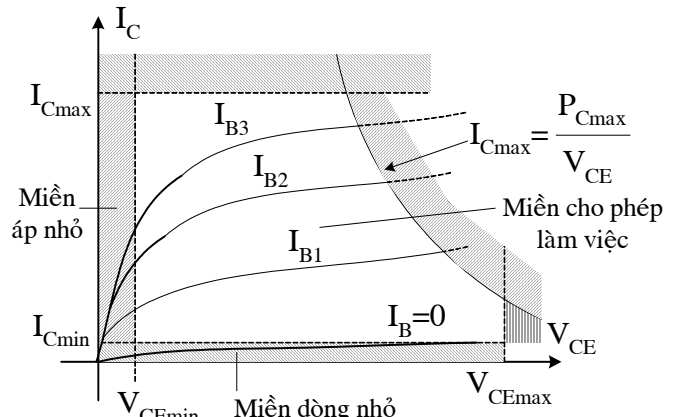
Đó là các điện áp không được vượt quá để không gây đánh thủng các chuyển tiếp P-N tương ứng.

#### 3. Công suất tiêu tán cực đại cho phép

Tùy theo kết cấu và công nghệ chế tạo, đặc biệt là tùy theo điều kiện tỏa nhiệt của chuyển tiếp collector mà mỗi transistor có một công suất tiêu tán cực đại cho phép, ký hiệu là  $P_{C\max}$ . Giá trị này thường cho trong các cẩm nang, kèm theo điều kiện cụ thể về nhiệt độ môi trường và chế độ tỏa nhiệt. Khi làm việc trong một tầng khuếch đại nào đó, để không phá hỏng BJT, công suất tức thời tiêu tán trên transistor nhất thiết không được vượt quá giá trị  $P_{C\max}$ . Điều này thường được thể hiện trên họ đặc tuyến ra (ví dụ của BJT mắc E.C) bởi đường giới hạn (dạng hyperbol, xem h. 2-5-18):

$$I_{C\max} = \frac{P_{C\max}}{V_{CE}} \quad (2-5-30)$$

Như vậy phạm vi làm việc cho phép của BJT bị hạn chế bởi cả 3 tham số vừa nêu trên ( $I_{Cmax}$ ,  $V_{CEmax}$ ,  $P_{Cmax}$ ). Ngoài ra miền “dòng điện nhỏ” nằm sát trục hoành  $I_C < I_{CEO}$  (ứng với trạng thái khóa của BJT) cũng là hai miền không dùng cho chế độ khuếch đại. Tóm lại, loại trừ mọi hạn chế, miền làm việc cho phép được minh họa trên h.2-5-18. Sau này, khi khảo sát vị trí điểm làm tĩnh, vị trí đường tải cho phép, công suất tối đa mà tầng khuếch đại có thể đưa ra trên tải v.v... ta sẽ gặp lại các giới hạn về hai phía của dòng điện và điện áp vừa nêu.



Hình 2.5.18. Minh họa miền làm việc cho phép trên họ đặc tuyến ra của BJT

#### 4. Tần số giới hạn

Thông thường BJT chỉ làm việc một cách hiệu quả đến một tần số nhất định. Khi tần số tín hiệu tăng cao, vai trò điện dung của chuyển tiếp P-N dần dần trở nên đáng kể. Mặt khác, chuyển động của hạt dẫn qua chiều dày miền base không thể coi là tức thời và chiếm một thời gian đáng kể so với chu kỳ tín hiệu. Vì vậy, các hệ số truyền đạt dòng điện  $\beta$  sẽ bị giảm theo tần số; dòng điện ra và dòng điện vào (hoặc điện áp vào) sẽ bị lệch pha nhau v.v..., gây nên cái gọi là “méo tần số”, “méo pha” v.v...

Giả sử ở tần số thấp, BJT có hệ số truyền đạt dòng điện là  $\alpha_0$  (mạch base chung) hoặc  $\beta_0$  (mạch emitter chung)

Người ta chứng minh được rằng, khi làm việc ở tần số cao, các hệ số  $\alpha$ ,  $\beta$  trở thành những số phức và phụ thuộc vào tần số dưới dạng:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}} \quad (2-5-31)$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}} \quad (2-5-32)$$

trong đó  $f_\alpha$ ,  $f_\beta$  là những hằng số, phụ thuộc vào điện dung của các chuyển tiếp ( $C_{EB}$ ,  $C_{BC}$ ), vào bề dày miền base và hệ số khuếch tán của hạt dẫn qua miền đó.

Dễ dàng thấy rằng tại tần số  $f = f_\alpha$  thì modul của  $\alpha$  bị giảm  $\sqrt{2}$  lần (hoặc 3 dB) so với giá trị  $\alpha_0$ . Cũng tương tự đối với  $\beta$  tại  $f = f_\beta$

Theo thứ tự  $f_\alpha$ ,  $f_\beta$  được gọi là tần số giới hạn (hoặc tần số cắt) của mạch B.C và mạch E.C.

Ngoài ra, tần số mà tại đó modul của  $\beta$  giảm xuống bằng 1, được gọi là tần số dao động cực đại của BJT, ký hiệu là  $f_T$ .

Người ta chứng minh được quan hệ giữa 3 tần số nói trên như sau:

$$f_\alpha = (\beta + 1)f_\beta \text{ hay } f_\beta = (1 - \alpha)f_\alpha \quad (2-5-33)$$

$$f_T = \beta f_\beta \quad (2-5-34)$$

Như vậy cùng một loại BJT, khi mắc theo sơ đồ B.C sẽ có khả năng làm việc đến tần số cao hơn so với sơ đồ E.C (Mạch C.C cũng có tần số cắt xấp xỉ mạch E.C)

Bảng giới thiệu tham số điển hình của vài loại BJT.

Bảng 2-5: Tham số điển hình của vài loại BJT

Tên gọi	Loại	$\beta$	$f_\alpha$	$I_{CBO}$	$V_{CEOmax}$	$V_{CB0max}$	$I_{Cmax}$	$P_{Cmax}$ ( $T=25^\circ C$ )
2N930	NPN	60-350	>50MHz	10Na	45V	45V	100A	0,3W
2N3053	NPN	50-250	100MHz	0,25 $\mu$ A	40V	60V	0,7A	4W
2N3055	NPN	15-120	0,8MHz		90V	100V	15A	115W

**2-6. TRANSISTOR TRƯỜNG (F.E.T- field effect transistor)**

Khác với BJT vừa nghiên cứu ở phần trên (cấu tạo bởi 2 chuyển tiếp P-N, sử dụng cả hai loại hạt dẫn đa số và thiểu số nên thuộc loại lưỡng cực tính hay lưỡng hạt), transistor trường (thường gọi tắt là F.E.T) hoạt động dựa trên sự điều khiển độ dẫn điện của phiên bán dẫn bởi một điện trường ngoài, đồng thời chỉ dùng một loại hạt dẫn (hạt đa số), do đó thuộc loại đơn cực tính (unipolar). Tuy nó ra đời muộn hơn BJT, nhưng tính năng có nhiều ưu việt hơn (điện trở vào lớn, hệ số khuếch đại cao, tiêu thụ năng lượng bé, thuận tiện phát triển theo xu hướng vi điện tử hóa v.v...) vì vậy ngày càng được ứng dụng rộng rãi.

Transistor trường bao gồm 2 nhóm: transistor trường dùng chuyển tiếp P-N, gọi tắt J.F.E.T (junction field effect transistor) và transistor trường có cực cửa cách ly, gọi tắt là IGFET (isolated gate field effect transistor)

Hoặc MOSFET (metal - oxide - semiconductor field effect transistor).

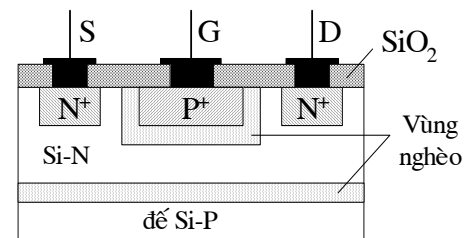
Nhóm IGFET lại chia thành 2 loại: loại kênh có sẵn và loại kênh cảm ứng. Dưới đây ta lần lượt khảo sát cấu tạo và hoạt động của từng nhóm.

**2-6-1 Transistor trường dùng chuyển tiếp P-N (J.F.E.T)**

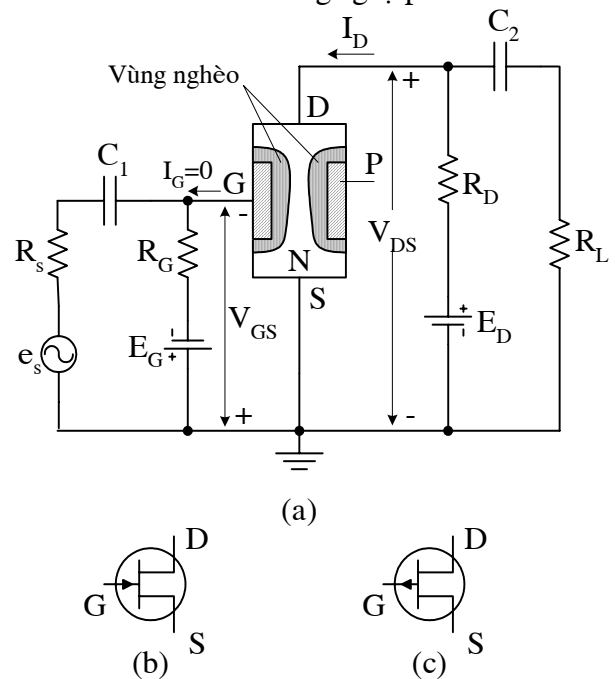
**1. Cấu tạo**

Cấu tạo đơn giản hoá của JFET cùng mạch hoạt động như h. 2-6-1a.

Thỏi bán dẫn Si loại N hình trụ có điện trở suất khá lớn (tức là nồng độ tạp donor tương đối thấp), được gắn với hai sợi kim loại ở đáy trên và đáy dưới (tiếp xúc không chính lưu). Đáy trên gọi là cực máng ký hiệu là D (từ chữ drain) và đáy dưới gọi là cực nguồn ký hiệu là S (source) - vòng theo chu vi của thỏi bán dẫn loại N người ta tạo ra một lớp loại P, và do đó tại ranh giới giữa hai bán dẫn sẽ hình thành một chuyển tiếp P-N (vùng nghèo) có điện trở suất khá lớn. Phần thể tích còn lại của thỏi Si (không bị vùng nghèo chiếm chỗ) được gọi là kênh dẫn. Lớp bán dẫn loại P cũng được tạo tiếp xúc không chính lưu với một sợi kim loại, dùng làm cực cửa, ký hiệu là G (gate), còn gọi là cực điều khiển. Toàn bộ hệ thống trên



Hình 2.6.2. Cấu trúc JFET chế tạo theo công nghệ planar



Hình 2.6.1. Mạch khuếch đại dùng JFET kênh N (a) ký hiệu của nó (b) và ký hiệu loại JFET kênh P (c)

được đặt trong một vỏ bằng kim loại hoặc bằng nhựa gắn kín, chỉ có 3 điện cực D, S, G thò ra ngoài. Ta gọi đó là JFET kênh N với ký hiệu quy ước như h. 2-6-1b.

Một cấu trúc tương tự nhưng dùng thỏi bán dẫn bán đầu loại P và lớp bao quang chu vi là loại N thì sẽ có JFET kênh P - ký hiệu quy ước như h.2-6-1c.

Thật ra cấu trúc thực tế của JFET phức tạp hơn chẳng hạn với công nghệ planar - epitaxy, cấu trúc của JFET kênh N như h. 2-6-2. Các điện cực S, G, D đều lấy ra từ trên bề mặt của phiến bán dẫn, các vùng N<sup>+</sup> dùng để tạo tiếp xúc không chính lưu giữa cực nguồn, cực máng với kênh dẫn loại N. Miền P<sup>+</sup> đóng vai trò cực cửa. Lớp cách điện SiO<sub>2</sub> bảo vệ bề mặt.

## 2. Nguyên tắc hoạt động

Hãy xét trường hợp JFET kênh N làm ví dụ. Nối JFET với các nguồn điện áp phân cực E<sub>G</sub>, E<sub>D</sub> như h. 2-6-1a. Nguồn E<sub>D</sub>, thông qua điện trở R<sub>D</sub>, đặt điện áp V<sub>DS</sub> giữa cực máng và cực nguồn, gây ra dòng chuyển động qua kênh dẫn của điện tử (hạt đa số của thỏi bán dẫn N), tạo nên dòng điện máng I<sub>D</sub>.

Mặt khác, nguồn E<sub>G</sub> tạo điện áp giữa cực cửa và cực nguồn, làm cho chuyển tiếp P-N (hình thành giữa cửa và kênh dẫn) bị phân cực nghịch, nghĩa là làm cho bề dày vùng nghèo tăng lên và do đó thu hẹp tiết diện của kênh dẫn.

Thật ra do điện trở suất của kênh dẫn khá lớn nên khi chạy qua kênh dẫn, dòng I<sub>D</sub> sẽ gây ra một sự phân bố điện thế dọc theo chiều dài của kênh. Các điểm trong kênh có vị trí càng gần cực D (tức là càng xa cực S) sẽ có điện thế càng cao, do đó tình trạng phân cực nghịch của chuyển tiếp P-N tăng dần theo hướng từ cực S đến cực D. Nói cách khác: kênh dẫn có tiết diện giảm dần: ở gần cực máng, kênh dẫn là hẹp nhất.

Nếu giữ E<sub>D</sub> không đổi tăng dần giá trị E<sub>G</sub>, tình trạng phân cực nghịch của chuyển tiếp P-N sẽ càng tăng: vùng nghèo càng mở rộng, kênh dẫn càng thu hẹp. Do đó điện trở kênh dẫn càng tăng và dòng máng I<sub>D</sub> càng giảm. Còn dòng giữa cực G và cực S chỉ là dòng ngược của chuyển tiếp P-N, thường rất nhỏ, không đáng kể.

$$I_G \approx 0$$

Nếu bây giờ ngoài điện áp phân cực E<sub>G</sub> có thêm tín hiệu xoay chiều e<sub>s</sub> đặt vào giữa cực G và cực S (h. 2-6-1a) thì rõ ràng là tùy trị số và dấu của e<sub>s</sub> mà tình trạng phân cực nghịch của chuyển tiếp P-N sẽ thay đổi. Từ đó, điện trở kênh dẫn bị biến đổi và dòng máng cũng bị biến đổi theo. Nếu e<sub>s</sub> tăng giảm theo quy luật hình sin thì I<sub>D</sub> sẽ tăng giảm theo hình sin. Dòng này hạ trên R<sub>D</sub> thành một điện áp, biến thiên cùng dạng với e<sub>s</sub> nhưng biên độ lớn hơn, nghĩa là JFET đã khuếch đại tín hiệu.

Nguyên lý hoạt động của JFET kênh P hoàn toàn tương tự, chỉ lưu ý rằng có điện áp E<sub>G</sub>, E<sub>D</sub> có cực tính ngược lại (h. 2-6-3). Tạo nên dòng máng ở đây là do các lỗ trống, hạt dẫn đa số của kênh P.

## 3. Đặc tuyến vôn-ampe (xét loại JFET kênh N)

$$a) \text{ Đặc tuyến ra (còn gọi: đặc tuyến máng) } I_D = f(V_{DS}) \Big|_{V_{GS} = \text{const}}$$

- Trước hết xét trường hợp V<sub>GS</sub> = 0 (ngắn mạch G-S). Tăng dần V<sub>DS</sub> từ giá trị không trở đi, quan hệ I<sub>D</sub> theo V<sub>DS</sub> có dạng như h. 2-6-4 (đường cao nhất). Đặc tuyến này bao gồm 3 đoạn.

Đoạn bên trái gần như tuyến tính, với độ dốc khá lớn (đoạn OA)

Ở phạm vi này, khi điện áp V<sub>DS</sub> còn nhỏ, phân bố điện thế do V<sub>DS</sub> gây ra trên điện trở kênh dẫn ảnh hưởng chưa đáng kể đến chiều dày vùng nghèo và đến tiết diện của kênh, vì vậy kênh dẫn đóng vai trò như một điện trở thông thường với giá trị hầu như không đổi: điện áp tăng khiến dòng điện tăng theo. Nhưng khi V<sub>DS</sub> lớn dần, ảnh hưởng nói trên ngày càng thể hiện rõ. Vùng

ngheo ngày càng mở rộng, lấn sâu vào kênh dẫn, thu hẹp tiết diện của kênh làm cho điện trở kênh tăng và dòng  $I_D$  tăng chậm lại.

Khi đạt tới giá trị  $V_{DS} = V_P$  (điểm A trên h. 2-6-4), vùng nghèo mở rộng tới mức choán kết tiết diện của kênh tại vùng gần cực máng, nghĩa là kênh dẫn bị thắt lại ở phía cực máng (h.2-6-5a). Người ta gọi  $V_P$  là điện áp thắt. Điểm A là điểm bắt đầu thắt kênh hay điểm bắt đầu bão hòa. Vùng đặc tuyến nằm ở bên trái điểm A gọi là vùng điện trở (hàm ý: kênh dẫn thể hiện như một điện trở)

Nếu tiếp tục tăng  $V_{DS}$  lớn hơn  $V_P$ , đặc tuyến chuyển sang đoạn thứ hai, gần như nằm ngang (đoạn AB trên hình 2-6-4). Lúc này vùng nghèo tiếp tục mở rộng, miền kênh bị thắt trải dài về phía cực nguồn, làm cho điện trở kênh dẫn càng tăng (h. 2-6-5b). Vì vậy tuy  $V_{DS}$  tăng những dòng  $I_D$  hầu như ít thay đổi. Vùng đặc tuyến này gọi là vùng thắt kênh (hoặc vùng bão hòa)

Sau này khi JFET được sử dụng như một phần tử khuếch đại, sẽ làm việc trong vùng này.

Đoạn đặc tuyến thứ ba (phía bên phải h.2-6-4) tương ứng với hiện tượng đánh thủng chuyển tiếp P-N, xảy ra khi  $V_{DS}$  quá lớn. Vùng đặc tuyến này gọi là vùng đánh thủng.

- Trường hợp  $V_{GS} \neq 0$ , ví dụ  $V_{GS}$  lần lượt lấy các giá trị âm tăng dần như biểu thị trên h. 2-6-4 (cho JFET kênh N). Mỗi đặc tuyến vẫn bao gồm 3 đoạn như trên, chỉ khác là do có thêm tác dụng của  $V_{GS}$  chuyển tiếp P-N bị phân cực nghịch nhiều hơn, điện trở kênh dẫn tăng hơn và do đó giá trị dòng  $I_D$  nhỏ hơn. Trị số tuyệt đối của  $V_{GS}$  càng tăng, dòng  $I_D$  càng giảm, đặc tuyến càng dịch về phía dưới. Mặt khác, điểm bắt đầu thắt kênh của mỗi đặc tuyến (điểm A,  $A_1$ ,  $A_2$ , ... trên h.2-6-4) xê dịch về phía trái

Điều này cũng dễ hiểu khi chú ý rằng trong trường hợp này chuyển tiếp P-N bị phân cực nghịch bởi tổng hai điện áp:  $V_{DS} + V_{SG} = V_{DS} + |V_{GS}|$  ... Điểm bắt đầu thắt kênh (điểm A,  $A_1$ ,  $A_2$ , ...) tương ứng với trạng thái tổng hai điện áp nói trên bằng giá trị  $V_P$ . Vì vậy khi số hạng  $|V_{GS}|$  càng lớn thì giá trị của số hạng thứ hai  $V_{DS}$  sẽ càng nhỏ. Điểm bắt đầu xảy ra đánh thủng của từng đặc tuyến (điểm B,  $B_1$ ,  $B_2$ , v.v...) cũng dịch dần về bên trái với lý do tương tự.

b) Đặc tuyến truyền đạt

$$I_D = f(V_{GS}) \Big|_{V_{DS} = \text{const}} \quad (\text{h.2-6-6})$$

Đặc tuyến này có thể xây dựng bằng thực nghiệm hoặc ngoại suy từ họ đặc tuyến ra. Dạng của nó phản ánh quá trình điện trường điều khiển dòng điện máng: trị số tuyệt đối của  $V_{GS}$  càng tăng, vùng nghèo càng mở rộng, điện trở kênh dẫn càng tăng và do đó dòng máng giảm. Khi  $V_{GS}$  đạt tới giá trị điện áp thắt  $V_P$  thì dòng máng giảm xuống bằng không.

Có thể mô phỏng đặc tuyến truyền đạt bằng hệ thức gần đúng:

$$I_D(V_{GS}) = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (\text{2-6-1})$$

Trong đó các điện áp  $V_{GS}$  và  $V_P$  lấy giá trị tuyệt đối (không kể dấu)

$I_{DSS}$  là giá trị dòng máng khi  $V_{GS} = 0$ , thường gọi là dòng máng bão hòa.

#### 4. Tham số đặc trưng cho JFET

a) Điện trở vi phân ngõ ra (còn gọi: điện trở kênh dẫn)

$$r_D = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \Big|_{V_{GS} = \text{const}} \quad (\text{2-6-2})$$

Đây cũng là nghịch đảo độ dốc đặc tuyến ra. Khi làm việc trong vùng bão hòa (vùng thắt kênh), giá trị  $r_D$  thường khá lớn (cỡ 500 k $\Omega$ )

b) Hồ dẫn (hay độ dốc đặc tuyến truyền đạt)

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{const}} \quad (2-6-3)$$

Trị số  $g_m$  phản ánh mức độ ảnh hưởng của điện áp điều khiển  $V_{GS}$  tới dòng máng. Các JFET thường có  $g_m = (7 \div 10) \text{ mA/V}$ .

Dựa vào đặc tuyến truyền đạt (h. 2-6-6), ta nhận thấy: tại  $V_{GS} \approx 0$ , độ dốc đặc tuyến là lớn nhất và thường lấy:

$$g_{m \max} = 2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \quad (2-6-4)$$

Còn tại các giá trị  $V_{GS}$  khác, có thể xác định:

$$g_m = g_{m \max} \cdot \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \quad (2-6-5)$$

c) Điện trở vi phân ngõ vào (còn gọi: điện trở vào)

$$r_i = \left. \frac{\partial V_{GS}}{\partial I_G} \right|_{V_{DS} = \text{const}} \quad (2-6-6)$$

Ngõ vào của JFET là chuyển tiếp P-N phân cực nghịch, dòng  $I_G$  chỉ rất bé (thường cỡ  $0,1 \mu\text{A}$  ở  $25^\circ\text{C}$ ) vì vậy điện trở  $r_i$  thường rất lớn (cỡ  $10 \div 100 \text{ M}\Omega$  ở  $25^\circ\text{C}$ )

d) Hệ số khuếch đại tĩnh

$$\mu = \left. \frac{\partial V_{GS}}{\partial V_{DS}} \right|_{I_D = \text{const}} \quad (2-6-7)$$

Hệ số này so sánh mức độ ảnh hưởng đối với dòng máng của điện áp  $V_{GS}$  và  $V_{DS}$ .  $\mu$  càng lớn thể hiện tác dụng điều khiển của  $V_{GS}$  đối với dòng  $I_D$  càng nhạy (so với  $V_{DS}$ )

Dễ dàng suy ra quan hệ:

$$\mu = g_m r_D \quad (2-6-8)$$

e) Điện dung liên cực  $C_{GS}$ ,  $C_{DS}$  và  $C_{GD}$

Đây là các điện dung ký sinh, hình thành giữa các điện cực với nhau. Thường cỡ  $(3 \div 10) \text{ pF}$ . Khi JFET làm việc ở số thấp, các điện dung này có thể bỏ qua.

Ngoài các tham số trên, người ta còn quan tâm đến một số tham số giới hạn như: dòng máng cực đại cho phép  $I_{D\max}$ , điện áp cực đại cho phép  $V_{DS\max}$ ,  $V_{GS\max}$ , công suất tiêu tán cực đại  $P_{D\max}$ , điện áp thắt kênh  $V_P$ , dòng máng bão hoà  $I_{DSS}$  v.v...

### 5. Sơ đồ tương đương

Dựa vào nguyên tắc hoạt động và các tham số đặc trưng cho JFET vừa xét, ta có sơ đồ tương đương (đối với tín hiệu xoay chiều biên độ nhỏ, tần số thấp) của JFET như h. 2-6-7a. Giữa hai cực vào G-S có điện trở rào  $r_i$ , giữa hai cực ra D-S có điện trở kênh dẫn  $r_d$  và nguồn dòng  $g_m V_{GS}$  (đại diện cho khả năng điều khiển dòng điện máng bởi điện áp vào  $V_{GS}$ ).

Như vậy nếu có tải mắc vào giữa hai cực ra D-S thì dòng điện tải (cũng là dòng điện máng) sẽ là:

$$i_D = g_m V_{GS} + \frac{V_{DS}}{r_D}$$

Thay  $g_m$  theo (2-6-8) sẽ đi đến:

$$V_{DS} = -\mu V_{GS} + i_D r_D \quad (2-6-10)$$

Hệ thức này tương ứng với sơ đồ tương đương h. 2-6-7b, trong đó  $\mu V_{GS}$  là nguồn điện áp, tương đương cho khả năng khuếch đại tín hiệu của JFET.

Tóm lại, khi làm việc với tín hiệu xoay chiều tần số thấp có thể thay thế JFET bằng một trong hai sơ đồ tương đương giới thiệu trên h. 2-6-7.

## 2-6-2. Transistor trường có cực cửa cách ly (MOSFET hoặc IGFET)

### 1. Cấu tạo và hoạt động của MOSFET kênh có sẵn (h.2-6-8)

Từ phiến Si loại P, người ta tạo ra trên bề mặt một lớp loại N dùng làm kênh dẫn. Ở hai đầu khuếch tán hai miền  $N^+$  dùng làm cực nguồn (S) và cực máng (D). Trên mặt phiến Si được phủ màng  $SiO_2$  bảo vệ. Phía trên màng này, đối diện với kênh dẫn, gắn một băng kim loại, dùng làm cực cửa (G). Thông qua “cửa sổ” khoát xuyên qua màng  $SiO_2$  ở vùng thích hợp, người ta phun kim loại, tạo tiếp xúc tuyến tính với hai vùng  $N^+$ , dùng làm đầu dẫn ra cho cực S và cực D. Đáy của phiến Si đôi khi cũng được gắn với sợi kim loại, dùng làm cực đế SUB (substrate). Thông thường cực đế được nối với cực nguồn.

Như vậy là đã hình thành cấu trúc MOSFET kênh có sẵn loại N. Ký hiệu quy ước như h. 2-6-8b. Tương tự, nếu phiến Si ban đầu thuộc loại N, kênh dẫn loại P thì có MOSFET kênh P, ký hiệu quy ước như h. 2-6-8c.

Hãy xét hoạt động của MOSFET kênh N trong mạch điện h. 2-6-9. Ban đầu, dưới tác dụng của điện áp  $V_{DS}$  (do nguồn  $E_D$  tạo ra), qua kênh dẫn và cực máng có dòng điện  $I_D$ , tạo bởi hạt dẫn đa số của kênh (điện tử). Nếu có thêm điện áp  $V_{GS}$  (do  $E_G$  tạo nên) với cực tính như hình vẽ thì cũng giống như quá trình xảy ra ở một tụ điện, các điện tích âm sẽ tích tụ trên cực G, các điện tích dương sẽ tích tụ ở cực đối diện, tức là trong kênh dẫn (lớp  $SiO_2$  đóng vai trò điện môi của tụ). Các điện tích dương này sẽ tái hợp với điện tử, làm giảm nồng độ hạt dẫn vốn có trong kênh, khiến điện trở của kênh tăng và dòng máng  $I_D$  giảm. Càng tăng trị số  $V_{GS}$ , dòng  $I_D$  càng giảm. Chế độ làm việc như vậy gọi là chế độ làm nghèo hạt dẫn (gọi tắt chế độ nghèo - depletion). Nếu đổi cực tính nguồn  $E_G$  ( $V_{GS}$  trở thành điện áp dương) thì tình hình diễn ra trái lại: càng tăng trị số  $V_{GS}$ , nồng độ hạt dẫn trong kênh càng tăng thêm, điện trở kênh càng giảm và dòng  $I_D$  càng tăng. Chế độ làm việc với cực tính  $V_{GS}$  như thế gọi là chế độ giàu (enhancement)

Như vậy là ngay khi  $V_{GS} = 0$ , MOSFET kênh có sẵn đã có dòng máng ban đầu  $I_D \neq 0$ . Tùy cực tính của  $V_{GS}$  mà MOSFET này hoạt động ở chế độ giàu hay chế độ nghèo, dùng giá trị của  $V_{GS}$  để điều khiển dòng  $I_D$  tăng hay giảm. Trên cơ sở đó, nếu có tín hiệu xoay chiều  $e_s$  đưa đến ngõ vào thì hiển nhiên dòng  $I_D$  sẽ biến đổi theo  $e_s$  và trên tải ở ngõ ra sẽ nhận được tín hiệu đã khuếch đại.

Đặc tuyến truyền đạt và đặc tuyến ra của MOSFET kênh có sẵn loại N (h. 2-6-10) hoàn toàn phản ánh quá trình trên đây. Mỗi đặc tuyến ra (h. 2-6-10b) vẫn bao gồm 3 đoạn, tương tự như JFET: đoạn  $I_D$  tăng gần tuyến tính theo  $V_{DS}$ , đoạn  $I_D$  bão hòa (trạng thái thắt kênh) và đoạn đánh thủng. Ở đây, chuyển tiếp P-N hình thành giữa kênh dẫn và phiến Si ban đầu. Do  $V_{DS}$  gây ra phân bố điện thế dọc chiều dài kênh dẫn, tình trạng phân cực nghịch của chuyển tiếp P-N không đồng đều, dẫn tới hậu quả tiết diện kênh dẫn giảm dần về phía cực máng. Điểm uốn A trên đặc tuyến ra tương ứng với trạng thái bắt đầu thắt kênh. Phạm vi AB (vùng thắt kênh) là miền làm việc chủ yếu của MOSFET khi khuếch đại tín hiệu.

Mạch hoạt động và đặc tuyến của MOSFET kênh có sẵn loại P giới thiệu trên H.2-6-11.

### 2. Cấu tạo và hoạt động của MOSFET kênh cảm ứng

Cấu tạo của MOSFET kênh cảm ứng loại N cũng tương tự như h. 2-6-8a, nhưng chưa có kênh dẫn ban đầu (xem h. 2-6-12a). Giữa miền máng (loại  $N^+$ ) và phiến Si loại P hình thành chuyển tiếp P-N (cực đế thường nối với cực nguồn nên chuyển tiếp giữa nguồn và đế bị nối tắt). Vì vậy

khi có điện áp  $V_{DS}$  đặt vào, trong mạch máng chỉ có một dòng điện rất nhỏ chạy qua chuyển tiếp P-N phân cực ngược. Điện trở tương đương giữa S và D coi như vô cùng lớn.

Khi có thêm điện áp dương  $V_{GS}$  (h. 2-6-12b), điện tích dương sẽ tích tụ trên cực G, còn điện tích âm tích tụ ở vùng đối diện, phía bên kia của màng  $SiO_2$  (vùng nằm giữa hai miền  $N^+$ ). Tuy vậy, khi  $V_{GS}$  còn nhỏ, lượng điện tích cảm ứng này không lớn, chúng bị lỗ trống của phiến loại P tái hợp mất. Chỉ khi  $V_{GS}$  vượt quá một điểm áp ngưỡng  $V_T$  nào đó, lượng điện tích âm cảm ứng nói trên mới trở nên đáng kể. Chúng tạo thành một lớp bán dẫn N ở trên bề mặt biến Si loại P (do đó có tên là lớp đảo), đóng vai trò như một kênh dẫn nối liền hai miền  $N^+$  của cực nguồn và cực máng. Do xuất hiện kênh dẫn, điện trở tương đương giữa S và D giảm xuống và do đó dòng máng  $I_D$  tăng lên. Trị số  $V_{GS}$  càng tăng, nồng độ điện tích âm cảm ứng trong kênh dẫn càng nhiều, dòng  $I_D$  sẽ càng lớn. Chế độ làm việc khi  $V_{GS} > V_T$  như vậy gọi là chế độ làm giàu điện tích (gọi tắt: chế độ giàu). Ký hiệu quy ước cùng với sơ đồ khuếch đại của MOSFET kênh cảm ứng loại N giới thiệu trên h.2-6-13. Ta thấy rõ: điện áp tín hiệu xoay chiều  $e_s$  (xếp chồng lên điện áp một chiều  $V_{GS}$  do nguồn  $E_G$  tạo ra) điều khiển nồng độ điện tích âm cảm ứng trong kênh dẫn và do đó điều khiển dòng  $I_D$  tăng giảm. Trên điện trở  $R_D$  và trên tải  $R_L$  sẽ có điện áp đã khuếch đại của  $e_s$ . Đặc tuyến truyền đạt và đặc tuyến ra của MOSFET kênh cảm ứng loại N giới thiệu trên hình 2-6-14. Ta thấy rõ chỉ khi  $V_{GS} > V_T$  mới có dòng máng  $I_D$ . MOSFET kênh cảm ứng chỉ làm việc ở chế độ giàu.

Nếu phiến Si ban đầu thuộc loại N, các miền nguồn và máng thuộc loại  $P^+$  thì sẽ có MOSFET kênh cảm ứng loại P. Ký hiệu như h. 2-6-15. Nguyên lý làm việc tương tự, ở đây điện áp  $V_{GS}$  và  $V_{DS}$  có cực tính ngược lại.

Tham số đặc trưng cho MOSFET cũng gần giống như của JFET: điện trở vi phân ngõ ra  $r_D$ , điện trở vi phân ngõ vào  $r_i$ , hệ dẫn  $g_m$ , các điện dung liên cực, các tham số giới hạn v.v... đáng chú ý là do có lớp cách điện  $SiO_2$ , điện trở ngõ vào của MOSFET vô cùng lớn. Lớp  $SiO_2$  rất mỏng nên  $g_m$  rất lớn, nhưng điện áp đánh thủng giữa G-S hoặc giữa G-D thường tương đối thấp.

### 2-6-3 Nhận xét chung về JFET và MOSFET

- 1) JFET và MOSFET hoạt động dựa trên sự điều khiển điện trở kênh dẫn bởi điện trường (điện trường này do điện áp trên hai ngõ vào sinh ra, còn dòng điện vào luôn luôn xấp xỉ bằng không). Từ đó khống chế dòng điện ra. Do đặc điểm này, người ta xếp transistor trường vào loại linh kiện điều khiển bằng điện áp (tương tự như đèn điện tử), trong khi BJT thuộc loại điều khiển bằng dòng điện (BJT có ngõ vào là chuyển tiếp P-N phân cực thuận, dòng điện vào biến đổi nhiều theo tín hiệu, còn điện áp vào thay đổi rất ít).
- 2) Dòng điện máng  $I_D$  tạo nên bởi một loại hạt dẫn (hạt đa số của kênh), do đó transistor trường thuộc loại đơn cực tính. Do không có vai trò của hạt dẫn thiểu số, không có quá trình sản sinh và tái hợp của hai loại hạt dẫn cho nên tham số của FET ít chịu ảnh hưởng của nhiệt độ. Tụ âm nội bộ cũng bé hơn ở BJT.
- 3) Ngõ vào của FET có điện trở rất lớn, dòng điện vào gần như bằng không nên mạch vào hầu như không tiêu thụ năng lượng. Điều này đặc biệt thích hợp cho việc khuếch đại các nguồn tín hiệu yếu, hoặc nguồn có nội trở lớn.
- 4) Vai trò cực nguồn và cực máng có thể đổi lẫn cho nhau và tham số của FET không thay đổi đáng kể.
- 5) Kích thước các điện cực S, G, D có thể giảm xuống rất bé (dựa trên công nghệ MOS), thu nhỏ thể tích của transistor một cách đáng kể và nhờ đó transistor trường rất thông dụng trong các vi mạch có mật độ thích hợp cao.



- 6) Cuối cùng, cũng như BJT, FET. Có thể mắc theo ba sơ đồ cơ bản: mạch nguồn chung (viết tắt: S.C), máng chung (D.C) và cửa chung (G.C). Các mạch giới thiệu trên đây thuộc loại S.C. Mạch máng chung (có sơ đồ và đặc điểm tương tự như mạch collector chung của BJT: điện trở vào rất lớn, điện trở ra rất nhỏ, điện áp ra đồng pha và xấp xỉ trị số với điện áp vào). Còn mạch cửa chung trên thực tế ít dùng.