

CHƯƠNG I. LINH KIỆN THỤ ĐỘNG

Trạng thái điện của mỗi linh kiện điện tử được đặc trưng bởi 2 thông số: **điện áp u và cường độ dòng điện i** . Mỗi quan hệ tương hỗ $i=f(u)$ được biểu diễn bởi **đặc tuyến Volt-Ampere**.

Người ta có thể phân chia các linh kiện điện tử theo hàm quan hệ trên là tuyến tính hay phi tuyến. *Nếu hàm $i=f(u)$ là tuyến tính* (hàm đại số bậc nhất hay phương trình vi phân, tích phân tuyến tính), phần tử đó được gọi là phần tử tuyến tính (R, L, C) và có thể áp dụng được nguyên lý xếp chồng.

$$\text{Điện trở: } i = \frac{1}{R} \cdot u$$

$$\text{Tụ điện: } i = C \cdot \frac{du}{dt}$$

$$\text{Cuộn dây: } i = \frac{1}{L} \int u \cdot dt$$

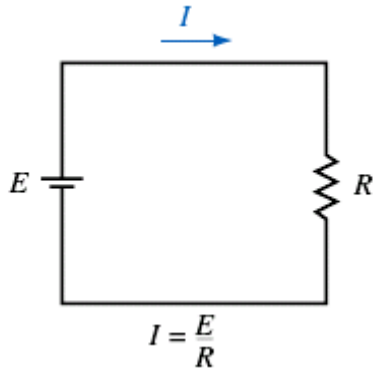
Nếu hàm $i=f(u)$ là quan hệ phi tuyến (phương trình đại số bậc cao, phương trình vi phân hay tích phân phi tuyến), phần tử đó được gọi là phần tử phi tuyến (diode, Transistor).

2.1. Điện trở (Resistor)

Như đã đề cập trong chương trước, dòng điện là dòng chuyển dời có hướng của các hạt mang điện và trong vật dẫn các hạt mang điện đó là các electron tự do. Các electron tự do có khả năng dịch chuyển được do tác động của điện áp nguồn và trong quá trình dịch chuyển các electron tự do va chạm với các nguyên tử nút mạng và các electron khác nên bị mất một phần năng lượng dưới dạng nhiệt. Sự va chạm này cản trở sự chuyển động của các electron tự do và được đặc trưng bởi giá trị điện trở.

2.1.1. Định nghĩa: Điện trở là linh kiện cản trở dòng điện, giá trị điện trở càng lớn dòng điện trong mạch càng nhỏ.

Định luật Ohm: Cường độ dòng điện trong mạch thuần trở tỷ lệ thuận với điện áp cấp và tỷ lệ nghịch với điện trở của mạch.



$$I = \frac{E}{R}$$

[E]: Volt (V)

[I]: Ampere (A)

[R]: Ohm (Ω)

2.1.2. Các thông số của điện trở

a. Giá trị điện trở

Giá trị điện trở đặc trưng cho **khả năng cản trở dòng điện** của điện trở. Yêu cầu cơ bản đối với giá trị điện trở đó là ít thay đổi theo nhiệt độ, độ ẩm và thời gian,... Điện trở dẫn điện càng tốt thì giá trị của nó càng nhỏ và ngược lại. Giá trị điện trở được tính theo đơn vị Ohm (Ω), k Ω , M Ω , hoặc G Ω .

Giá trị điện trở phụ thuộc vào vật liệu cản điện, kích thước của điện trở và nhiệt độ của môi trường.

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

Trong đó: ρ : điện trở suất [Ωm]

l : chiều dài dây dẫn [m]

S : tiết diện dây dẫn [m^2]

Trong thực tế điện trở được sản xuất với một số thang giá trị xác định. Khi tính toán lý thuyết thiết kế mạch, cần chọn thang điện trở gần nhất với giá trị được tính.

b. Sai số

Sai số là độ chênh lệch tương đối giữa giá trị thực tế của điện trở và giá trị danh định, được tính theo %

$$\delta = \frac{R_{tt} - R_{dd}}{R_{dd}} \cdot 100\%$$

Trong đó: R_{tt} : Giá trị thực tế của điện trở

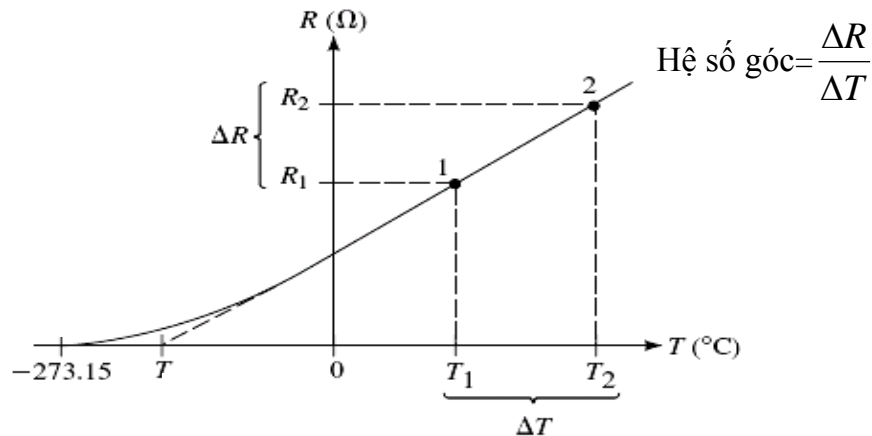
R_{dd} : Giá trị danh định của điện trở

c. Hệ số nhiệt điện trở (TCR-Temperature Co-efficient of Resistor):

TCR là sự thay đổi tương đối của giá trị điện trở khi nhiệt độ thay đổi 1°C , được tính theo *phân triểu*

$$\alpha = \frac{\Delta R / \Delta T}{R} \cdot 10^6 \text{ (ppm/}^{\circ}\text{C) (parts per million)}$$

Khi nhiệt độ tăng, số lượng các electron bứt ra khỏi quỹ đạo chuyển động tăng và va chạm với các electron tự do làm tăng khả năng cản trở dòng điện của vật dẫn. Trong hầu hết các chất dẫn điện khi nhiệt độ tăng thì giá trị điện trở tăng, hệ số $\alpha > 0$ (**PTC: Positive Temperature Co-efficient**). Đối với các chất bán dẫn, khi nhiệt độ tăng số lượng electron bứt ra khỏi nguyên tử để trở thành electron tự do được gia tăng đột ngột, tuy sự va chạm trong mạng tinh thể cũng tăng nhưng không đáng kể so với sự gia tăng số lượng hạt dẫn, làm cho khả năng dẫn điện của vật liệu tăng, hay giá trị điện trở giảm, do đó có hệ số $\alpha < 0$ (**NTC: Negative Temperature Coefficient**). Hệ số nhiệt $\alpha < 0$ càng nhỏ, độ ổn định của giá trị điện trở càng cao.



Hình 2.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ tới giá trị điện trở của vật dẫn
 Tại một nhiệt độ xác định có hệ số nhiệt α xác định, giả sử tại nhiệt độ T_1 điện trở có giá trị là R_1 và hệ số nhiệt là α_1 , giá trị điện trở tại nhiệt độ T_2 :

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 \cdot (T_2 - T_1)]$$

d. Công suất tối đa cho phép

Khi có dòng điện cường độ I chạy qua điện trở R , năng lượng nhiệt tỏa ra trên R với công suất:

$$P = U.I = I^2.R$$

Nếu dòng điện có cường độ càng lớn thì nhiệt lượng tiêu thụ trên R càng lớn làm cho điện trở càng nóng, do đó cần thiết kế điện trở có kích thước lớn để có thể tản nhiệt tốt.

Công suất tối đa cho phép là công suất nhiệt lớn nhất mà điện trở có thể chịu được nếu quá ngưỡng đó điện trở bị nóng lên và có thể bị cháy. Công suất tối đa cho phép đặc trưng cho khả năng chịu nhiệt.

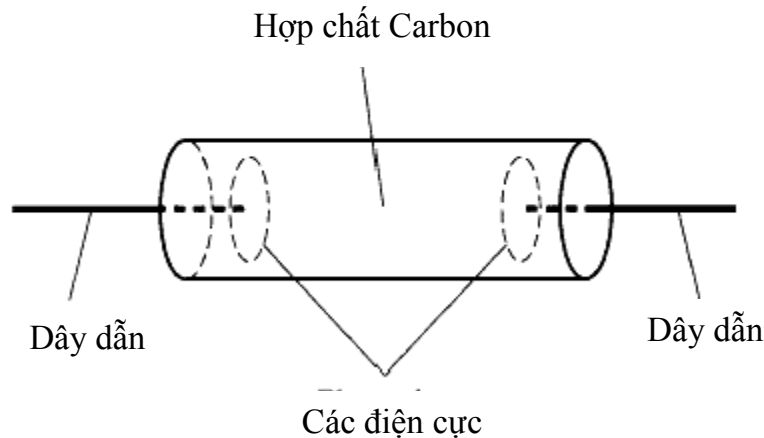
$$P_{\max} = \frac{U_{\max}^2}{R} = I_{\max}^2 .R$$

Trong các mạch thực tế, tại khối nguồn cấp, cường độ dòng điện mạnh nên các điện trở có kích thước lớn. Tại khối xử lý tín hiệu, cường độ dòng điện yếu nên các điện trở có kích thước nhỏ do chỉ phải chịu công suất nhiệt thấp.

2.1.3. Phân loại và ký hiệu điện trở

a. Điện trở có giá trị xác định

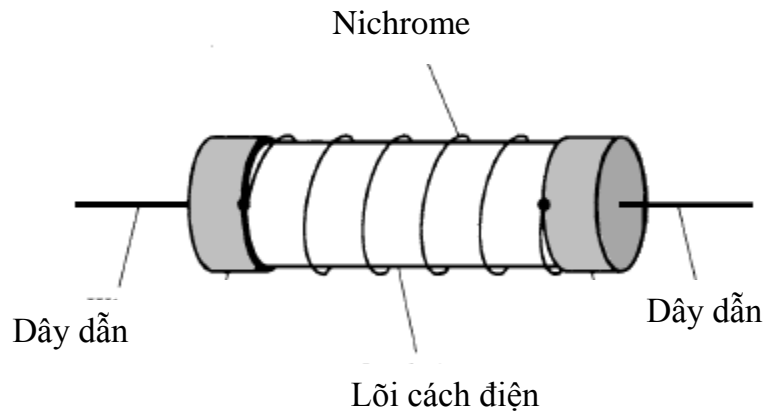
✓ **Điện trở than ép** (Điện trở hợp chất Cacbon): Được chế tạo bằng cách trộn bột than với vật liệu cản điện, sau đó được nung nóng hóa thể rắn, nén thành dạng h



Hình 2.2. Điện trở than ép

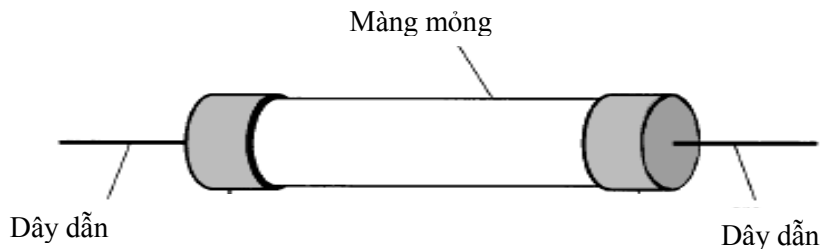
Điện trở than ép có dải giá trị tương đối rộng (từ 1Ω đến $100M\Omega$), công suất danh định ($1/8W-2W$), nhưng phần lớn có công suất là $1/4W$ hoặc $1/2W$. Một ưu điểm nổi bật của điện trở than ép đó chính là có tính thuần trở nên được sử dụng nhiều trong phạm vi tần số thấp (trong các bộ xử lý tín hiệu âm tần).

✓ **Điện trở dây quấn** được chế tạo bằng cách quấn một đoạn dây không phải là chất dẫn điện tốt (Nichrome) quanh một lõi hình trụ. Trở kháng phụ thuộc vào vật liệu dây dẫn, đường kính và độ dài của dây dẫn. Điện trở dây quấn có giá trị nhỏ, độ chính xác cao và có công suất nhiệt lớn. Tuy nhiên nhược điểm của điện trở dây quấn là nó có tính chất điện cảm nên không được sử dụng trong các mạch cao tần mà được ứng dụng nhiều trong các mạch âm tần.



Hình 2.3. Điện trở dây quấn

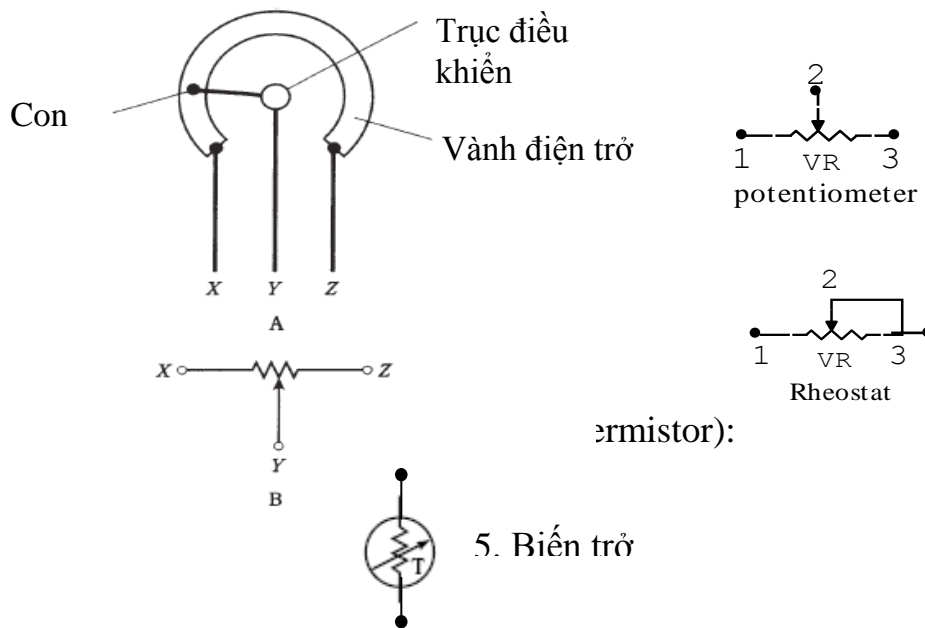
✓ **Điện trở màng mỏng**: Được sản xuất bằng cách lắng đọng Cacbon, kim loại hoặc oxide kim loại dưới dạng màng mỏng trên lõi hình trụ. Điện trở màng mỏng có giá trị từ thấp đến trung bình, và có thể thấy rõ một ưu điểm nổi bật của điện trở màng mỏng đó là tính chất thuần trở nên được sử dụng trong phạm vi tần số cao, tuy nhiên có công suất nhiệt thấp và giá thành cao.



Hình 2.4. Điện trở màng mỏng

b. Điện trở có giá trị thay đổi

✓ **Biến trở** (Variable Resistor) có cấu tạo gồm một điện trở màng than hoặc dây quấn có dạng hình cung, có trục xoay ở giữa nối với con trượt. Con trượt tiếp xúc động với vành điện trở tạo nên cực thứ 3, nên khi con trượt dịch chuyển điện trở giữa cực thứ 3 và 1 trong 2 cực còn lại có thể thay đổi. Có thể có loại biến trở tuyến tính (giá trị điện trở thay đổi tuyến tính theo góc xoay) hoặc biến trở phi tuyến (giá trị điện trở thay đổi theo hàm logarit theo góc xoay). Biến trở được sử dụng điều khiển điện áp (*potentiometer*: chiết áp) hoặc điều khiển cường độ dòng điện (*Rheostat*)



5. Biến trở

Là linh kiện có giá trị điện trở thay đổi theo nhiệt độ. Có 2 loại nhiệt trở:

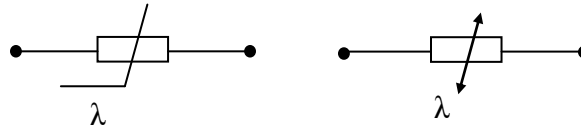
Nhiệt trở có hệ số nhiệt âm: Giá trị điện trở giảm khi nhiệt độ tăng (NTC), thông thường các chất bán dẫn có hệ số nhiệt âm do khi nhiệt độ tăng cung cấp đủ năng lượng cho các electron nhảy từ vùng hóa trị lên vùng dẫn nên số lượng hạt dẫn tăng đáng kể, ngoài ra tốc độ dịch chuyển của hạt dẫn cũng tăng nên giá trị điện trở giảm

Nhiệt trở có hệ số nhiệt dương: Giá trị điện trở tăng khi nhiệt độ tăng, các nhiệt trở được làm bằng kim loại có hệ số nhiệt dương (PTC) do khi nhiệt độ

tăng, các nguyên tử nút mạng dao động mạnh làm cản trở quá trình di chuyển của electron nên giá trị điện trở tăng.

Nhiệt trở được sử dụng để điều khiển cường độ dòng điện, đo hoặc điều khiển nhiệt độ: ổn định nhiệt cho các tầng khuếch đại, đặc biệt là tầng khuếch đại công suất hoặc là linh kiện cảm biến trong các hệ thống tự động điều khiển theo nhiệt độ.

✓ **Điện trở quang** (Photo Resistor)



Quang trở là linh kiện nhạy cảm với bức xạ điện từ quanh phổ ánh sáng nhìn thấy. Quang trở có giá trị điện trở thay đổi phụ thuộc vào cường độ ánh sáng chiếu vào nó. Cường độ ánh sáng càng mạnh thì giá trị điện trở càng giảm và ngược lại.

Khi bị che tối: $R = n.100k\Omega \div n.M\Omega$

Khi được chiếu sáng: $R = n.100\Omega \div n.k\Omega$

Quang trở thường được sử dụng trong các mạch tự động điều khiển bằng ánh sáng: (Phát hiện người vào cửa tự động; Điều chỉnh độ sáng, độ nét ở Camera; Tự động bật đèn khi trời tối; Điều chỉnh độ nét của LCD;...)

2.1.4. Cách ghi và đọc các tham số điện trở

a. Biểu diễn trực tiếp

✓ Chữ cái đầu tiên và các chữ số biểu diễn giá trị của điện trở: R(E) – Ω; K - K Ω; M - M Ω;...

✓ Chữ cái thứ hai biểu diễn dung sai:

| | |
|--------|-------|
| F=1% | J=5% |
| G=2% | K=10% |
| H=2,5% | M=20% |

Ví dụ: 8K2J: R=8,2KΩ; δ=5%

$$R=8,2K\Omega \pm 0,41 K\Omega = 7,79K\Omega \div 8,61K\Omega$$

Hoặc có thể các chữ số để biểu diễn giá trị của điện trở và chữ cái để biểu diễn dung sai. Khi đó chữ số cuối cùng biểu diễn số chữ số 0 (bậc của lũy thừa 10).

Ví dụ: 4703G: $R=470K \Omega$; $\delta=2\%$

b. Biểu diễn bằng các vạch màu

Đối với các điện trở có kích thước nhỏ không thể ghi trực tiếp các thông số khi đó người ta thường vẽ các vòng màu lên thân điện trở.

✓ 3 vòng màu:

- 2 vòng đầu biểu diễn 2 chữ số có nghĩa thực
- Vòng thứ 3 biểu diễn số chữ số 0 (bậc của lũy thừa 10)
- Sai số $\delta=20\%$

✓ 4 vòng màu

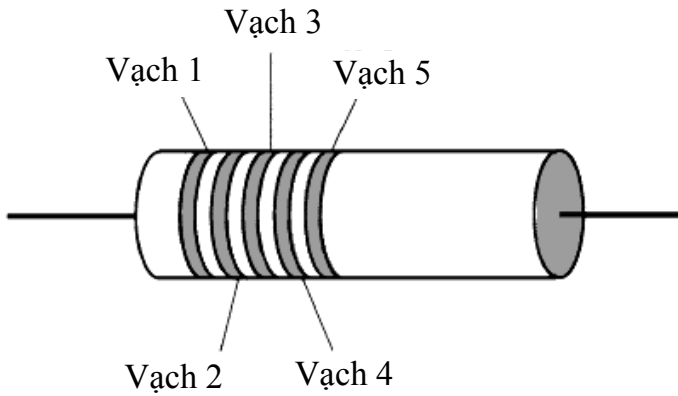
- 2 vòng đầu biểu diễn 2 chữ số có nghĩa thực
- Vòng thứ 3 biểu diễn số chữ số 0 (bậc của lũy thừa 10)
- Vòng thứ 4 biểu diễn dung sai (tráng nhũ)

✓ 5 vòng màu:

- 3 vòng đầu biểu diễn 3 chữ số có nghĩa thực
- Vòng thứ 4 biểu diễn số chữ số 0 (bậc của lũy thừa 10)
- Vòng thứ 5 biểu diễn dung sai (tráng nhũ)

Bảng quy ước mã vạch màu

| Màu | Trị số | Sai số |
|------|--------|--------|
| Đen | 0 | |
| Nâu | 1 | 1% |
| Đỏ | 2 | 2% |
| Cam | 3 | |
| Vàng | 4 | |
| Lục | 5 | |
| Lam | 6 | |



| | | |
|----------|----|-----|
| Tím | 7 | |
| Xám | 8 | |
| Trắng | 9 | |
| Vàng kim | -1 | 5% |
| Bạc kim | -2 | 10% |

2.1.5. Ứng dụng

✓ Điện trở được sử dụng trong các mạch phân áp để phân cực cho Transistor đảm bảo cho mạch khuếch đại hoặc dao động hoạt động với hiệu suất cao nhất.

✓ Điện trở đóng vai trò là phần tử hạn dòng tránh cho các linh kiện bị phá hỏng do cường độ dòng quá lớn. Một ví dụ điển hình là trong mạch khuếch đại, nếu không có điện trở thì Transistor chịu dòng một chiều có cường độ tương đối lớn.

✓ Được sử dụng để chế tạo các dụng cụ sinh hoạt (bàn là, bếp điện hay bóng đèn,...) hoặc các thiết bị trong công nghiệp (thiết bị sấy, sưởi,...) do điện trở có đặc điểm tiêu hao năng lượng dưới dạng nhiệt.

✓ Xác định hằng số thời gian: Trong một số mạch tạo xung, điện trở được sử dụng để xác định hằng số thời gian.

✓ Phối hợp trở kháng: Để tổn hao trên đường truyền là nhỏ nhất cần thực hiện phối hợp trở kháng giữa nguồn tín hiệu và đầu vào của bộ khuếch đại, giữa đầu ra của bộ khuếch đại và tải, hay giữa đầu ra của tầng khuếch đại trước và đầu vào của tầng khuếch đại sau.

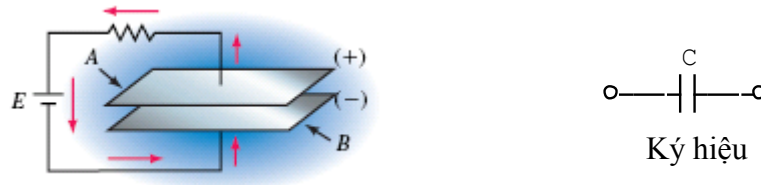
2.2. Tụ điện

2.2.1. Định nghĩa

Tụ điện gồm 2 bản cực làm bằng chất dẫn điện được đặt song song với nhau, ở giữa là lớp cách điện gọi là chất điện môi (giấy tẩm dầu, mica, hay gốm,



không khí). Chất cách điện được lấy làm tên gọi cho tụ điện (tụ giấy, tụ dầu, tụ gốm hay tụ không khí).



Nếu điện trở tiêu thụ điện năng và chuyển thành nhiệt năng thì tụ điện tích năng lượng dưới dạng năng lượng điện trường, sau đó năng lượng được giải phóng. Điều này được thể hiện ở đặc tính tích và phóng điện của tụ điện.

2.2.2. Các tham số của tụ điện

a. Điện dung của tụ điện

Giá trị điện dung đặc trưng cho khả năng tích lũy năng lượng của tụ điện.

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

Trong đó: ϵ : Hệ số điện môi của chất cách điện

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} (F/m)$: Hằng số điện môi của chân không

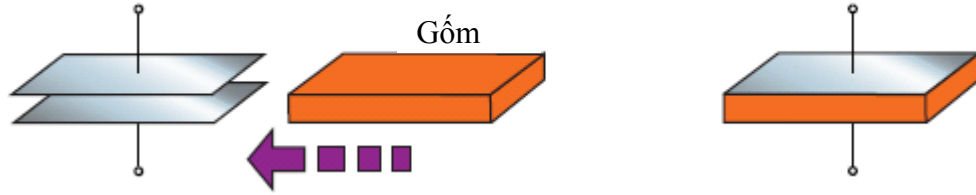
S : Diện tích hiệu dụng của 2 bản cực

d : Khoảng cách giữa 2 bản cực

Điện dung có đơn vị là F, tuy nhiên trong thực tế 1F là giá trị rất lớn nên thường sử dụng các đơn vị khác: $1\mu F = 10^{-6} F$; $1nF = 10^{-9} F$; $1pF = 10^{-12} F$

Một số hệ số điện môi thông dụng:

| | |
|-------------|----------------------|
| Chân không | $\epsilon = 1$ |
| Không khí | $\epsilon = 1,0006$ |
| Gốm | $\epsilon = 30-7500$ |
| Mica | $\epsilon = 5,5$ |
| Dầu | $\epsilon = 4$ |
| Giấy khô | $\epsilon = 2,2$ |
| Polystyrene | $\epsilon = 2,6$ |



(a) $C=200\text{pF}$ với chất điện môi là không khí

(b) $C=1,5\mu\text{F}$ với chất điện môi là gốm

b. Sai số: Là độ chênh lệch tương đối giữa giá trị điện dung thực tế và giá trị danh định của tụ điện, được tính theo %

$$\delta = \frac{C_{tt} - C_{dd}}{C_{dd}}$$

C_{tt} : Điện dung thực tế

C_{dd} : Điện dung danh định

Tùy theo yêu cầu của mạch mà dung sai của tụ điện có giá trị lớn hay nhỏ.

c. Trở kháng của tụ điện

Trở kháng của tụ điện đặc trưng cho khả năng cản trở dòng điện xoay chiều của tụ điện

$$Z_c = \frac{1}{j2\pi f C} = -j.X_c$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} : \text{dung kháng của tụ}$$

$f = 0 : Z_c = \infty$: hở mạch đối với thành phần một chiều

$f \rightarrow \infty : Z_c \rightarrow 0$: ngắn mạch đối với thành phần xoay chiều

d. Hệ số nhiệt của tụ điện (TCC – Temperature Co-efficient of Capacitor)

Là độ thay đổi tương đối của giá trị điện dung khi nhiệt độ thay đổi 1°C , được tính theo ‰:

$$TCC = \frac{\Delta C / \Delta T}{C} \cdot 10^6 (\text{ppm}/^\circ\text{C})$$

TCC càng nhỏ thì giá trị điện dung càng ổn định, do đó mỗi loại tụ chỉ hoạt động trong một dải nhiệt độ nhất định.

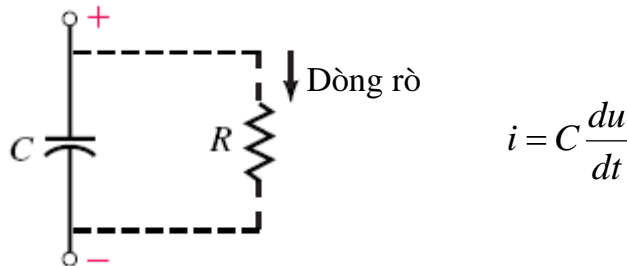
e. Điện áp đánh thủng

Khi đặt vào 2 bản cực của tụ điện áp một chiều, sinh ra một điện trường giữa 2 bản cực. Điện áp càng lớn thì cường độ điện trường càng lớn, do đó các electron có khả năng bứt ra khỏi nguyên tử trở thành các electron tự do, gây nên dòng rò. Nếu điện áp quá lớn, cường độ dòng rò tăng, làm mất tính chất cách điện của chất điện môi, người ta gọi đó là hiện tượng tụ bị đánh thủng. Điện áp một chiều đặt vào tụ khi đó gọi là điện áp đánh thủng.

Khi sử dụng tụ cần chọn tụ có điện áp đánh thủng lớn hơn điện áp đặt vào tụ vài lần. Điện áp đánh thủng phụ thuộc vào tính chất và bề dày của lớp điện môi. Các tụ có điện áp đánh thủng lớn thường là các tụ có kích thước lớn và chất điện môi tốt (Mica hoặc Gốm).

f. Dòng điện rò

Thực tế trong chất điện môi vẫn tồn tại dòng điện có cường độ rất nhỏ, được gọi là dòng rò, khi đó có thể coi tụ điện tương đương với một điện trở có giá trị rất lớn, cỡ MΩ.



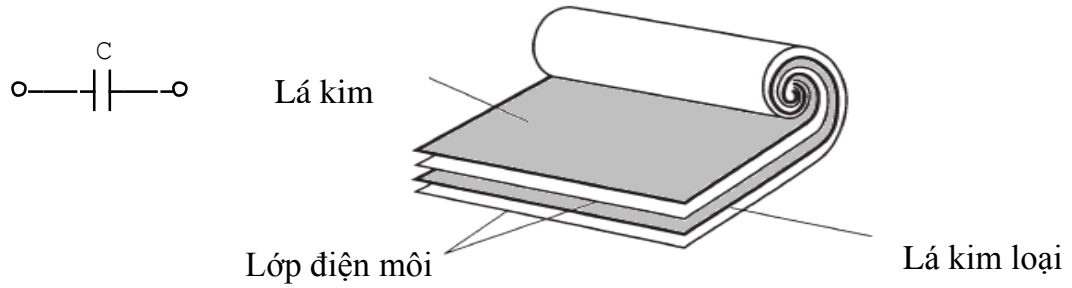
2.2.3. Phân loại và ký hiệu

a. Tụ có điện dung xác định

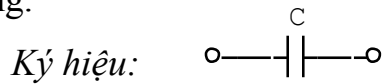
Tụ điện được phân chia thành 2 dạng chính: Tụ không phân cực (không có cực tính) và tụ phân cực hoặc cũng có thể phân loại theo chất điện môi.

✓ **Tụ giấy (Paper Capacitors):** Tụ giấy là tụ không phân cực gồm các lá kim loại xen kẽ với các lớp giấy tẩm dầu được cuộn lại theo dạng hình trụ. Điện dung $C=1nF \div 0,1\mu F$, điện áp đánh thủng của tụ giấy cỡ khoảng vài trăm Volt. Hoạt động trong dải trung tần.

Ký hiệu:

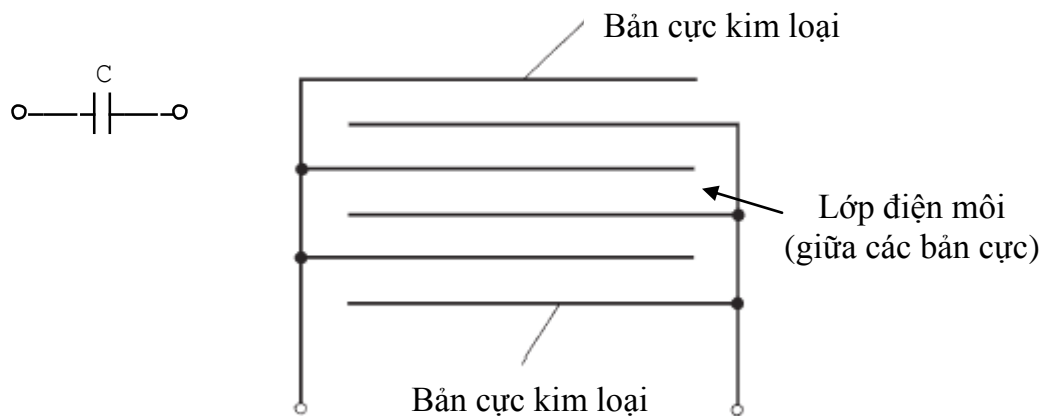


✓ **Tụ gốm (Ceramic Capacitors):** Tụ gốm là tụ không phân cực được sản xuất bằng cách lắng đọng màng kim loại mỏng trên 2 mặt của đĩa gốm hoặc cũng có thể ở mặt trong và mặt ngoài của ống hình trụ, hai điện cực được gắn với màng kim loại và được bọc trong vỏ chất dẻo. Điện dung thay đổi trong phạm vi rộng $C=n.pF \div 0,5\mu F$, điện áp đánh thủng cỡ khoảng vài trăm Volt. Hoạt động trong dải cao tần (dẫn tín hiệu cao tần xuống đất), có đặc điểm là tiêu thụ ít năng lượng.

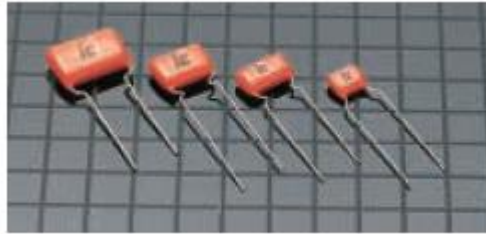


✓ **Tụ Mica (Mica Capacitors):** Tụ Mica là tụ không phân cực được chế tạo bằng cách đặt xen kẽ các lá kim loại với các lớp Mica (hoặc cũng có thể lắng đọng màng kim loại lên các lớp Mica để tăng hệ số phẩm chất). Điện dung $C=n.pF \div 0,1\mu F$, điện áp đánh thủng vài nghìn Volt. Độ ổn định cao, dòng rò thấp, sai số nhỏ, tiêu hao năng lượng không đáng kể, hoạt động trong dải cao tần (được sử dụng trong máy thu phát sóng Radio).

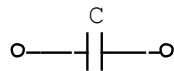
Ký hiệu:



✓ **Tụ màng mỏng (Plastic – film Capacitors):** Là tụ không phân cực, được chế tạo theo phương pháp giống tụ giấy, chất điện môi là Polyester, Polyethylene hoặc Polystyrene có tính mềm dẻo. Điện dung $C=50\text{pF}-n.10\mu\text{F}$ (thông thường: $1\text{nF}-10\mu\text{F}$), điện áp đánh thủng cỡ khoảng vài nghìn Volt, hoạt động trong các dải tần audio (âm tần) và radio (cao tần).

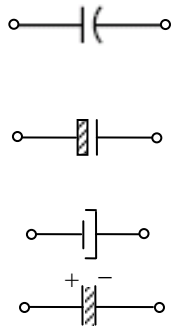


Ký hiệu:



✓ **Tụ điện phân (Electrolytic Capacitors):** Tụ điện phân còn được gọi là tụ oxi hóa (hay tụ hóa), đây là loại tụ phân cực, gồm các lá nhôm được cách ly bởi dung dịch điện phân và được cuộn lại thành dạng hình trụ. Khi đặt điện áp một chiều lên hai bản cực của tụ điện, xuất hiện màng oxide kim loại cách điện đóng vai trò là lớp điện môi. Tụ điện phân có điện dung lớn, màng oxit kim loại càng mỏng thì giá trị điện dung càng lớn ($0,1\mu\text{F} - n.1000\mu\text{F}$), điện áp đánh thủng thấp (vài trăm Volt), hoạt động trong dải âm tần, dung sai lớn, kích thước tương lớn và giá thành thấp.

Ký hiệu:



✓ **Tụ Tantal:** Tụ Tantal cũng là tụ phân cực trong đó Tantal được sử dụng thay cho Nhôm. Tụ Tantal cũng có giá trị điện dung lớn ($0,1\mu\text{F}$ - $100\mu\text{F}$) nhưng kích thước nhỏ, dung sai nhỏ, độ tin cậy và hiệu suất cao, điện áp đánh thủng vài trăm Volt. Thường được sử dụng trong các mục đích quân sự, trong các mạch âm tần và trong các mạch số.

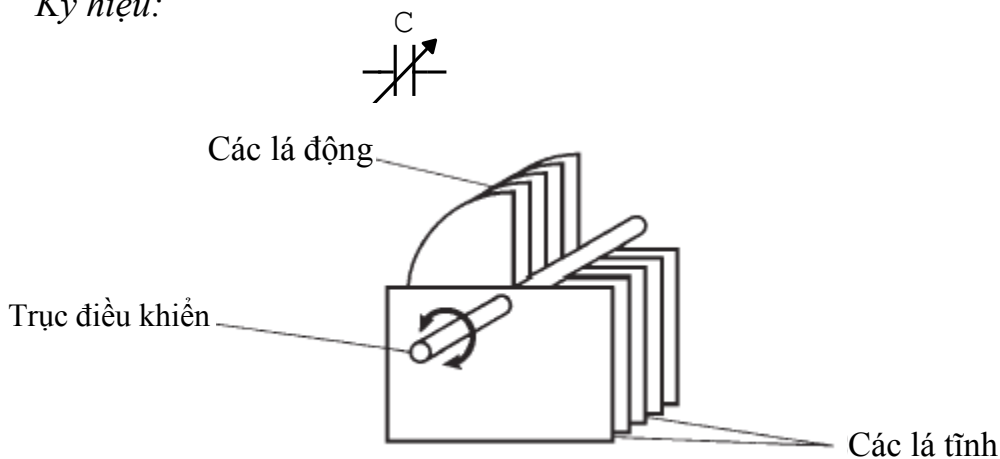
Ký hiệu: 

b. Tụ xoay (Air-Variable Capacitors)

Có thể thay đổi giá trị điện dung của tụ điện bằng cách thay đổi diện tích hiệu dụng giữa 2 bản cực hoặc thay đổi khoảng cách giữa 2 bản cực

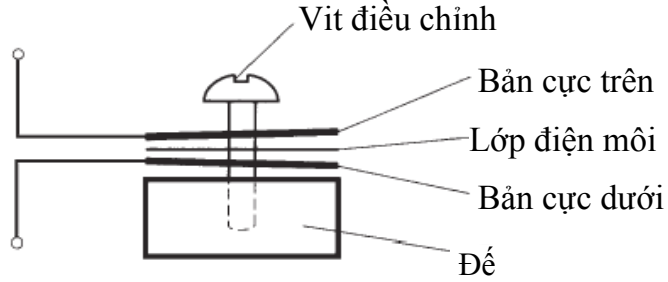
✓ **Tụ xoay:** gồm các lá động và lá tĩnh được đặt xen kẽ với nhau, hình thành nên bản cực động và bản cực tĩnh. Khi các lá động xoay làm thay đổi diện tích hiệu dụng giữa 2 bản cực do đó thay đổi giá trị điện dung của tụ. Giá trị điện dung của tụ xoay phụ thuộc vào số lượng các lá kim loại và khoảng không gian giữa các lá kim loại (Giá trị cực đại: $50\mu\text{F}$ - $1000\mu\text{F}$ và giá trị cực tiểu: n.pF). Điện áp đánh thủng cực đại cỡ vài kV. Tụ xoay là loại tụ không phân cực và thường được sử dụng trong máy thu Radio để chọn tần

Ký hiệu:



✓ **Tụ vi chỉnh (Trimmer):** Khác với tụ xoay là điều chỉnh diện tích hiệu dụng giữa các bản cực, tụ vi chỉnh có thể thay đổi giá trị bằng cách thay đổi khoảng cách giữa các bản cực. Tụ vi chỉnh gồm các lá kim loại được đặt xen kẽ

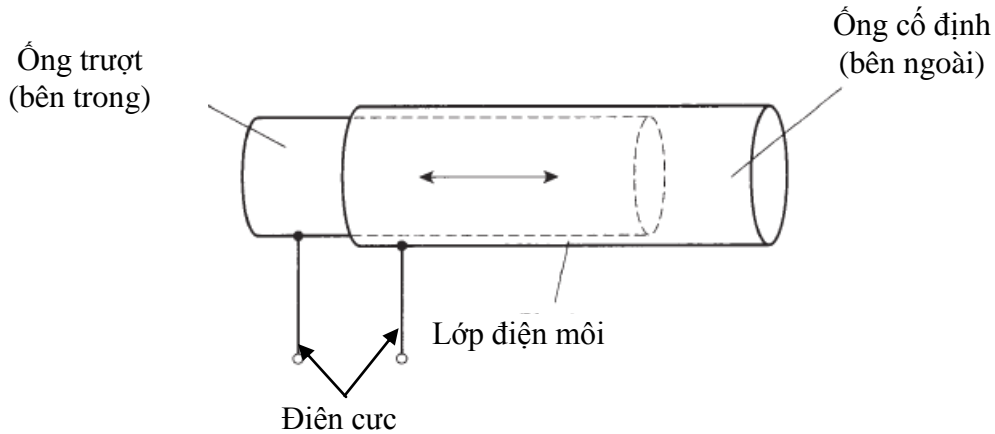
với nhau, ở giữa là lớp điện môi, khoảng cách giữa các bản cực được thay đổi nhờ ốc vít điều chỉnh.



Hình 2. Tụ vi chỉnh

Thông thường tụ vi chỉnh được nối song song với tụ xoay để tăng khả năng điều chỉnh. Giá trị điện dung C (n.pF-200pF), điện áp đánh thủng trung bình, hiệu suất cao (tổn hao năng lượng thấp). Tụ vi chỉnh cũng là tụ không phân cực.

✓ **Tụ đồng trục chỉnh:** Tụ đồng trục gồm 2 ống hình trụ kim loại được bọc lớp nhựa lồng vào nhau. Lớp nhựa đóng vai trò là lớp điện môi. Ống ngoài cố định đóng vai trò là bản cực tĩnh, ống bên trong có thể trượt đóng vai trò là bản cực động, do đó diện tích hiệu dụng giữa 2 bản cực có thể thay đổi làm thay đổi điện dung của tụ. Giá trị điện dung ($C=n.pF-100pF$), được ứng dụng trong dải cao tần.



2.2.4. Cách ghi và đọc th

a. Ghi trực tiếp: Đối với các tụ có kích thước lớn (tụ hóa, Tụ tantal) có thể ghi trực tiếp các thông số trên thân của tụ

- ✓ Giá trị điện dung
- ✓ Điện áp đánh thủng

b. Ghi theo quy ước

- ✓ 3 chữ số và 1 chữ cái:
- Đơn vị là pF
 - 2 chữ số đầu có nghĩa thực
 - Chữ số thứ 3 biểu diễn bậc của lũy thừa 10
 - Chữ cái biểu diễn sai số

Ví dụ:

0.047/200V: $C=0,047\mu\text{F}$; $U_{\text{BR}}=200\text{V}$

2.2/35: $C=2,2\mu\text{F}$; $U_{\text{BR}}=35\text{V}$

102J: $C=10 \cdot 10^2 \text{pF}=1\text{nF}$; $\delta=5\%$

.22K: $C=0,22\mu\text{F}$; $\delta=10\%$

Bảng ý nghĩa của chữ số thứ 3

| Chữ số | Hệ số nhân |
|--------|------------|
| 0 | 10^0 |
| 1 | 10^1 |
| 2 | 10^2 |
| 3 | 10^3 |
| 4 | 10^4 |
| 5 | 10^5 |
| 8 | 10^{-2} |
| 9 | 10^{-1} |

Sai số

| | |
|------------|---------|
| B=0,1% | H=3% |
| C=0,25% | J=5% |
| D (E)=0,5% | K=10% |
| F=1% | M=20% |
| G=2% | N=0,05% |

2.2.5. Ứng dụng

Dung kháng của tụ:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

Nhận xét: Dung kháng của tụ tỷ lệ nghịch với tần số f của dòng điện. Tần số càng cao thì dung kháng của tụ càng nhỏ và ngược lại. Vậy có thể nói, tụ có tác dụng chặn thành phần một chiều ($f = 0; X_c \rightarrow \infty$) và dẫn tín hiệu cao tần. Dựa vào tính chất đó mà tụ điện được ứng dụng trong các mạch:

- *Tụ ghép tầng*: Ngăn thành phần một chiều mà chỉ cho thành phần xoay chiều qua, cách ly các tầng về thành phần một chiều, đảm bảo điều kiện hoạt động độc lập của từng tầng trong chế độ một chiều. Đối với tín hiệu cao tần có thể sử dụng tụ phân cực hoặc tụ không phân cực, tuy nhiên đối với tín hiệu tần số thấp phải sử dụng tụ phân cực (Tụ hóa, tụ Tantal có điện dung lớn).

- *Tụ thoát*: Loại bỏ tín hiệu không hữu ích xuống đất (tạp âm)

- *Tụ lọc*: Được sử dụng trong các mạch lọc (thông cao, thông thấp, thông dải hoặc chặn dải) (Kết hợp với tụ điện hoặc cuộn dây để tạo ra mạch lọc thụ động).

- *Tụ cộng hưởng*: Dùng trong các mạch cộng hưởng LC để chọn tần

Ngoài ra tụ còn có tính chất *tích và phóng* điện nên được sử dụng trong các mạch chỉnh lưu để là phẳng điện áp một chiều.

2.3. Cuộn cảm

2.3.1. Định nghĩa và ký hiệu

Cuộn dây là một dây dẫn được bọc lớp sơn cách điện quấn nhiều vòng liên tiếp trên lõi sắt. Lõi của cuộn dây có thể là: Lõi không khí, lõi sắt lá hay lõi sắt lá



Lõi không khí



Lõi sắt lá

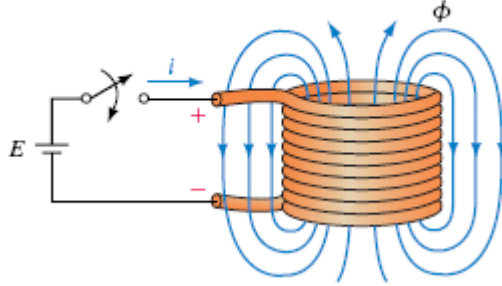


Lõi sắt bụi

2.3.2. Đặc tính của cuộn dây

a. Tạo từ trường bằng dòng điện

Khi cho dòng điện một chiều qua cuộn dây, dòng điện sẽ tạo nên từ trường đều trong lõi cuộn dây (được xác định theo quy tắc vụn nút chai).



Cường độ từ trường: $H = \frac{n}{l} I$ [A/m]

n : Số vòng dây

l : Chiều dài của lõi [m]

I : cường độ dòng điện [A]

Cường độ từ cảm: $B = \mu\mu_o H$ [T] (Tesla)

μ_o : Độ từ thẩm của chân không $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m)

μ : Độ từ thẩm tương đối của vật liệu từ so với chân

không

Nếu cường độ dòng điện I không đổi thì H và B là từ trường đều

Nếu cường độ dòng điện i thay đổi thì H và B là từ trường biến thiên

b. Tạo dòng điện bằng từ trường

☞ Hiện tượng cảm ứng điện từ

Định luật Faraday: Nếu từ thông qua một cuộn dây biến thiên sẽ sinh ra trong cuộn dây một sức điện động cảm ứng có độ lớn tỷ lệ với tốc độ biến thiên của từ thông.

Định luật Lenz: Sức điện động cảm ứng sinh ra dòng điện cảm ứng có chiều chống lại sự biến thiên của từ thông sinh ra nó.

$$\text{Sức điện động cảm ứng: } e_{cu} = -n \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

n : số vòng dây

$\Delta\phi$: lượng từ thông biến thiên qua cuộn dây

Δt : khoảng thời gian biến thiên

☞ Hiện tượng tự cảm:

Nếu dòng điện qua một cuộn dây biến thiên sẽ sinh ra một sức điện động tự cảm trong lòng cuộn dây chống lại sự biến thiên của dòng điện sinh ra nó và có độ lớn tỷ lệ với tốc độ biến thiên của dòng điện.

$$\text{Sức điện động tự cảm: } e_{tc} = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (L: \text{Hệ số tự cảm [H]})$$

☞ Hiện tượng hổ cảm:

Khi có hai cuộn dây được quấn chung trên một lõi hoặc được đặt gần nhau, khi đó dòng điện biến thiên ở cuộn này sinh điện áp hổ cảm ở cuộn kia.

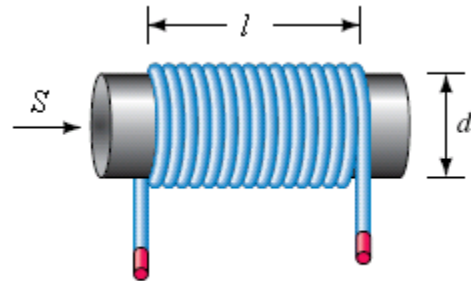
$$\text{Sức điện động hổ cảm: } e_{hc} = -M \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (M: \text{Hệ số hổ cảm})$$

2.3.3. Các tham số của cuộn cảm

a. Hệ số tự cảm L

Đặc trưng cho khả năng cảm ứng của cuộn dây

$$L = n \frac{\Delta\phi}{\Delta i} = \mu\mu_o \cdot \frac{n^2}{l} S$$



b. Trở kháng của cuộn dây

Trong thực tế luôn tồn tại điện trở thuần R bên trong cuộn dây

$$Z_L = R_L + j2\pi fL$$

Cảm kháng của cuộn dây:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$R_L \ll X_L \text{ nên } Z_L \approx X_L$$

$$f=0 \rightarrow Z_L \approx 0$$

$$f \rightarrow \infty \Rightarrow Z_L \rightarrow \infty$$

Cuộn dây cho tín hiệu một chiều qua và chặn thành phần xoay chiều (Cuộn chặn cao tần)

c. Hệ số phẩm chất của cuộn dây

Do có điện trở thuần bên trong cuộn dây nên có sự tổn hao năng lượng dưới dạng nhiệt

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi fL}{R}$$

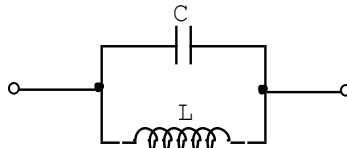
$Q \gg 1 \Rightarrow R \ll X_L$, tổn hao trên cuộn dây càng nhỏ, dây cuốn là kim loại dẫn điện tốt.

d. Tần số làm việc giới hạn của cuộn dây

Do các vòng dây được cách ly với nhau bởi lớp cách điện nên tồn tại tụ điện ký sinh trong cuộn dây, trong miền tần số thấp có thể bỏ qua ảnh hưởng của điện dung ký sinh nhưng trong miền tần số cao cuộn dây tương đương với một mạch cộng hưởng song song.

Tần số cộng hưởng:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Nếu $f > f_o$, cuộn dây mang tính dung nhiều hơn tính cảm, nên f_o được gọi là tần số làm việc giới hạn của cuộn dây.

2.3.4. Phân loại và ứng dụng

a. Theo lõi cuộn dây

✓ **Cuộn dây lõi không khí (air-core coils)**

Cuộn dây có lõi bằng nhựa, gỗ hay vật liệu không từ tính. Cuộn dây lõi không khí có hệ số tự cảm nhỏ (<1mH) và thường được ứng dụng trong miền tần số cao (trong máy thu phát sóng vô tuyến hay trong mạng anten). Do không

tiêu hao năng lượng điện dưới dạng nhiệt nên cuộn dây lõi không khí có hiệu suất cao.

✓ **Cuộn dây lõi sắt bụi**

Có lõi là bột sắt nguyên chất trộn với chất dính không từ tính. Cuộn dây lõi sắt bụi có hệ số tự cảm lớn hơn so với cuộn dây lõi không khí phụ thuộc vào tỷ lệ pha trộn. Thường được sử dụng ở khu vực tần số cao và trung tần

✓ **Cuộn dây lõi sắt lá**

Độ từ thẩm của lõi sắt từ lớn hơn rất nhiều so với độ từ thẩm của sắt bụi nên cuộn dây lõi sắt từ có hệ số tự cảm lớn, thường được ứng dụng trong miền tần số thấp (âm tần).

b.Theo ứng dụng: Cuộn lọc, cuộn cộng hưởng hay cuộn chặn.

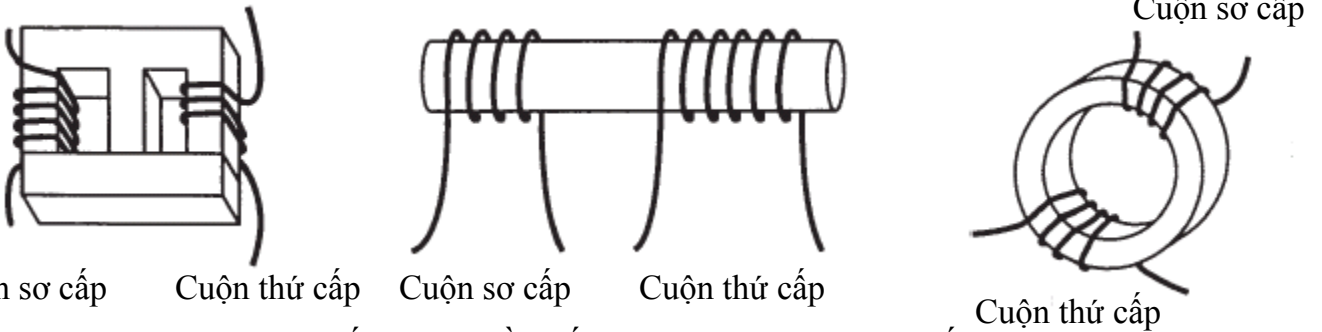
Ngoài ra trong thực tế cuộn dây còn được ứng dụng trong lĩnh vực truyền vô tuyến, Relay điện từ hoặc máy phát điện,...

2.4. Máy biến áp

2.4.1. Định nghĩa và ký hiệu

Máy biến áp được sử dụng để tăng hoặc giảm điện áp của nguồn xoay chiều mà vẫn giữ nguyên tần số.

Biến áp gồm hai hay nhiều cuộn dây tráng sơn cách điện được quấn chung trên một lõi. Lõi của máy biến áp có thể là sắt lá, sắt ferit hay lõi không khí.



Cuộn dây được nối với nguồn cấp được gọi là cuộn sơ cấp, cuộn dây được nối với tải được gọi là cuộn sơ cấp.

Ký hiệu:

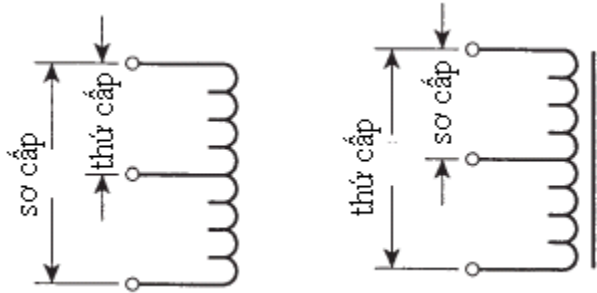


Lõi sắt lá

Lõi sắt bụi

Lõi không khí

Trong thực tế để tiết kiệm người ta có thể chỉ cần sử dụng một cuộn dây được gọi là biến áp tự ngẫu, tuy nhiên giữa cuộn sơ cấp và thứ cấp không được cách ly về điện.



Nguyên lý:

Khi cho nguồn điện xoay chiều qua cuộn sơ cấp, dòng điện biến thiên sinh ra từ trường biến đổi và được cảm ứng sang cuộn thứ cấp sinh ra sức điện động cảm ứng e_2 , mặt khác trên cuộn sơ cấp cũng xuất hiện sức điện động cảm ứng e_1

$$\text{Cuộn sơ cấp: } e_1 = -n_1 \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\text{Cuộn thứ cấp: } e_2 = -n_2 \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Trong đó: n_1, n_2 lần lượt là số vòng dây của cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp.

2.4.2. Các tỷ lệ của biến áp

$$\text{Tỷ lệ về điện áp: } \frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\text{Tỷ lệ về dòng điện: } \frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Tỷ lệ về công suất

Công suất tiêu thụ ở cuộn sơ cấp:

$$P_1 = u_1 \cdot i_1$$

Công suất tiêu thụ ở cuộn thứ cấp:

$$P_2 = u_2 \cdot i_2$$

Một biến áp lý tưởng coi như không có sự tiêu hao năng lượng trên hai cuộn dây sơ cấp, thứ cấp và mạch từ nên khi đó : $P_1=P_2$

Tuy nhiên một máy biến áp thực tế luôn có công ở cuộn thứ cấp nhỏ hơn công suất của cuộn sơ cấp do cuộn sơ cấp và thứ cấp có điện trở thuần tiêu hao năng lượng dưới dạng nhiệt ngoài ra dòng điện Foucault xuất hiện trong lõi từ cũng tiêu hao một phần năng lượng.

Hiệu suất của máy biến áp:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

$$\eta_{\max} \approx (80 \div 90)\%$$

Để tăng hiệu suất của máy biến áp cần phải giảm tổn hao bằng cách sử dụng các lá sắt mỏng tráng sơn cách điện, dây quấn có tiết diện lớn và ghép chặt.

$$\text{Tỷ lệ về tổng trở: } \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

2.4.3. Phân loại và ứng dụng của máy biến áp

Biến áp nguồn: Cấp điện áp xoay chiều cho các mạch điện và điện tử, có thể có kích thước từ nhỏ tới lớn, được sử dụng trong các trạm biến áp, đồng thời có tác dụng cách ly các linh kiện với nguồn cao áp.

Biến áp cao tần: Được sử dụng trong các bộ thu phát sóng Radio, lõi có thể là lõi sắt bụi hoặc lõi không khí, tuy nhiên nhược điểm của lõi không khí là phần lớn các đường cảm ứng từ đều đi ra ngoài, điều này ảnh hưởng đến đặc tính của máy biến áp.

Biến áp âm tần: Dải tần làm việc (20Hz-20kHz), thực hiện phối hợp trở kháng (tối thiểu hóa thành phần điện cảm trong mạch), tuy nhiên kích thước và trọng lượng lớn nên ngày càng ít được sử dụng.

CHƯƠNG II. CÁC LINH KIỆN TÍCH CỰC

I. Chất bán dẫn (Semiconductor)

1.1.1. Cấu trúc vùng năng lượng của chất rắn tinh thể

Trong mạng tinh thể của chất rắn, tùy theo các mức năng lượng mà các điện tử có thể chiếm chỗ hay không chiếm chỗ, người ta phân biệt ba vùng năng lượng khác nhau:

Vùng hóa trị (vùng đầy): Tất cả các mức năng lượng đều đã bị điện tử chiếm chỗ, không có mức năng lượng tự do.

Vùng dẫn (vùng trống): Các mức năng lượng đều còn trống hoặc có thể bị chiếm chỗ một phần.

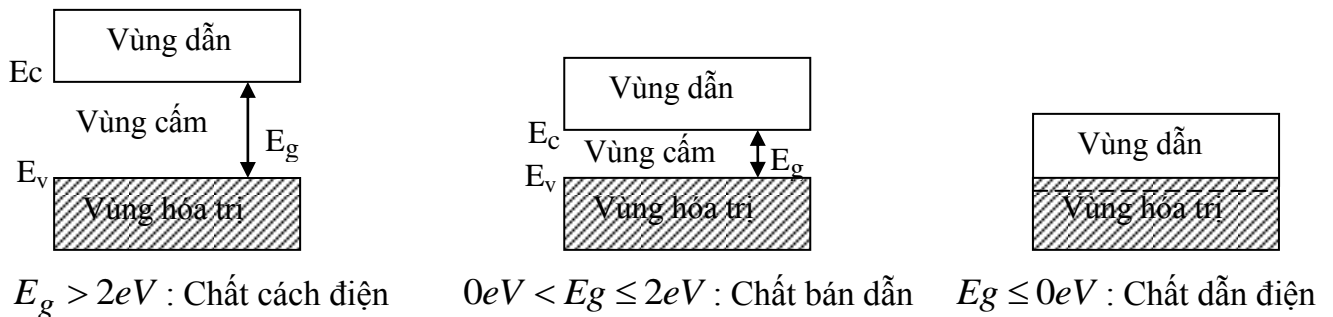
Vùng cấm: Trong đó không tồn tại mức năng lượng nào để điện tử có thể chiếm chỗ hay xác suất tìm hạt tại đây bằng 0.

Tùy theo vị trí tương đối giữa 3 vùng trên, các chất rắn được chia làm 3 loại (xét tại 0°K).

$$\text{Năng lượng vùng cấm: } E_g = E_c - E_v$$

Trong đó E_c : Năng lượng đáy vùng dẫn

E_v : Năng lượng đỉnh vùng hóa trị

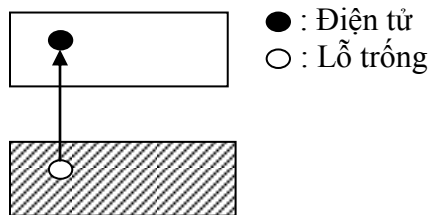


Hình 1. Phân loại chất rắn theo cấu trúc vùng năng lượng

Để tạo dòng điện trong chất rắn cần phải thực hiện 2 quá trình: quá trình *tạo hạt dẫn tự do* nhờ năng lượng kích thích và quá trình *chuyển động có hướng* của các hạt mang điện dưới tác dụng của điện trường.

1.1.2. Chất bán dẫn thuần (intrinsic)

Hai chất bán dẫn thuần điển hình là Ge và Si có năng lượng vùng cấm: $E_g(\text{Ge})=0,72\text{eV}$ và $E_g(\text{Si})=1,12\text{eV}$, thuộc nhóm IV trong hệ thống tuần hoàn. Trong mạng tinh thể, các nguyên tử Ge (Si) liên kết với nhau theo kiểu cộng hóa trị (các nguyên tử đưa ra các electron hóa trị liên kết với các nguyên tử xung quanh). Chất bán dẫn thuần thực chất không phải là một chất cách điện tốt và cũng không phải là một chất dẫn điện tốt. *Tại nhiệt độ phòng*, độ dẫn điện của Si bằng khoảng 10^{-10} độ dẫn điện của một vật dẫn kim loại và bằng khoảng 10^{14} lần so với một chất cách điện tốt. Tuy nhiên có thể tăng độ dẫn điện của chất bán dẫn thuần bằng cách đốt nóng hoặc chiếu sáng tinh thể bán dẫn để tăng số lượng hạt dẫn. Khi được một nguồn năng lượng bên ngoài kích thích, xảy ra hiện tượng ion hóa các nguyên tử nút mạng và sinh ra từng cặp hạt dẫn tự do: *điện tử và lỗ trống*. Điều này tương đương với sự dịch chuyển của một điện tử từ 1 mức năng lượng trong vùng hóa trị lên 1 mức năng lượng trong vùng dẫn và đồng thời để lại 1 mức năng lượng tự do trong vùng hóa trị được gọi là *lỗ trống*. Các hạt dẫn tự do này dưới tác dụng của điện trường ngoài hoặc do sự chênh lệch về nồng độ có khả năng dịch chuyển có hướng trong mạng tinh thể tạo nên dòng điện trong chất bán dẫn. Một đặc điểm quan trọng trong chất bán dẫn đó là điện tử không phải là hạt mang điện duy nhất mà lỗ trống cũng được coi là hạt mang điện nên dòng điện trong chất bán dẫn luôn gồm hai thành phần do sự chuyển dời có hướng của điện tử và lỗ trống.



Hình 2. Cơ chế phát sinh cặp hạt dẫn tự do trong chất bán dẫn thuần

Trong chất bán dẫn thuần, mật độ của điện tử và lỗ trống là bằng nhau:

$$n_i = p_i$$

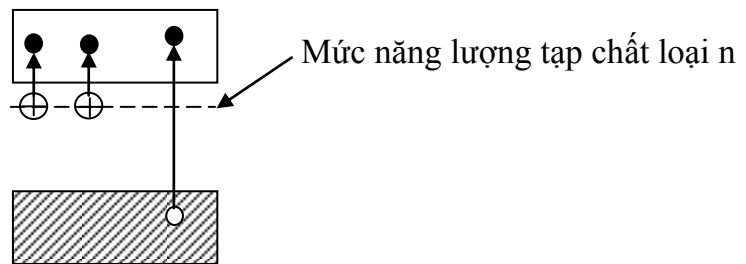
Một phương pháp hiệu quả và đơn giản hơn để tăng khả năng dẫn điện của chất bán dẫn là *pha tạp chất*.

1.1.3. *Chất bán dẫn pha tạp*

a. *Chất bán dẫn pha tạp loại n*

Tiến hành pha các nguyên tử thuộc nhóm 5 trong bảng tuần hoàn (Antimony hoặc Phosphorus) vào mạng tinh thể của chất bán dẫn thuần nhờ công nghệ đặc biệt với nồng độ cao (10^{10} đến 10^{18} nguyên tử/cm³). Nguyên tử tạp chất liên kết với các nguyên tử chất bán dẫn thuần trong mạng tinh thể sẽ thừa một điện tử hóa trị, liên kết yếu với hạt nhân và dễ dàng bị ion hóa nhờ 1 nguồn năng lượng yếu, tách khỏi hạt nhân và trở thành *electron tự do* và tạo nên *ion dương tạp chất bất động*.

Tại nhiệt độ phòng, toàn bộ các nguyên tử tạp chất đều bị ion hóa. Ngoài ra, hiện tượng phát sinh hạt dẫn giống như cơ chế của chất bán dẫn thuần vẫn xảy ra nhưng với mức độ yếu hơn. Mức năng lượng *tạp chất loại n* hay *loại cho điện tử (donor)* phân bố bên trong vùng cấm, sát đáy vùng dẫn. Nếu một nguyên tử chất bán dẫn thuần được thay thế bởi một nguyên tử tạp chất thì độ dẫn điện của chất bán dẫn pha tạp tăng 10^5 lần so với chất bán dẫn thuần. Trong mạng tinh thể tồn tại nhiều *ion dương tạp chất bất động* và dòng điện trong chất bán dẫn pha tạp loại n gồm 2 thành phần : *điện tử- hạt dẫn đa số (majority)* có nồng độ là n_n và *lỗ trống- hạt dẫn thiểu số (minority)* có nồng độ là p_n ($n_n \gg p_n$).



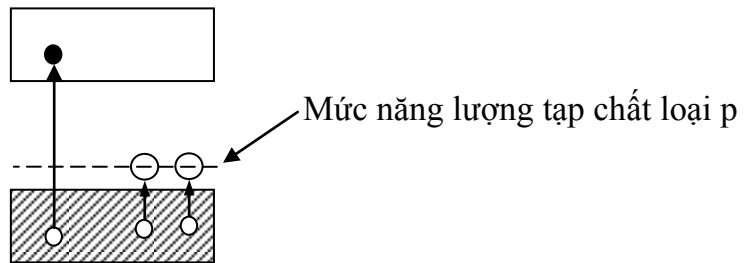
Hình 3. Cơ chế phát sinh hạt dẫn trong chất bán dẫn pha tạp loại n

b. *Chất bán dẫn pha tạp loại p*

Tiến hành pha tạp chất thuộc nhóm 3 trong bảng tuần hoàn (Boron hoặc Aluminum) vào mạng tinh thể chất bán dẫn thuần với nồng độ cao. Nguyên tử

tạp chất khi liên kết với các nguyên tử chất bán dẫn thuần trong mạng tinh thể sẽ thiếu một điện tử hóa trị nên 1 liên kết bị khuyết và được gọi là *lỗ trống* dễ dàng nhận điện tử, và khi đó nguyên tử tạp chất bị ion hóa tạo nên *ion âm tạp chất bất động* đồng thời phát sinh *lỗ trống tự do*. Mức năng lượng *tạp chất loại p* hay *loại nhận điện tử (acceptor)* nằm trong vùng cấm sát đỉnh vùng hóa trị.

Ngoài ra, vẫn xảy ra cơ chế phát sinh hạt dẫn giống trong chất bán dẫn thuần với mức độ yếu hơn. Trong mạng tinh thể tồn tại nhiều *ion âm tạp chất bất động* và dòng điện trong chất bán dẫn pha tạp loại p gồm 2 thành phần: *lỗ trống-hạt dẫn đa số có nồng độ p_p* và *điện tử-hạt dẫn thiếu số có nồng độ n_p* ($p_p \gg n_p$).



Hình 4. Cơ chế phát sinh hạt dẫn trong chất bán dẫn pha tạp loại p

Kết luận:

- ✓ Ở trạng thái cân bằng, tích số nồng độ 2 loại hạt dẫn luôn là hằng số

$$n_n \cdot p_n = n_p \cdot p_p = n_i \cdot p_i = n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

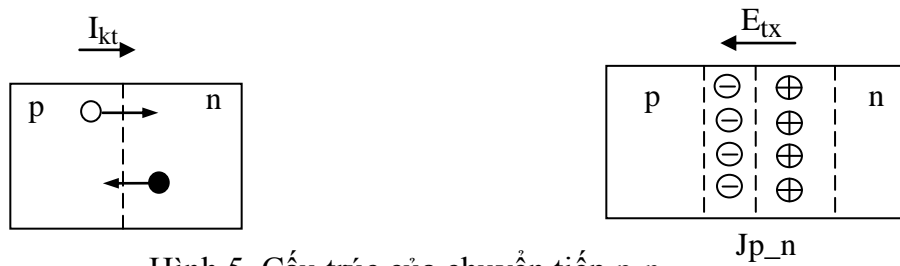
- ✓ Trong chất bán dẫn pha tạp loại n: $n_n \gg n_i \gg p_n$ nên: $n_n = N_D^+$
- ✓ Trong chất bán dẫn pha tạp loại p: $p_p \gg p_i \gg n_p$ nên: $p_p = N_A^-$

1.2. Diode bán dẫn

Khi cho 2 đơn tinh thể bán dẫn tạp chất loại p và n *tiếp xúc công nghệ* với nhau hình thành nên *chuyển tiếp p-n* (junction p-n).

1.2.1. Sự hình thành miền điện tích không gian:

Do có sự chênh lệch về nồng độ $p_p \gg p_n$ và $n_n \gg n_p$ nên tại miền tiếp xúc xảy ra hiện tượng khuếch tán các hạt dẫn đa số (lỗ trống chuyển động từ $p \rightarrow n$ và điện tử chuyển động từ $n \rightarrow p$), gây nên dòng khuếch tán gồm 2 thành phần: dòng chuyển dời có hướng của điện tử và của lỗ trống có chiều quy ước $p \rightarrow n$. Nếu mức pha tạp của 2 miếng bán dẫn loại p và loại n bằng nhau thì 2 thành phần dòng có cường độ bằng nhau, nhưng thông thường người ta pha tạp 2 miếng bán dẫn với nồng độ khác nhau ($N_A^- \gg N_D^+$).



Hình 5. Cấu trúc của chuyển tiếp p-n

Khi các hạt dẫn đa số dịch chuyển để lại các ion tạp chất gần bề mặt tiếp giáp, do đó xuất hiện một **lớp điện tích khối do ion tạp chất tạo nên**, có độ rộng l_o , nghèo hạt dẫn đa số và có điện trở rất lớn, được gọi là *miền nghèo*, hay *tiếp giáp J_p-n* hoặc *chuyển tiếp J_p-n* , miền nghèo ăn sâu vào miền bán dẫn được pha tạp với nồng độ thấp hơn ($N_A^- \gg N_D^+ \Rightarrow l_{op} \ll l_{on}$), đồng thời xuất hiện một điện trường trong có hướng từ $n \rightarrow p$, được gọi là *điện trường tiếp xúc E_{tx}* . Hình thành nên một hàng rào điện thế hay một điện thế tiếp xúc $U_{tx} = E_{tx} \cdot l_o$. Điện trường E_{tx} cản trở chuyển động khuếch tán và nhưng gây nên chuyển động trôi của các hạt dẫn thiểu số qua miền tiếp xúc, dòng trôi ngược chiều với dòng khuếch tán. Nếu chuyển động khuếch tán xảy ra mạnh, độ rộng miền nghèo tăng, điện trường E_{tx} tăng, cản trở chuyển động khuếch tán và kích thích chuyển động trôi và dẫn tới trạng thái cân bằng động: $I_{kt} = I_{trôi}$, tức là vẫn tồn tại 2 dòng điện nhưng ngược chiều nhau. Hiệu điện thế tiếp xúc được xác định:

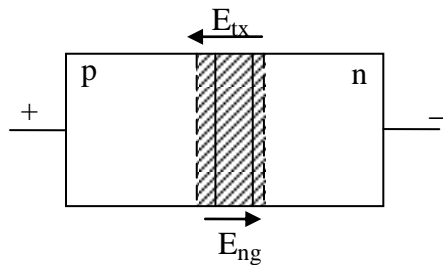
$$U_{tx} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) \quad (2)$$

Chuyển động trôi là sự chuyển dời có hướng của các hạt dẫn dưới tác động của từ trường còn *chuyển động khuếch tán* được gây nên bởi sự chênh lệch về nồng độ. Với những điều kiện tiêu chuẩn và tại nhiệt độ phòng, hiệu điện thế tiếp xúc (U_{tx}) có giá trị khoảng 0,3V với tiếp giáp làm từ Ge và 0,6V với tiếp giáp làm từ Si.

1.2.2. Tiếp giáp Jp-n khi có điện trường ngoài

a. Phân cực thuận

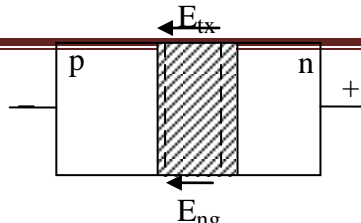
Điện trường ngoài E_{ng} tập trung chủ yếu trong miền điện tích không gian có chiều ngược chiều với E_{tx} (cực dương \rightarrow p và cực âm \rightarrow n). Theo nguyên lý xếp chồng, điện trường tổng $\vec{E}_t = \vec{E}_{tx} + \vec{E}_{ng}$ hay $E_t = E_{tx} - E_{ng}$. Vậy cường độ điện trường tổng $E_t < E_{tx}$, độ rộng miền nghèo giảm, làm tăng chuyển động khuếch tán của hạt dẫn đa số, hay cường độ dòng điện I_{kt} tăng, cường độ dòng điện trôi $I_{trôi}$ giảm. Người ta gọi đó là hiện tượng phun hạt dẫn đa số qua tiếp giáp Jp-n và trường hợp này được gọi là **phân cực thuận cho chuyển tiếp p-n**. (Thường điện áp phân cực thuận nhỏ hơn điện áp tiếp xúc hay hàng rào thế).



Hình 6. Phân cực thuận cho Jp-n

b. Phân cực ngược

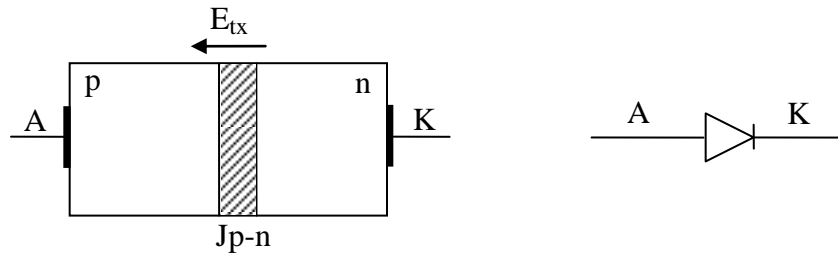
Điện trường ngoài E_{ng} cùng chiều với E_{tx} (cực dương \rightarrow n, cực âm \rightarrow p). Khi đó cường độ điện trường tổng $\vec{E}_t = \vec{E}_{tx} + \vec{E}_{ng}$ hay $E_t = E_{tx} + E_{ng} > E_{tx}$ độ rộng miền nghèo tăng, cản trở chuyển động khuếch tán, dòng khuếch tán I_{kt} giảm tới 0, dòng trôi I_{tr} tăng chút ít và nhanh chóng đạt được giá trị bão hòa được gọi là *dòng ngược bão hòa*. Trường hợp này được gọi là **phân cực ngược cho chuyển tiếp p-n**.



1.2.3. Cấu tạo, ký hiệu và nguyên lý làm việc của diode bán dẫn

a. Cấu tạo và ký hiệu

Diode bán dẫn có cấu tạo là một chuyển tiếp p-n với một điện cực nối tới miền p gọi là Anode(A) và một điện cực được nối tới miền n được gọi là Cathode (K), liên kết đó được gọi là liên kết Ohmic và có thể coi là một điện trở có giá trị nhỏ nối tiếp với diode ở mạch ngoài.



Hình 8. Cấu tạo và ký hiệu của Diode

b. Nguyên lý hoạt động và đặc tuyến Volt Ampere

Dưới tác động của điện trường ngoài diode hoạt động như van một chiều:

☞ **Khi phân cực thuận** ($U_{AK} > 0$)

❖ Ban đầu, khi điện áp U_{AK} vẫn còn nhỏ dòng I_D tăng theo hàm số mũ của điện áp:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_{AK}}{m \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

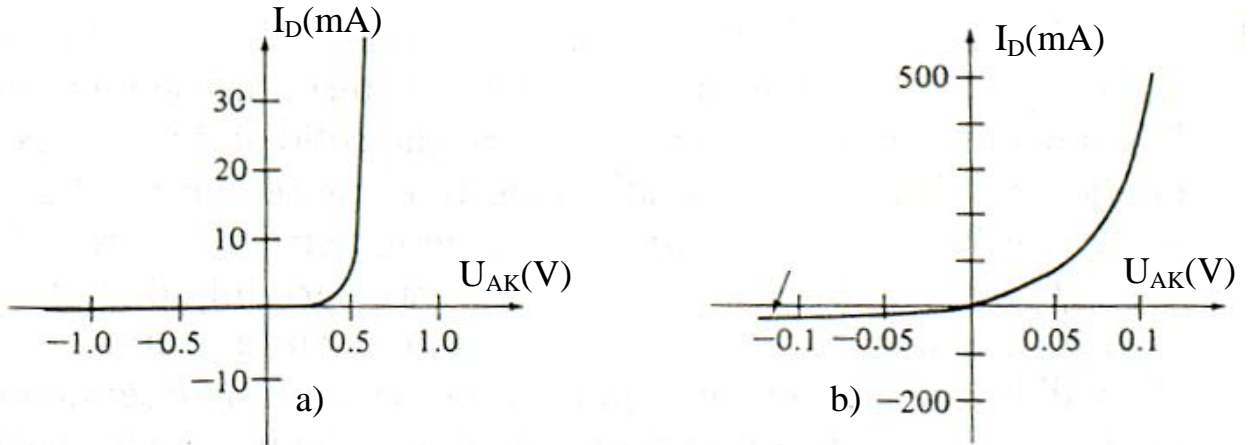
Trong đó:

$I_S(T)$ là dòng ngược bão hòa, phụ thuộc vào nồng độ của hạt dẫn thiểu số tại trạng thái cân bằng, phụ thuộc vào bản chất cấu tạo của chất bán dẫn pha tạp và do đó phụ thuộc vào nhiệt độ.

U_T : Thế nhiệt (Thermal Voltage); $U_T = \frac{kT}{q} \approx 26mV$; $k = 1,38.10^{-23} J/K$:

hằng số Boltzman; $q = 1,6.10^{-19} (C)$ điện tích của hạt mang điện; K : nhiệt độ được đo bằng đơn vị Kenvil.

m : hệ số hiệu chỉnh giữa lý thuyết và thực tế.



Hình 9. (a) Đặc tuyến Volt-Ampere của Diode, (b) Miền gần gốc

❖ Nếu $U_{AK} > 0,1V$ có thể biểu diễn hàm quan hệ giữa I_D và U_{AK} :

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_{AK}}{m \cdot U_T}} \right) \quad (4)$$

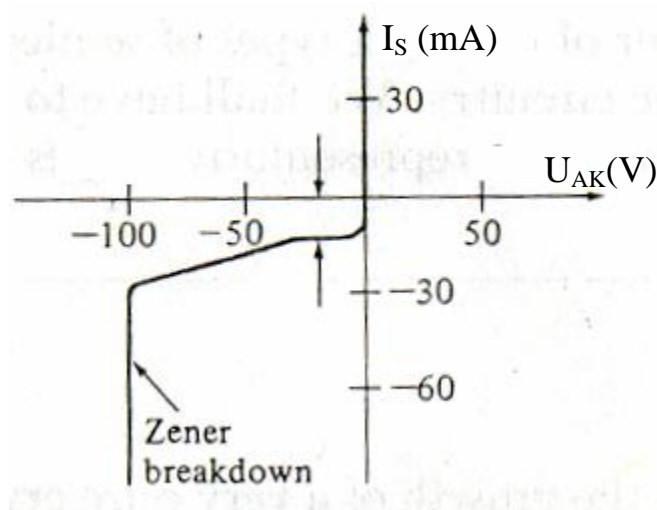
Tuy nhiên với giá trị U_{AK} đủ lớn thì quan hệ giữa dòng I_D và điện áp U_{AK} không theo phương trình trên. Khi U_{AK} đạt giá trị bằng điện áp ngưỡng U_{th} diode dẫn mạnh, dòng I_D tăng mạnh, tiếp giáp p-n được coi là điện trở thuần có giá trị rất nhỏ.

☞ **Khi phân cực ngược** ($U_{AK} < 0$)

❖ Khi điện áp phân cực ngược $|U_{AK}|$ còn nhỏ, dòng I_D quan hệ với điện áp U_{AK} theo phương trình (3)

❖ Khi $|U_{AK}| > 0,1V$ có thể biểu diễn: $I_D = -I_S$ (do $e^{\frac{U_{AK}}{m \cdot U_T}} \ll 1$).

Vậy trong trường hợp phân cực thuận dòng I_D có giá trị lớn do sự phun hạt dẫn đa số qua tiếp giáp p-n, ngược lại trong trường hợp phân cực ngược dòng qua diode chỉ là dòng ngược bão hòa I_S có giá trị rất nhỏ. Điều này thể hiện tính chất van một chiều của diode.



Hình 10. Phân cực ngược cho diode

☞ **Vùng đánh thủng** ($U_{AK} < 0$ và $|U_{AK}|$ đủ lớn): Khi điện áp phân cực ngược đủ lớn đạt được giá trị điện áp đánh thủng (U_{BR}), dòng I_D tăng đột ngột nhưng điện áp U_{AK} không tăng. Khi đó tiếp giáp p-n bị đánh thủng và diode mất tính chất van. Có hai hiện tượng đánh thủng chính: Đánh thủng vì nhiệt và đánh thủng vì điện.

Đánh thủng vì nhiệt: Do các hạt dẫn thiểu số được gia tốc trong điện trường mạnh nên va chạm với các nguyên tử nút mạng làm cho nhiệt độ tại miền tiếp xúc tăng, làm phát sinh cặp hạt dẫn điện tử - lỗ trống. Số hạt dẫn mới được phát sinh tiếp tục va chạm với các nguyên tử nút mạng, càng làm nhiệt độ tăng và số lượng hạt dẫn tăng một cách đột ngột, cường độ dòng ngược tăng đột biến và làm phá hỏng tiếp giáp p-n.

Đánh thủng vì điện: theo hai cơ chế là cơ chế thác lũ và cơ chế xuyên hầm (Tunnel hay Zener).

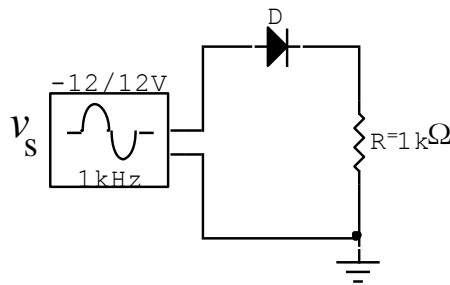
✓ *Cơ chế đánh thủng thác lũ*: Do các hạt thiểu số được gia tốc trong điện trường mạnh và chạm với các nguyên tử nút mạng, cung cấp năng lượng cho các electron hóa trị có thể bứt ra khỏi hạt nhân trở thành electron tự do, hiện tượng ion hóa nguyên tử này được gọi là *hiện tượng ion hóa do va chạm*, làm phát sinh các cặp điện tử - lỗ trống tự do. Và các hạt dẫn mới được phát sinh tiếp tục được gia tốc trong điện trường mạnh và ion hóa các nguyên tử khác khi đó số hạt dẫn trong miền điện tích không gian tăng lên đột ngột như “thác lũ” làm cho điện trở suất giảm và cường độ dòng ngược tăng đột biến, chuyển tiếp p-n bị đánh thủng. Trong hầu hết các chuyển tiếp p-n, đánh thủng theo cơ chế thác lũ luôn chiếm ưu thế.

✓ *Cơ chế đánh thủng xuyên hầm*: Cường độ điện trường mạnh cũng cung cấp năng lượng cho các electron hóa trị của nguyên tử chất bán dẫn thuần để có thể bứt ra khỏi hạt nhân trở thành electron tự do. Hiện tượng ion hóa này được gọi là *ion hóa do điện trường*. Nếu cường độ điện trường ngược đủ lớn làm số lượng các hạt dẫn tăng lên một cách đáng kể hay cường độ dòng điện ngược tăng đột ngột và tiếp giáp p-n bị đánh thủng. Có thể hình dung trong cơ chế đánh thủng xuyên hầm các electron tự do từ vùng hóa trị của miền p dịch chuyển xuyên qua độ rộng đường hầm sang vùng dẫn của miền n.

1.2.4. Ứng dụng

a. Chỉnh lưu: Biến đổi điện áp xoay chiều thành điện áp một chiều (nắn điện)

❖ *Chỉnh lưu nửa chu kỳ (half-wave Rectifier)* :

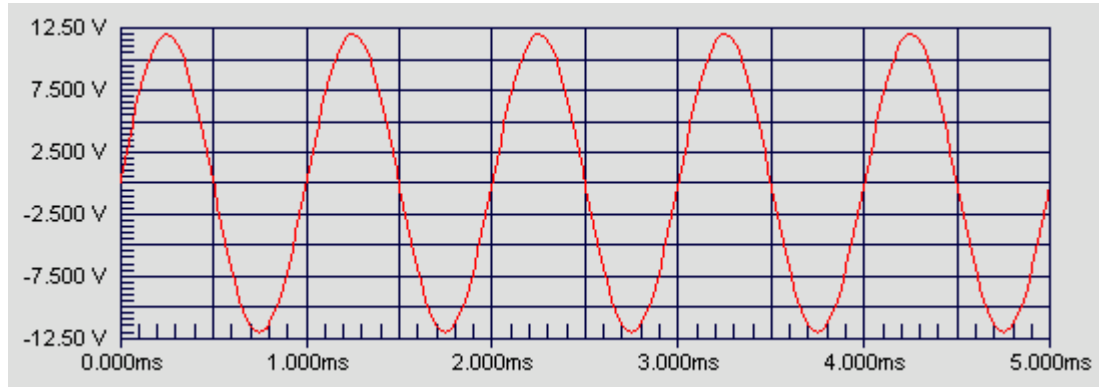


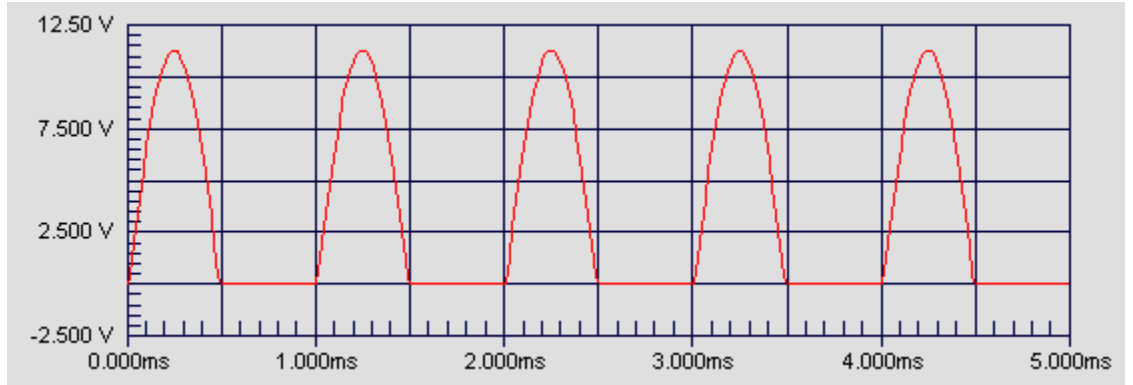
Diode được coi là *lý tưởng*: $U_{AK} \geq 0$: diode thông hoàn toàn

$U_{AK} < 0$: diode ngắt

Trong nửa chu kỳ dương, $U_{AK} \geq 0$, diode cho tín hiệu qua, $v_o = v_i$

Trong nửa chu kỳ âm, $U_{AK} < 0$, diode ngắt, hở mạch, $v_o = 0$.



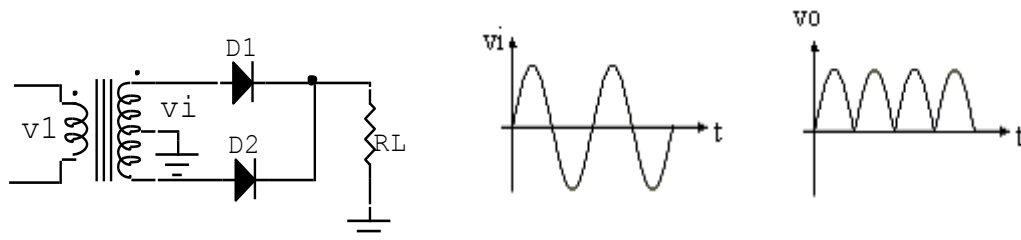


❖ **Chỉnh lưu 2 nửa chu kỳ (Full-wave Rectifier) :**

Trong nửa chu kỳ dương: diode D_1 thông, D_2 ngắt, dòng qua D_1 và tải R_L

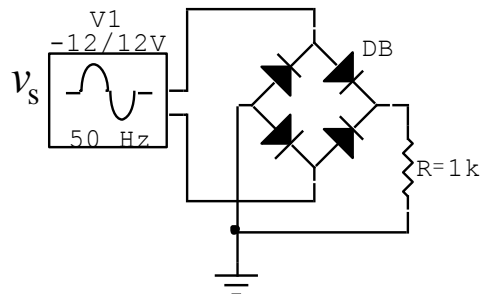
Trong nửa chu kỳ âm: diode D_1 ngắt và D_2 thông, dòng qua D_2 và tải R_L

Vậy trên tải R_L xuất hiện điện áp trong cả 2 nửa chu kỳ

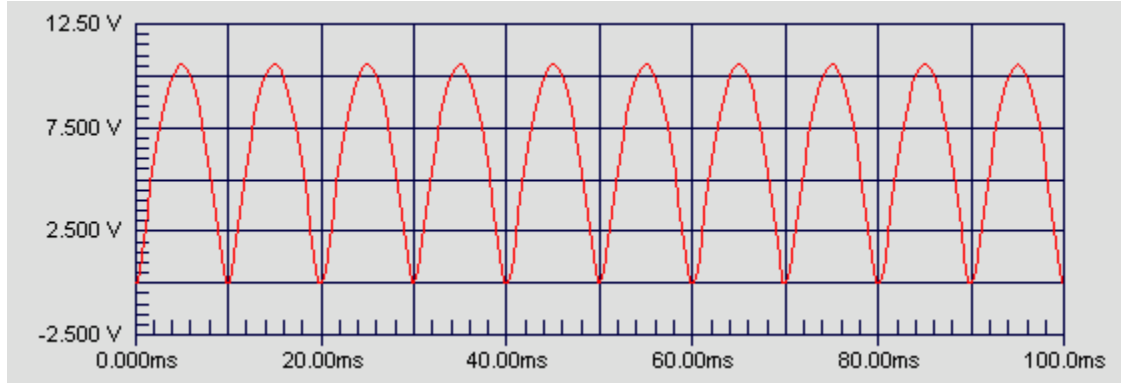


❖ **Chỉnh lưu cầu (Bridge Rectifier) :**

Hình 11. Chỉnh lưu hai nửa chu kỳ



Hình 12. Chỉnh lưu cầu



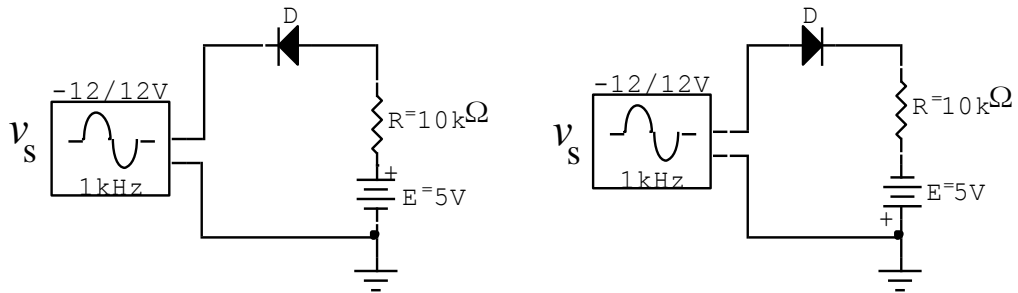
Chỉnh lưu với tụ lọc C: Tín hiệu sau chỉnh lưu có hệ số gợn lớn, tụ C đóng vai trò là phẳng điện áp do hiện tượng phóng nạp hay còn gọi là **lọc** để giảm hệ số gợn.

b. Hạn biên (clipper)

Tín hiệu xoay chiều đầu ra bị giới hạn tại một giá trị điện áp xác định. Mạch hạn biên trên hoặc mạch hạn biên dưới được mắc theo kiểu nối tiếp hay kiểu song song

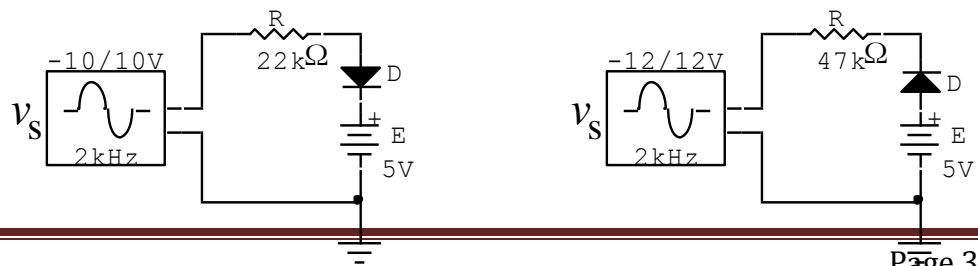
❖ Mạch hạn biên mắc nối tiếp: Hạn chế trên mức E (a)

Hạn chế dưới mức E (b)

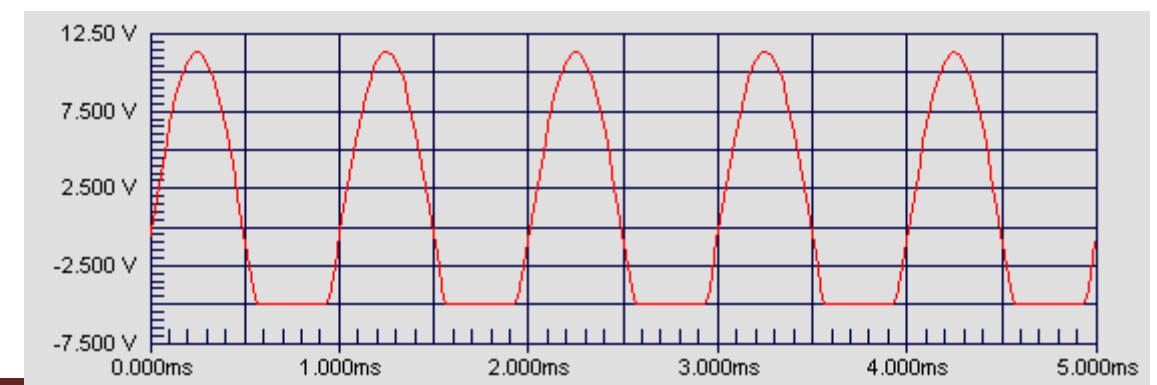
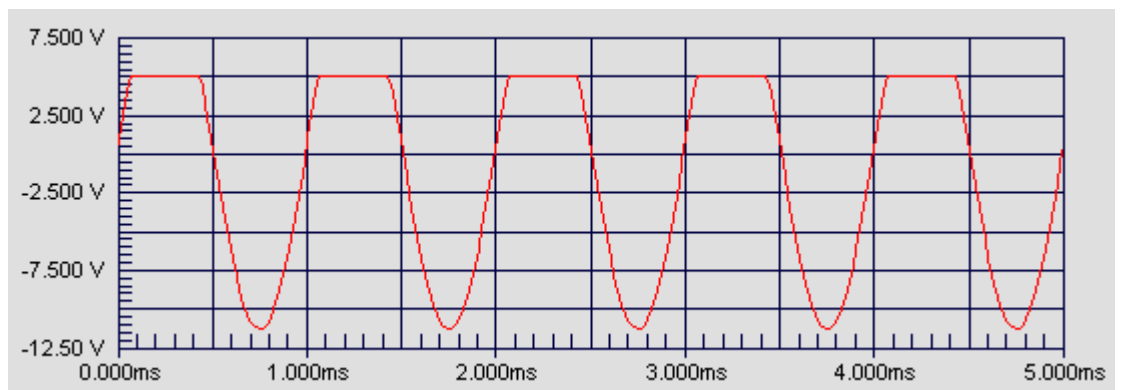
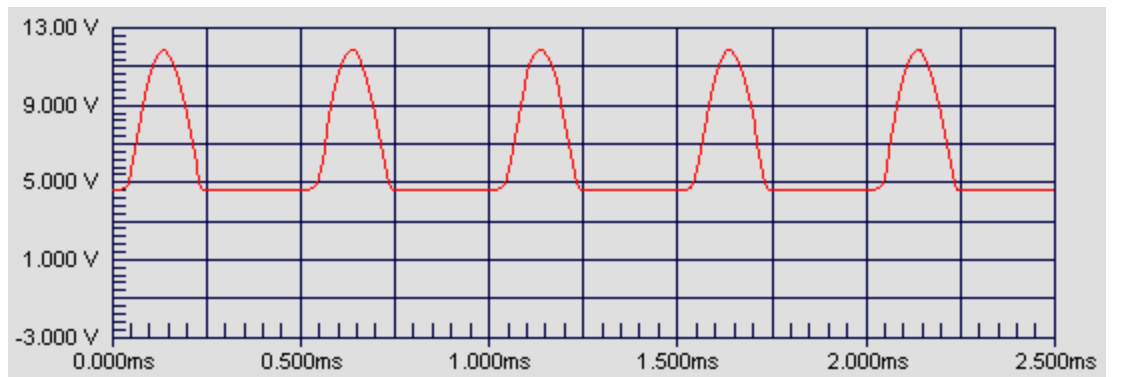
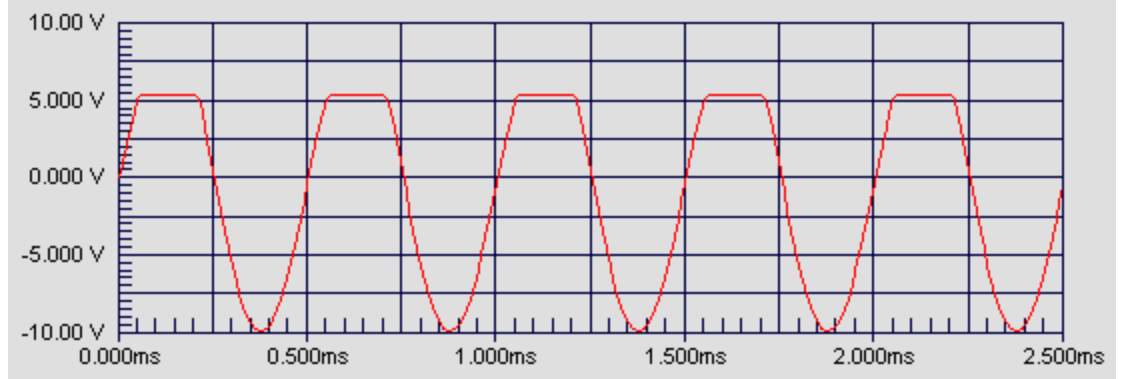


❖ Mạch hạn biên mắc song song: Hạn chế trên mức E (a)

Hạn chế dưới mức E (b)



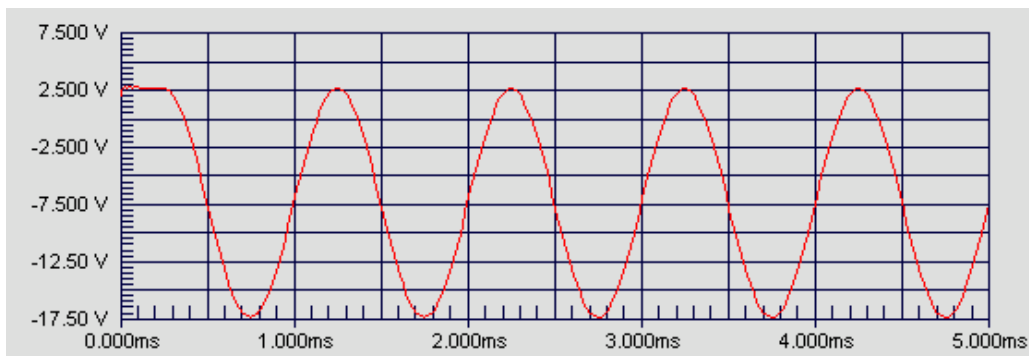
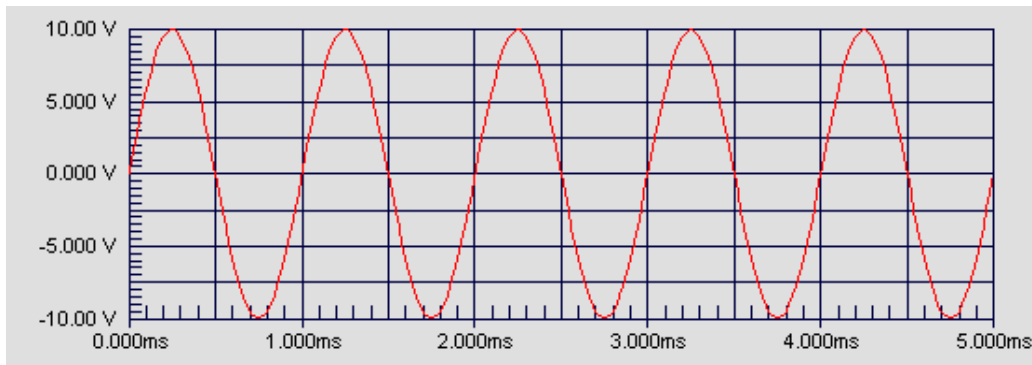
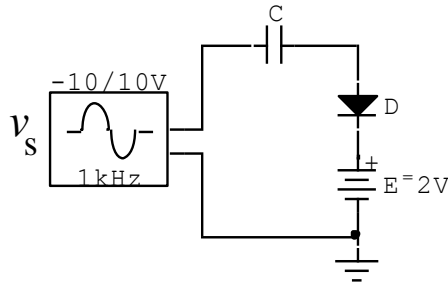
GIÁO TRÌNH LINH KIỆN ĐIỆN TỬ



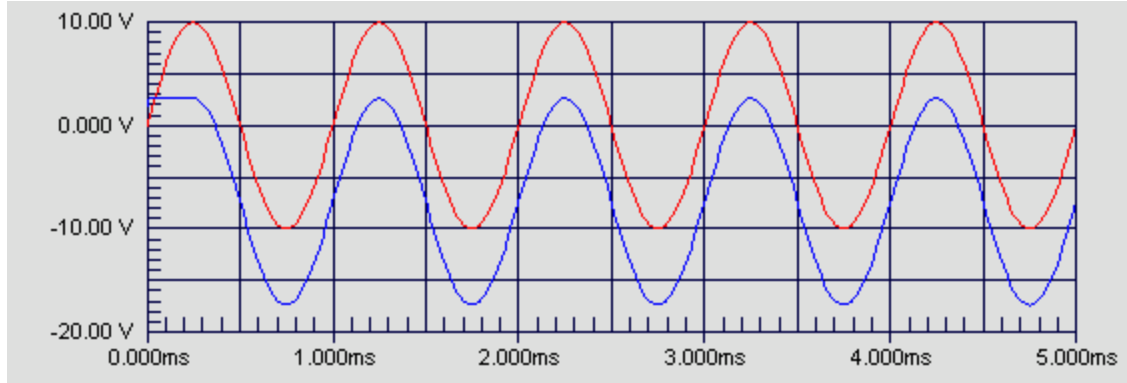
c. Mạch ghim (clamper)

Tín hiệu ac đầu ra được dịch (shift) một giá trị điện áp dc so với tín hiệu điện áp đầu vào để khôi phục thành phần dc của tín hiệu đầu vào.

Tại thời điểm ban đầu, tụ chưa tích điện. Trong nửa chu kỳ dương đầu tiên của tín hiệu đầu vào, khi điện áp đầu vào lớn hơn điện áp ngưỡng của diode, diode thông hoàn toàn, tụ được tích điện đến giá trị cực đại: $U_{cmax}=v_i-E$ (trong đó V_i là biên độ điện áp đầu vào). Do tụ không thể phóng điện qua diode nên, $v_o=v_i-U_{cmax}$, hay có thể nói điện áp đầu ra được dịch so với điện áp đầu vào một giá trị điện áp dc (U_{cmax}).

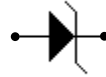


Hình 14. Mạch ghim điện áp



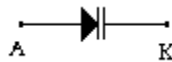
1.2.5. Một số diode đặc biệt

a. Diode Zener (diode ổn áp)



Diode Zener là một diode đặc biệt được pha tạp chất với nồng độ rất cao và có thể hoạt động trong *miền đánh thủng* của đặc tuyến Volt-Ampere. Trong miền phân cực thuận, diode Zener hoạt động như một diode chỉnh lưu thường. Trong miền phân cực ngược, khi điện áp phân cực ngược đạt được giá trị điện áp $U_Z = -U_{BR}$, dòng qua diode (I_Z) tăng mạnh, nhưng điện áp $U_Z = \text{const}$, nên diode Zener được sử dụng để ổn định điện áp một chiều.

b. Varactor diode (diode biến dung)



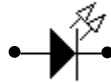
Tiếp giáp p-n khi được phân cực ngược có thể được coi tương đương như một tụ điện (do miền điện tích không gian nghèo hạt dẫn đa số nên có điện trở suất lớn), độ rộng của miền điện tích không gian phụ thuộc vào điện áp phân cực ngược nên giá trị điện dung của miền điện tích không gian thay đổi theo giá trị điện áp phân cực ngược. Diode biến dung được ứng dụng trong các mạch cộng hưởng chọn tần: Mạch điều chỉnh tần số tự động - AFC (Automatic frequency Controller) hay VCO (Voltage-Controlled Oscillator).

c. Photo diode (Diode thu quang)



Là một linh kiện biến đổi quang năng thành điện năng. Có cấu tạo giống diode chỉnh lưu nhưng vỏ bọc cách điện bên ngoài có một phần là kính hoặc thủy tinh trong suốt để nhận ánh sáng chiếu vào tiếp giáp p-n. Diode thu quang cũng hoạt động trong miền phân cực ngược. Khi ánh sáng chiếu vào tiếp giáp p-n cung cấp năng lượng cho các electron hóa trị để có thể bứt ra khỏi hạt nhân nguyên tử, làm phát sinh cặp hạt dẫn điện tử-lỗ trống tự do. Cường độ dòng ngược tăng tuyến tính với cường độ ánh sáng chiếu vào tiếp giáp. Diode thu quang được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển tự động theo cường độ ánh sáng.

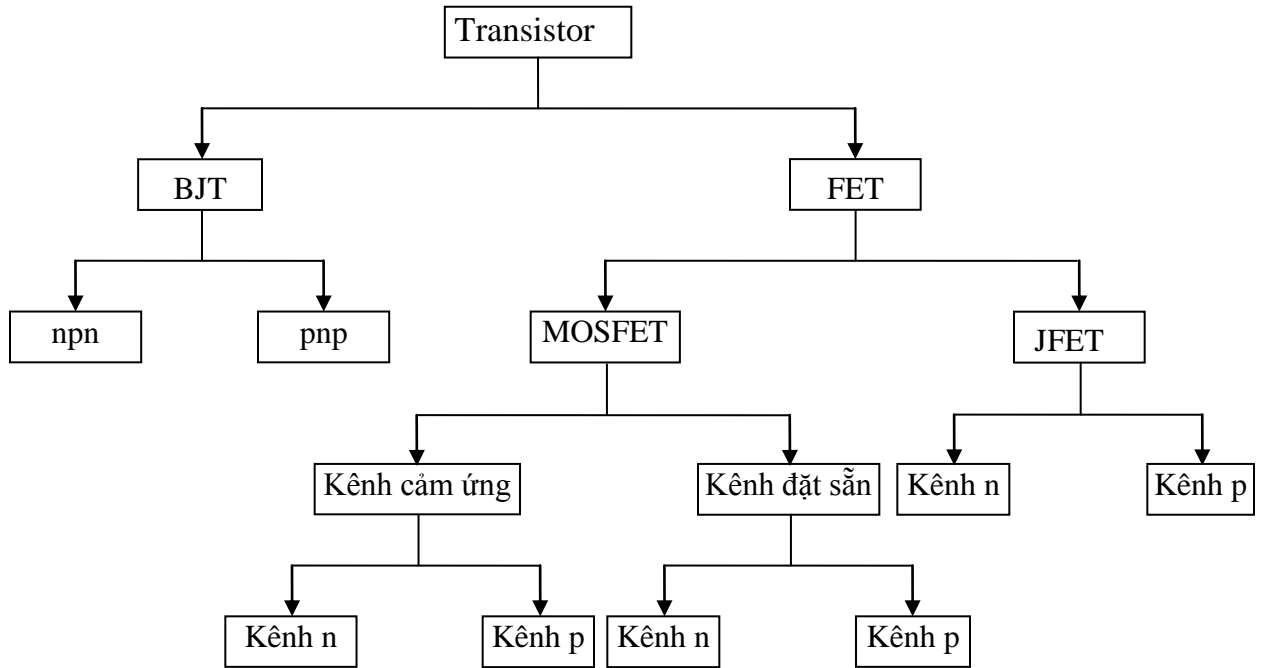
d. LED (Light Emitting Diode- diode phát quang)



Là linh kiện biến đổi điện năng thành quang năng, được pha tạp với nồng độ cao tinh thể bán dẫn tạp chất loại p hoặc loại n tới mức suy biến, độ rộng vùng cấm hẹp lại. Khi một điện áp thuận được đặt vào chuyển tiếp p-n, các hạt dẫn đa số chuyển động khuếch tán qua tiếp giáp p-n và trở thành hạt thiểu số trội, sau đó chúng khuếch tán sâu vào đơn tinh thể bán dẫn trung hòa về điện và tái hợp với hạt dẫn đa số và khi đó phát ra ánh sáng. Hiện tượng đó là khi các electron chuyển từ mức năng lượng cao xuống mức năng lượng thấp kèm theo phát xạ các photon, được gọi là hiện tượng tái hợp hạt dẫn. LED có thể phát ra ánh sáng trông thấy phụ thuộc vào điện áp ngưỡng. Điện áp ngưỡng rơi trên LED thường cao hơn diode chỉnh lưu.

1.3. Transistor

Transistor là một linh kiện điện tử gồm 3 điện cực có khả năng khuếch đại dòng, điện áp hay công suất. Nguyên lý cơ bản của Transistor đó là điện áp giữa 2 cực của nó điều khiển cường độ dòng điện của cực thứ 3. Có 2 loại Transistor: Transistor lưỡng cực (Bipolar Junction Transistor BJT) và Transistor trường (Field-Effect Transistor FET). Mỗi Transistor có một ưu điểm và đặc tuyến riêng và do đó cũng được ứng dụng trong những phạm vi riêng.



Hình 15. Sơ đồ phân loại Transistor

3.3. Transistor lưỡng cực (Bipolar Junction Transistor - BJT)

BJT gồm 3 lớp bán dẫn tạp chất tiếp xúc công nghệ xen kẽ nhau, hình thành nên 2 tiếp giáp Jp-n (phi tuyến) kết hợp với 3 tiếp xúc Ohmic (tuyến tính) và đưa ra 3 điện cực: Emitter (Cực phát), Base (Cực gốc) và Collector (Cực góp). Có 2 kết cấu đặc trưng: npn và pnp nhưng Transistor loại npn được sử dụng rộng rãi hơn.

1.3.1. Cấu tạo, ký hiệu và nguyên lý hoạt động của Transistor

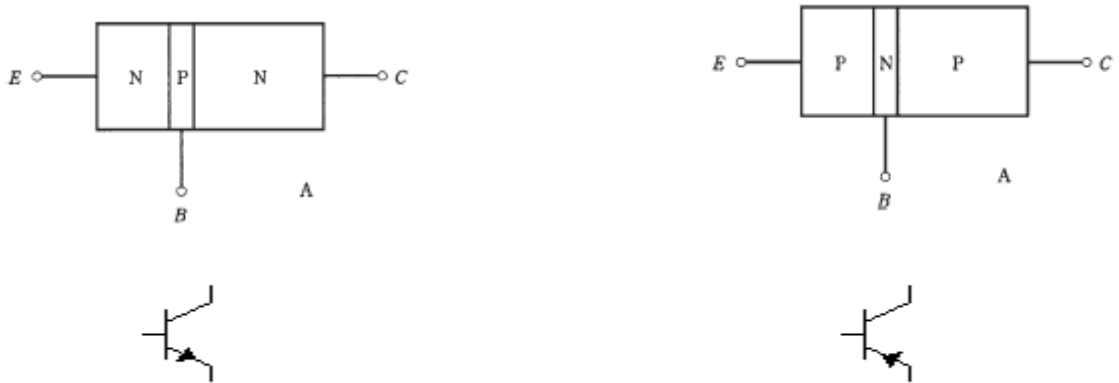
a. Cấu tạo, ký hiệu

Ba miền của Transistor được pha tạp với nồng độ khác nhau và có độ rộng cũng khác nhau:

- + Miền Emitter *pha tạp với nồng độ cao nhất và độ rộng trung bình*
- + Miền Base *pha tạp với nồng độ nhỏ nhất và mỏng nhất*
- + Miền Collector *pha tạp với nồng độ trung bình nhưng độ rộng lớn nhất*

Tiếp giáp Emitter - Base được gọi là: **J_{B-E} (J_E)**

Tiếp giáp Collector - Base được gọi là: **J_{B-C} (J_C)**



Hình 16. Cấu tạo và ký hiệu của BJT

Có thể coi Transistor tương đương với 2 diode mắc đối nhau nhưng không có nghĩa cứ mắc 2 diode đối nhau có thể hoạt động giống như Transistor vì khi đó không có sự tương hỗ lẫn nhau giữa 2 tiếp giáp J_{B-E} và J_{B-C} .



Transistor có 2 tiếp giáp p-n nên có thể có 4 khả năng phân cực cho 2 tiếp giáp

| J_E | J_C | Miền làm việc | Ứng dụng |
|----------------|----------------|---------------|----------|
| Phân cực ngược | Phân cực ngược | Miền cắt | Khóa |
| Phân cực thuận | Phân cực ngược | Miền tích cực | Khuếch |

| | | | |
|----------------|----------------|----------------|------|
| | | | đại |
| Phân cực thuận | Phân cực thuận | Miền bão hòa | Khóa |
| Phân cực ngược | Phân cực thuận | Tích cực ngược | |

Để Transistor hoạt động trong chế độ khuếch đại (hay trong miền tích cực), J_E được phân cực thuận và J_C phân cực ngược.

Nếu J_E và J_C đều được phân cực thuận hoặc đều được phân cực ngược thì Transistor hoạt động như một khóa điện tử với hai trạng thái: Trạng thái ngắt và trạng thái thông bão hòa, được ứng dụng trong các mạch xung và mạch số.

b. Nguyên lý hoạt động (npn)

Khi J_E được phân cực thuận ($U_{BE}>0$), dòng điện qua J_E chủ yếu là dòng khuếch tán của các hạt dẫn đa số, điện tử từ miền Emitter được phun vào miền Base đồng thời lỗ trống từ miền Base khuếch tán sang miền Emitter, tuy nhiên do nồng độ pha tạp của miền Base rất thấp nên cường độ dòng lỗ trống nhỏ hơn rất nhiều so với cường độ dòng điện tử, nên có thể coi dòng I_E là dòng của các điện tử, phụ thuộc chủ yếu vào điện áp U_{BE} .

Khi các điện tử được phun từ miền Emitter sang miền Base, tiếp tục khuếch tán sâu vào trong miền Base và xảy ra hiện tượng tái hợp hạt dẫn, dòng I_B gồm 2 thành phần: dòng lỗ trống (hạt dẫn đa số) khuếch tán sang miền Emitter (I_{B1}) và dòng lỗ trống tái hợp với electron (I_{B2}).

Do độ rộng của miền Base rất mỏng nên chỉ có một số rất ít các điện tử tái hợp với lỗ trống trong miền Base còn đa số điện tử tới được chuyển tiếp J_C , J_C phân cực ngược nên electron được cuốn sang miền Collector. Dòng điện I_C trong miền Collector gồm 2 thành phần: I_{CB0} : dòng ngược bão hòa (dòng trôi của hạt dẫn thiểu số) và dòng cuốn của các hạt thiểu số trội từ miền Base sang miền Collector. Dòng ngược bão hòa I_{CB0} có giá trị rất nhỏ nên dòng cuốn của các hạt dẫn thiểu số trội là thành phần chủ yếu của dòng I_C , hay $I_C \approx I_E$ nên chỉ phụ thuộc vào điện áp U_{BE} mà độc lập với điện áp U_{CB} , tức là dòng I_C được điều khiển bởi điện áp U_{BE} , đó là nguyên lý hoạt động cơ bản của Transistor.

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \quad (5)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad (6)$$

Vậy: $I_C = \alpha(I_B + I_C) + I_{CB0}$ hay $I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot I_B + \frac{1}{1-\alpha} \cdot I_{CB0}$

Đặt $\frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta$ ta được:

$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta)I_{CB0} = \beta \cdot I_B + I_{CE0} \quad (7)$$

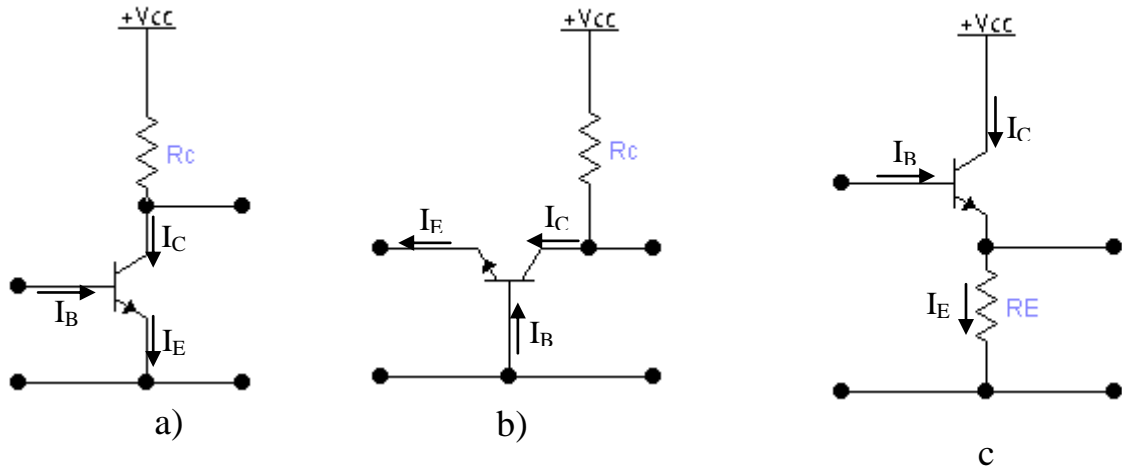
Trong đó: α là hệ số truyền đạt dòng điện $\alpha \approx 1$, α càng gần 1 Transistor càng tốt.

β : là hệ số khuếch đại dòng tĩnh (50-300)

Vậy: $\alpha = \beta / (1 + \beta)$

1.3.2. Các cách mắc của BJT

Nếu coi Transistor như mạng 4 cực, khi đó phải có một cực chung cho cả đầu vào và đầu ra. Có thể có 3 cách mắc (kết cấu): CE (*Common Emitter*); CB (*Common Base*) và CC (*Common Collector*).



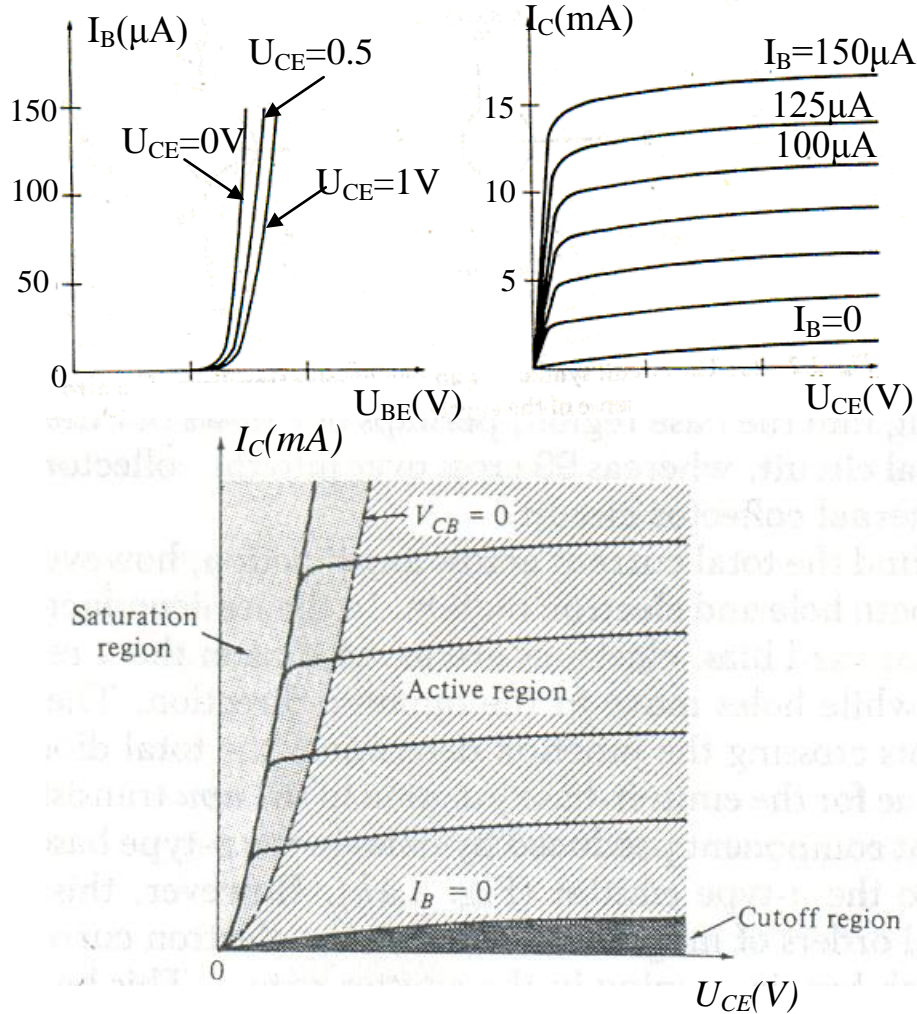
Hình 17. Các kết cấu của BJT a. CE b. CB c. CC

a. Kết cấu CE:

Đặc tuyến vào: $I_B = f(U_{BE}) \big|_{U_{CE} = const}$

Do J_E phân cực thuận mà $I_B \propto I_E$ nên đặc tuyến vào trong trường hợp này giống đặc tuyến của chuyển tiếp p-n phân cực thuận. Nếu U_{CE} tăng, mà

$U_{BE} = \text{const}$ khi đó U_{CB} tăng, hay điện áp phân cực ngược tăng, số hạt đến được tiếp giáp J_c càng nhiều hay số hạt bị tái kết hợp trong miền Base càng ít, nên dòng I_B giảm.



Hình 18. Đặc tuyến vào và đặc tuyến ra của kết cấu CE

Đặc tuyến ra: $I_C = f(U_{CE})|_{I_B = \text{const}}$

Miền khuếch đại (gần góc), độ dốc của đặc tuyến khá lớn. Khi U_{CE} tăng, điện áp U_{CB} cũng tăng, độ phân cực ngược của chuyển tiếp J_c tăng nên I_C tăng tuyến tính theo điện áp U_{CE} . Khi U_{CE} đạt giá trị đủ lớn ($\geq 2V$) dòng I_C đạt giá trị bão hòa, $I_C = \beta \cdot I_B$ tức là không phụ thuộc vào U_{CE} nhưng U_{CE} quá lớn thì I_C tăng đột ngột do xảy ra hiện tượng đánh thủng do hiệu ứng thác lũ hay hiệu ứng xuyên hầm. Nếu $U_{CE} < U_{BE(on)}$ thì dòng I_C giảm nhanh về giá trị 0.

b. Kết cấu CB:

Đặc tuyến vào: $I_E = f(U_{BE})|_{U_{CB}=const}$

Do J_E phân cực thuận nên đặc tuyến vào có dạng giống với đặc tuyến của diode khi phân cực thuận. Khi $U_{BE}=const$, U_{CB} tăng, phân cực ngược tăng, vùng nghèo J_c rộng ra, khoảng cách hiệu dụng giữa 2 miền J_E và J_c giảm nên dòng I_E tăng.

Đặc tuyến ra: $I_C = f(U_{CB})|_{I_E=const}$

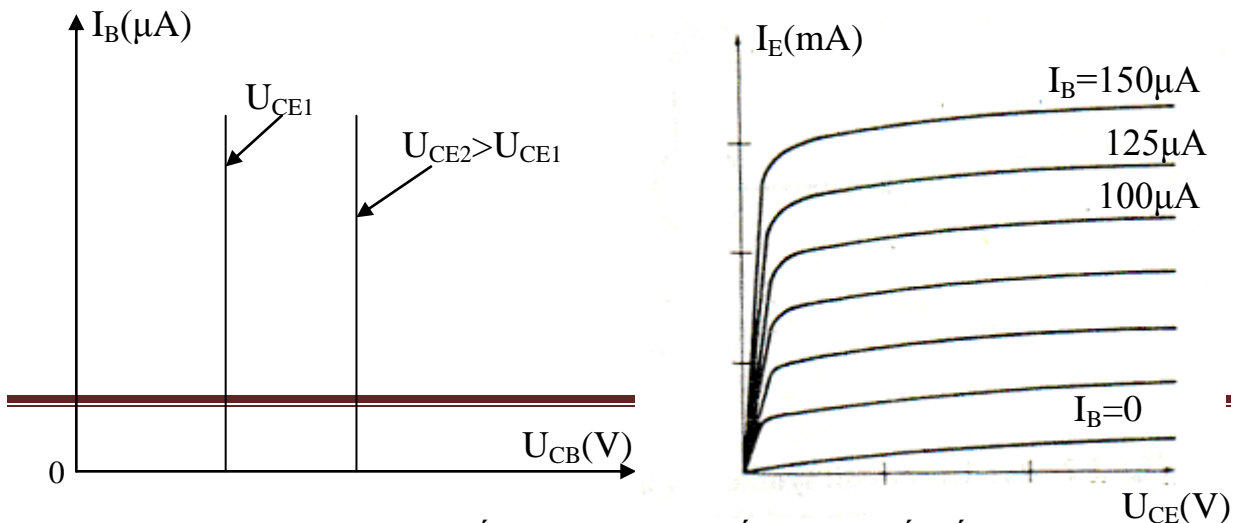
Do $I_E = const$, $I_C \approx I_E$ nên khi thay đổi U_{CB} thì dòng I_C thay đổi không đáng kể. Một điểm khác biệt đó là khi U_{CB} giảm tới 0 nhưng dòng I_C chưa giảm tới 0. Đó là do khi $U_{CB}=0$, bản thân chuyển tiếp J_c vẫn còn điện thế tiếp xúc, chính điện thế tiếp xúc này đã cuốn các hạt dẫn từ Base sang miền Collector nên dòng I_C vẫn có giá trị khác 0. Để dòng $I_C \approx 0$, chuyển tiếp J_c phải được phân cực thuận, khi đó Transistor chuyển sang hoạt động trong chế độ bão hòa. Điều đáng chú ý là khi $I_E=0$ nhưng vẫn có thành phần dòng rò I_{CE0} nên $I_C \neq 0$.

c. Kết cấu CC:

Đặc tuyến vào: $I_B = f(U_{CB})|_{U_{CE} = const}$

Do khi Transistor hoạt động trong chế độ khuếch đại, điện áp U_{BE} luôn giữ không đổi ($U_{BE}=0,7V$ đối với Si và $0,3V$ đối với Ge). Nên $U_{CB}=U_{CE}-U_{BE}=const$, U_{CB} không phụ thuộc vào I_B .

Đặc tuyến ra: $I_E = f(U_{CE})|_{I_B=const}$ Do $I_C \approx I_E$ nên đặc tuyến ra trong trường hợp này có dạng giống với đặc tuyến ra trong trường hợp CE.



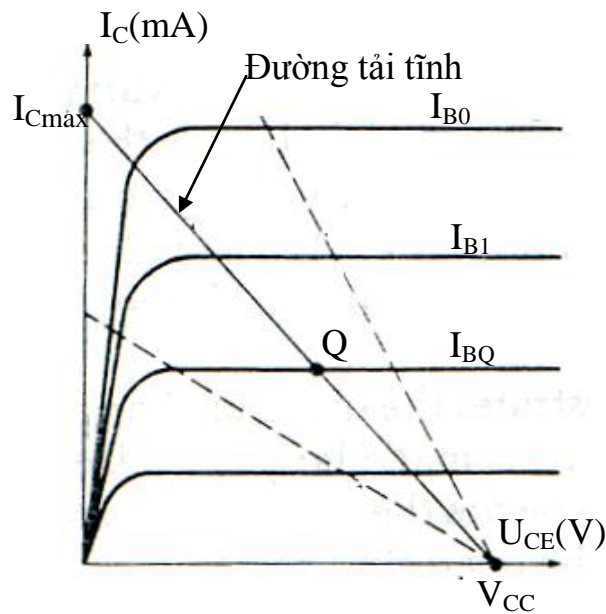
Hình 19. Đặc tuyến vào và đặc tuyến ra của kết cấu CC

1.3.3. Phân cực BJT:

Phân cực là cấp điện áp một chiều cho các điện cực của Transistor. Để BJT hoạt động trong chế độ khuếch đại I_E luôn phân cực thuận và I_C luôn phân cực ngược.

Đường tải tĩnh: $I_O = f(U_O)$ là mối quan hệ giữa cường độ dòng điện và điện áp đầu ra khi Transistor được mắc trong một mạch cụ thể (khi có tải).

Điểm công tác tĩnh là điểm nằm trên đường tải tĩnh xác định cường độ dòng điện và điện áp đầu ra khi không có tín hiệu xoay chiều đặt vào. Điểm công tác tĩnh chính là giao điểm của đường tải tĩnh và đặc tuyến ra ứng với giá trị $I_B = const$. Đường tải tĩnh được vẽ trên cùng hệ trục tọa độ với đặc tuyến ra.



Hình 20. Đường tải tĩnh và điểm làm việc tĩnh

Ổn định điểm công tác tĩnh khi nhiệt độ thay đổi

Transistor là một linh kiện rất nhạy cảm với nhiệt độ. Hai thông số của Transistor nhạy cảm với nhiệt độ nhất đó là điện áp U_{BE} và cường độ dòng ngược bão hòa I_{CB0} . Nếu dòng I_{CB0} tăng, làm cho dòng I_C tăng, số lượng hạt dẫn qua chuyển tiếp J_c tăng làm cho sự va chạm giữa các hạt dẫn với mạng tinh thể tăng, khi đó làm cho nhiệt độ tăng và tiếp tục làm I_{CB0} tăng, cứ thế nhiệt độ của

Transistor tăng mãi. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng quá nhiệt. Hiệu ứng quá nhiệt làm thay đổi điểm công tác tĩnh và nếu không có biện pháp hạn chế sẽ làm hỏng Transistor. Khi nhiệt độ thay đổi điện áp U_{BE} cũng thay đổi và do đó cũng làm điểm công tác tĩnh thay đổi. Tuy nhiên, trong điều kiện bình thường ảnh hưởng của dòng ngược bão hòa I_{CB0} đến I_C nhiều hơn ảnh hưởng của điện áp U_{BE} nên khi nói đến ảnh hưởng của nhiệt độ đến điểm công tác tĩnh thường nói đến ảnh hưởng của dòng bão hòa I_{CB0} , và đưa ra khái niệm **hệ số ổn định nhiệt**:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CB0}$$

Nên:
$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} = \frac{1 + \beta}{1 - \beta \cdot \frac{\Delta I_B}{\Delta I_C}} \quad (8)$$

Hệ số S càng nhỏ, tính ổn định đối với nhiệt độ càng cao.

Các phương pháp phân cực cho Transistor để ổn định điểm công tác tĩnh

1.4. Các phương pháp phân cực cho BJT

1.4.1 Phân cực cho BJT

Phân cực cho BJT là xác định điểm làm việc ban đầu (điểm làm việc tĩnh Q - Quiescent) bằng các nguồn một chiều.

Trên đặc tuyến vào, điểm Q có tọa độ: $u_{BE} = U_{BEQ}$; $i_B = I_{BQ}$

Trên đặc tuyến ra, điểm Q có tọa độ: $u_{CE} = U_{CEQ}$; $i_C = I_{CQ}$

Nh- vậy để phân cực cho BJT phải tạo ra hai nguồn một chiều: U_{BB} , R_B ở cửa vào và U_{CC} , R_C ở cửa ra (hình 3-5).

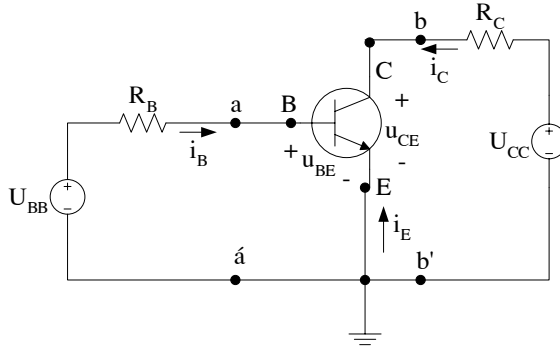
*Cửa vào

Phương trình Kirchhoff cho vòng mạch cửa vào:

$$U_{BB} = i_B R_B + u_{BE} \quad (3.12)$$

Đ- ờng tải cửa vào:

$$i_B = \frac{U_{BB} - u_{BE}}{R_B} \quad (3.13)$$



Hình 3-5 Phân cực cho BJT

Điểm làm việc cửa vào là tọa độ giao điểm Q giữa đ-ờng tải (3.13) với đặc tuyến V-A cửa vào của BJT (3.9). Tọa độ Q cửa vào trên hình 3-6a sẽ là:

$$u_{BE}(Q) = U_{BEQ} \approx U_f \approx 0,6V \quad (3.14)$$

$$i_B(Q) = I_{BQ} = \frac{U_{BB} - 0,6V}{R_B} \quad (3.15)$$

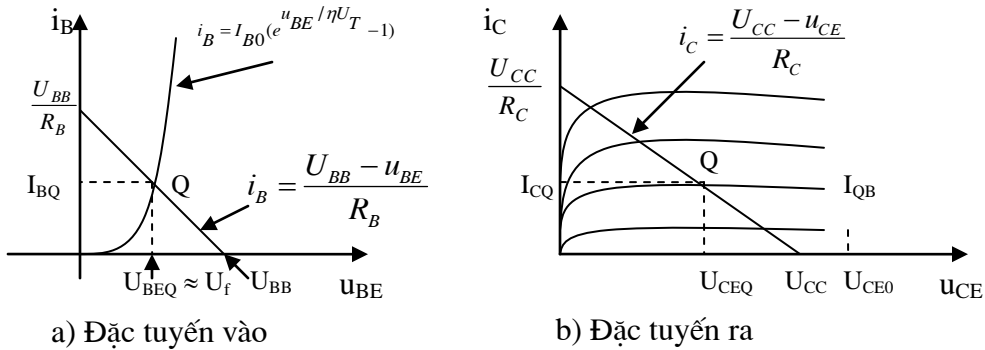
**Cửa ra*

Ph-ơng trình Kirchoff cho vòng mạch cửa ra:

$$U_{CC} = i_C R_C + u_{CE} \quad (3.16)$$

Đ-ờng tải cửa ra:

$$i_C = \frac{U_{CC} - u_{CE}}{R_C} \quad (3.17)$$



Hình 3-6 Điểm làm việc Q

Tọa độ Q cửa ra trên hình 3-6b sẽ là:

Dòng điện I_{CQ} t-ơng ứng I_{BQ} ở cửa vào khi bỏ qua dòng điện ng-ợc I_{CB0} :

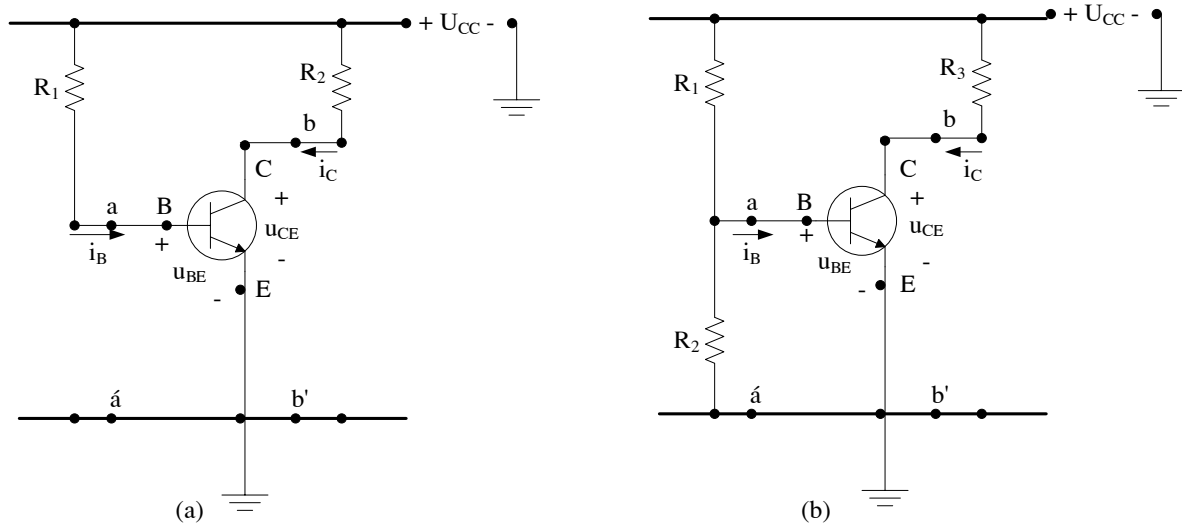
$$i_C(Q) = I_{CQ} = \beta_F I_{BQ} \quad (3.18)$$

Điện áp U_{CEQ} theo (3.16) sẽ là:

$$u_{CE}(Q) = U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_C \quad (3.19)$$

1.4.2 Các ph-ơng pháp phân cực cơ bản cho BJT

1. Phân cực bằng dòng điện bazơ



Hình 3-7 Các phương pháp phân cực cơ bản cho BJT

Phân cực bằng dòng điện bazơ đ-ợc thực hiện theo sơ đồ hình 3-7a với một nguồn một chiều U_{CC} duy nhất. Nguồn U_{BB} , R_B đ-ợc tạo ra từ nguồn U_{CC} , R_1 . Nguồn U_{CC} , R_C đ-ợc tạo ra từ nguồn U_{CC} , R_2 .

Mạch phân cực hình 3-7a có thể đ-ợc thay thế t-ơng đ-ơng bằng sơ đồ hình 3-5 với các tham số t-ơng đ-ơng:

$$U_{BB} = U_{CC} \quad (3.20)$$

$$R_B = R_1; R_C = R_2 \quad (3.21)$$

Các giá trị phân cực đ-ợc xác định theo sơ đồ hình 3-5 theo các công thức: (3.14), (3.15), (3.18), (3.19).

Có thể xác định các giá trị phân cực trực tiếp từ sơ đồ hình 3-7a, đ-ợc các kết quả nh- trên, chỉ thay thế các giá trị t-ơng ứng theo các công thức (3.20) và (3.21).

II. Phân cực bằng phân áp

Mạch phân cực bằng mạch phân áp đ-ợc thực hiện theo sơ đồ hình 3-17b từ một nguồn một chiều U_{CC} và các điện trở R_1 , R_2 , R_3 . Sơ đồ này có thể quy đổi t-ơng đ-ơng về sơ đồ hình 3-5.

Mạch phân áp cửa vào: U_{CC} và các điện trở R_1 , R_2 , có thể đ-ợc thay thế bằng nguồn áp U_{BB} , R_B . Các giá trị t-ơng đ-ơng nh- sau:

$$U_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC} \quad (3.22)$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.23)$$

Mạch cửa ra: U_{CC} , R_3 t-ơng đ-ơng với nguồn áp: U_{CC} , R_C :

$$U_{CC} = U_{CC} \quad (3.24)$$

$$R_C = R_3 \quad (3.25)$$

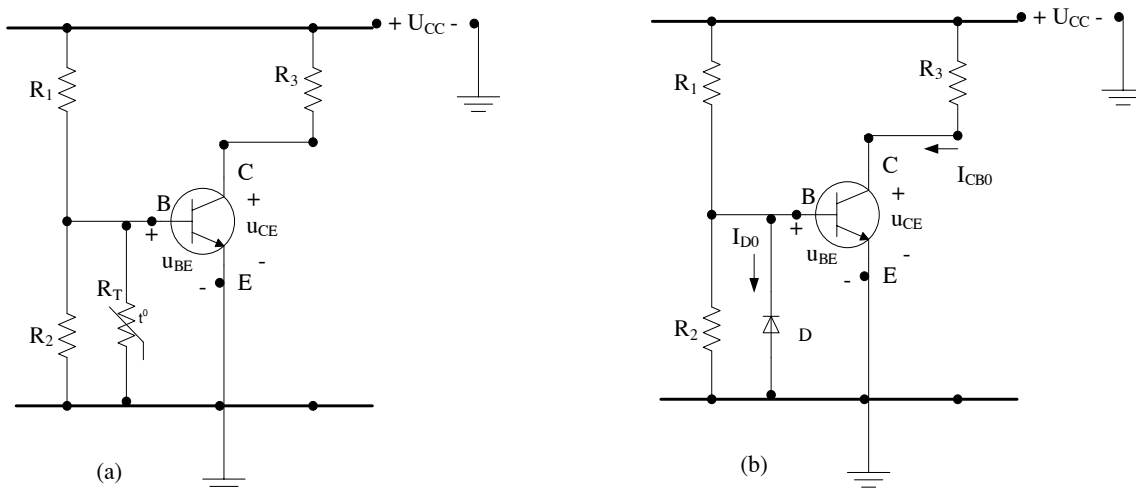
Các giá trị phân cực đ-ợc xác định từ sơ đồ hình 3-5 theo các công thức: (3.14), (3.15), (3.18), (3.19).

3.4.3 ổn định chế độ làm việc cho BJT

Trong quá trình làm việc, điểm làm việc của BJT có thể bị trôi khỏi vị trí đã chọn ngay cả khi ch- a có tác động của các tín hiệu có ích do một số hiệu ứng mất ổn định tác động nh- : nhiệt độ thay đổi, nguồn phân cực một chiều thay đổi và khi tham số của các phần tử trong mạch thay đổi. Để BJT làm việc bình thường, không ảnh hưởng đến chỉ tiêu chất lượng của mạch, trong các sơ đồ mạch điện tử sử dụng BJT thường thực hiện các biện pháp ổn định:

- Đ- a thêm vào mạch các phần tử hoặc các đoạn mạch ổn định nhiệt độ, ổn định nguồn một chiều.
- Thay thế các phần tử mạch có tham số ổn định hơn.
- Tạo ra biến đổi ngược bù trừ cho những biến đổi gây mất ổn định hoặc phương pháp cung cấp ngược - phương pháp hồi tiếp âm, phương pháp này sẽ đ-ợc nghiên cứu trong chương khuếch đại.

Đối với BJT, điện áp phân cực thuận tiếp giáp Êmitơ (u_{BE}) và dòng điện ngược tiếp giáp Côléc tơ (I_{CB0}) đều phụ thuộc vào nhiệt độ. Dòng điện I_{CB0} phụ thuộc chủ yếu vào nhiệt độ.

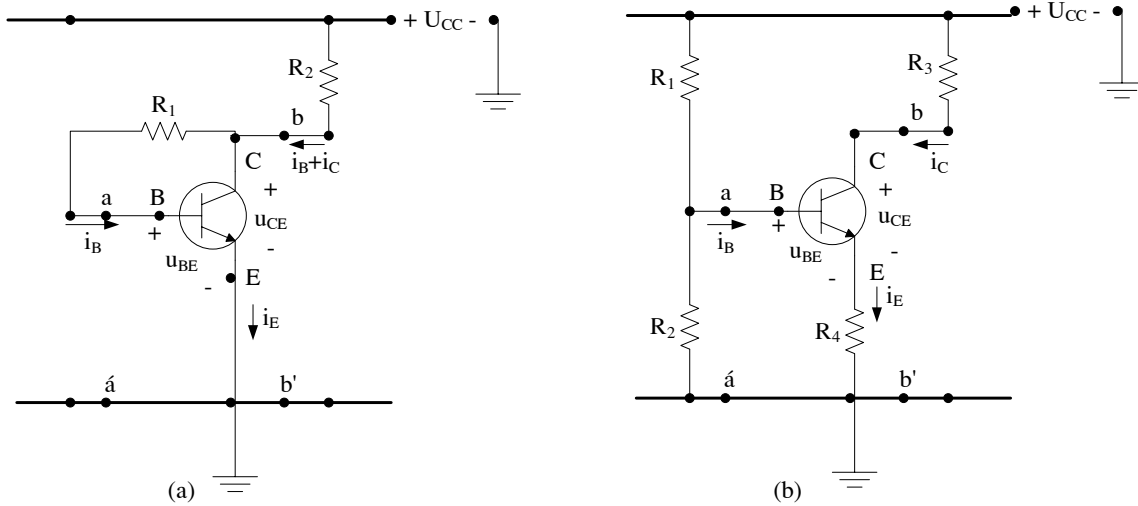


Hình 3-8 ổn định bằng điện trở nhiệt (a) và diốt phân cực ngược (b)

Theo cách thứ nhất, có thể mắc song song với tiếp giáp Êmitơ điện trở nhiệt có hệ số nhiệt âm (hình 3-8a). Khi nhiệt độ tăng, dòng Côléc tơ tăng đồng thời điện trở nhiệt giảm làm giảm u_{BE} , dòng Bazơ giảm kéo theo dòng Côléc tơ cũng giảm theo bù trừ mức tăng dòng này do nhiệt độ.

Hình 3-8b là sơ đồ bù trừ mất ổn định nhiệt gây bởi I_{CB0} bằng dòng điện ngược của diốt I_{D0} (dòng ngược bão hòa I_s). Tất cả các biến đổi của I_{CB0} theo nhiệt độ đều đ-ợc bù trừ bằng các biến đổi của I_{D0} mà ít ảnh hưởng đến các dòng điện khác của BJT.

Ph-ong pháp hồi tiếp âm đ-ợc sử dụng nhiều để ổn định chế độ làm việc cho BJT. Hình 3-9 là các ph-ong án thông dụng trong các mạch điện tử.



Hình 3-9 Ổn định chế độ làm việc của BJT bằng hồi tiếp âm.

Sơ đồ hình 3-9a là ổn định bằng *điện áp song song*. Nguyên lý nh- sau: khi nhiệt độ tăng, dòng i_C tăng, điện áp trên R_2 tăng, $u_{bb'}$ giảm, điện áp thành phần phân áp $u_{aa'} = u_{BE}$ giảm theo dẫn đến i_B giảm làm cho i_C giảm, kéo i_C về giá trị ổn định.

Các giá trị phân cực có thể xác định trực tiếp từ sơ đồ:

$$\begin{aligned} U_{CC} &= U_{R2} + U_{R1} + u_{BE} \\ &= (i_C + i_B)R_2 + i_B R_1 + u_{BE} \\ &= i_B(\beta_F + 1)R_2 + i_B R_1 + u_{BE} \end{aligned}$$

$$i_B = \frac{U_{CC} - u_{BE}}{R_1 + (1 + \beta_F)R_2}$$

Toạ độ điểm Q đầu vào có điện áp BE nh- 3.14: $U_{BEQ} \approx 0,6V$, và:

$$I_{BQ} = \frac{U_{CC} - 0,6V}{R_1 + (1 + \beta_F)R_2} \quad (3.26)$$

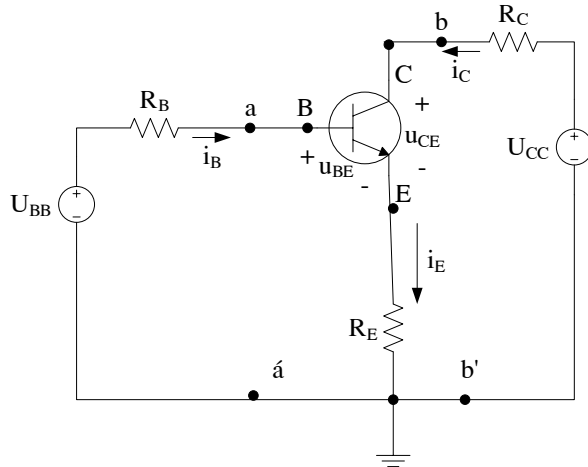
Toạ độ điểm Q đầu ra có dòng côléc tơ nh- 3.18: $I_{CQ} = \beta_F I_{BQ}$, và:

$$U_{CEQ} = U_{CC} - (I_{BQ} + I_{CQ})R_2 \quad (3.27)$$

Ph-ong pháp phân cực có hồi tiếp trên côléc tơ nên còn đ-ợc gọi là *phân cực hồi tiếp (phản hồi) côléc tơ*.

Sơ đồ hình 3-9b là ổn định bằng hồi tiếp *dòng điện nối tiếp*. Nguyên lý nh- sau: khi nhiệt độ tăng, dòng i_C tăng, dòng $i_E = (i_C + i_B)$ tăng làm U_{R4} tăng, điện áp $u_{BE} = (U_{R2} - U_{R4})$ giảm, dẫn đến i_B giảm làm cho i_C giảm, kéo i_C về giá trị ổn định.

Các giá trị phân cực có thể xác định bằng cách quy về sơ đồ t-ơng đ-ơng hình 3-10. Các giá trị t-ơng đ-ơng theo các công thức từ 3.22 đến 2.25 và $R_E = R_4$.



Hình 3-10 Sơ đồ t-ơng đ-ơng mạch hình 3-9b

$$U_{BB} = i_B R_B + u_{BE} + i_E R_E; \quad i_E = (1 + \beta_F) i_B$$

$$i_B = \frac{U_{BB} - u_{BE}}{R_B + (1 + \beta_F) R_E}$$

Toạ độ điểm Q đầu vào có điện áp BE nh- 3.14: $U_{BEQ} \approx 0,6V$, và:

$$I_{BQ} = \frac{U_{BB} - 0,6V}{R_B + (1 + \beta_F) R_E} \quad (3.28)$$

Toạ độ điểm Q đầu ra có dòng côlếtơ nh- 3.18: $I_{CQ} = \beta_F I_{BQ}$, và:

$$U_{CEQ} = U_{CC} - (I_{BQ} + I_{CQ}) R_E - I_{CQ} R_C \quad (3.29)$$

Ph-ơng pháp phân cực có hồi tiếp trên êmitơ nên còn đ-ợc gọi là *phân cực hồi tiếp (phản hồi) êmitơ*.

1.4.4 Các chế độ làm việc của BJT

1. Đặc tính tải

Xét các đặc tuyến tĩnh trong điều kiện giữ một tham số nào đó cố định: đặc tuyến vào khi mắc E chung là quan hệ giữa dòng i_B và u_{BE} ứng với các hằng số u_{CE} , đặc tuyến ra là quan hệ giữa dòng i_C và u_{CE} ứng với các hằng số i_B . Khi BJT làm việc với chế độ có tải, quan hệ dòng và áp theo quy luật đ-ờng tải, các dòng điện và điện áp trên các cực đều thay đổi nên gọi là *chế độ động*.

Phân tích đặc tính tải của BJT trong mạch điện hình 3-11a.

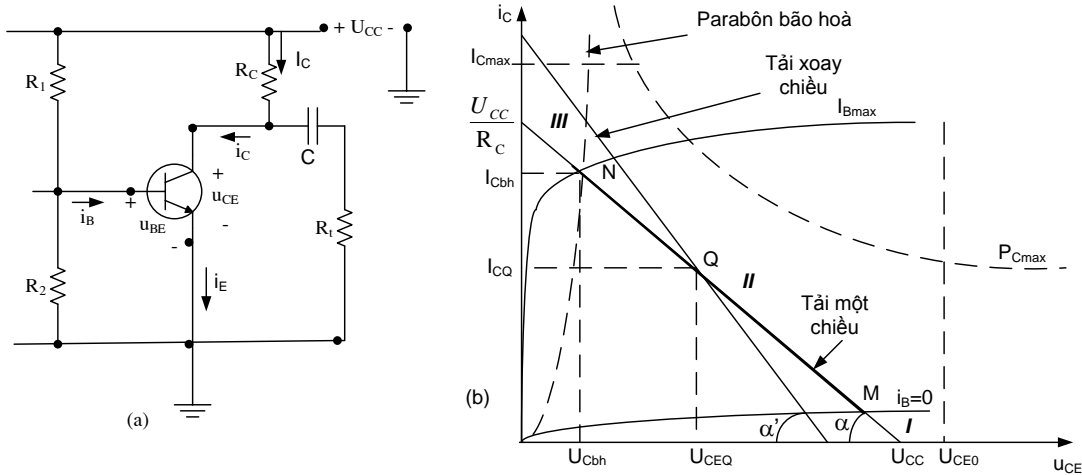
* Tải một chiều

Khi làm việc với nguồn một chiều, tụ điện coi nh- hở mạch, BJT chỉ có một tải duy nhất là R_C , đ-ờng tải theo biểu thức 3.17 tính riêng cho thành phần một chiều với $i_C = I_C$ và $u_{CE} = U_{CE}$ sẽ là:

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} \quad (3.30)$$

Trong đó I_C là dòng một chiều qua R_C và U_{CE} là điện áp một chiều trên CE. Độ dốc của đ-ờng tải một chiều phụ thuộc vào R_C :

$$\alpha = \text{arctg}\left(-\frac{1}{R_C}\right) \quad (3.31)$$



Hình 3-11 Mạch BJT có tải (a) và đặc tính tải của BJT (b)

Đ- ờng tải một chiều có độ dốc $(-1/R_C)$ phụ thuộc tải một chiều: R_C

* *Tải xoay chiều*

Khi làm việc với tín hiệu xoay chiều, tụ điện C coi nh- ngắn mạch. Theo nguyên lý xếp chồng, U_{CC} đối với tín hiệu xoay chiều cũng coi nh- ngắn mạch. Tải xoay chiều bao gồm R_C mắc song song với R_t :

$$R_{txc} = \frac{R_C R_t}{R_C + R_t} \quad (3.32)$$

Đ- ờng tải xoay chiều có độ dốc $(-1/R_{txc})$ phụ thuộc giá trị tải xoay chiều R_{txc} :

$$\alpha' = \text{arctg}\left(-\frac{1}{R_{txc}}\right) \quad (3.33)$$

II. Các chế độ làm việc của BJT

Khi làm việc trong mạch có tải, điểm làm việc của BJT tr- ợt trên đ- ờng tải. Điểm làm việc có thể rơi vào các chế độ sau đây

Chế độ cắt dòng $i_B = 0$, điểm làm việc trong vùng I nằm trên và phía d- ới đ- ờng đặc tuyến tĩnh $i_B = 0$. ở chế độ này các tiếp giáp của BJT hoặc đều không đ- ợc phân cực hoặc phân cực ng- ợc.

Dòng điện $i_B = 0$

Dòng điện i_C có giá trị $I_{CB0}^* \rightarrow 0$ (hoặc bằng 0 khi không phân cực)

Điện áp $u_{CE} \approx U_{CC}$

Trên đ- ờng tải một chiều, điểm biên giới cắt dòng là M.

Chế độ này có dòng điện gần bằng 0 và điện áp gần bằng nguồn t- ờng đ- ờng với trạng thái ngắt của một công tắc điện.

Chế độ tích cực, điểm làm việc trong vùng II. Vùng này đ- ợc giới hạn bởi đặc tuyến tĩnh $i_B = 0$, đ- ờng parabol bão hoà, U_{CE0} , P_{Cmax} , I_{Cmax} .

ở chế độ tích cực, BJT có khả năng khuếch đại tuyến tính nên còn đ- ợc gọi là *chế độ khuếch đại tuyến tính*. Vùng này có dòng điện ít phụ thuộc vào u_{CE} , đặc tuyến gần nh- song song với trục hoành còn gọi là vùng dòng không đổi. Làm việc chế độ tích cực, BJT có tiếp giáp EB (J_E) phân cực thuận, tiếp giáp BC (J_C) phân cực ng- ợc.

Trên đ- ờng tải một chiều, chế độ tích cực là đoạn MN.

Chế độ tích cực th- ờng đ- ợc sử dụng trong các mạch t- ơng tự.

Chế độ bão hoà, vùng III nằm trên và phía trên đ- ờng parabol bão hoà. ở chế độ này các tiếp giáp của BJT đều đ- ợc phân cực thuận.

Dòng điện bazơ: $i_B = I_{Bmax}$

Dòng điện $i_C = \beta_F \cdot I_{Bmax} =$ hằng số

Điện áp $u_{CE} = U_{Cbh} \approx 0$

Trên đ- ờng tải một chiều, điểm biên giới bão hoà là N.

ở chế độ bão hoà, dòng i_C luôn là hằng số và đạt giá trị cực đại khi tăng $i_B > I_{Bmax}$, không điều khiển đ- ợc dòng điện. Chế độ này có dòng điện là cực đại và điện áp gần bằng 0 t- ơng đ- ơng với trạng thái đóng của một công tắc điện.

BJT làm việc ở hai chế độ cắt dòng và bão hoà t- ơng đ- ơng với hai trạng thái ngắt và đóng của một công tắc điện gọi là chế độ khoá. *Chế độ khoá* của BJT là chế độ chuyển từ cắt dòng sang bão hoà và ng- ợc lại. Chế độ này đ- ợc sử dụng trong các mạch xung, số.

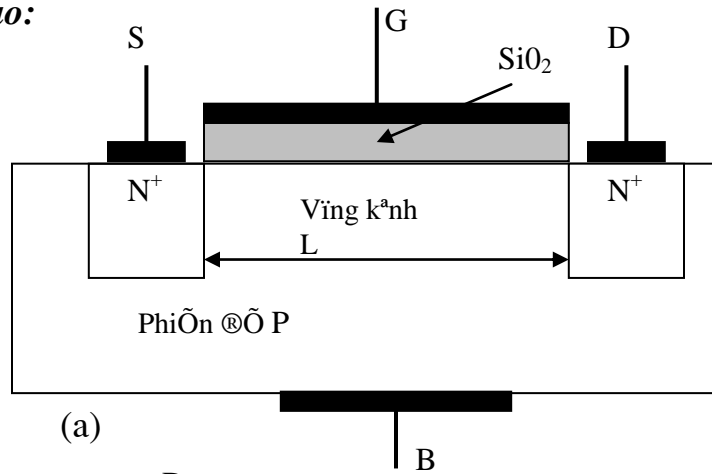
CHƯƠNG 4: TRANSISTOR HIỆU ỨNG TRƯỜNG (FET)

Chương này sẽ nêu cấu tạo, phân tích các hiện tượng vật lý và các quan hệ dòng điện, điện áp xảy ra trong FET (Field Effect Transistor). Cấu trúc FET có kênh bán dẫn loại P hoặc loại N. Dòng điện chạy qua kênh dẫn được điều khiển bằng điện trường thông qua thay đổi độ dẫn điện của kênh. Việc phân tích sẽ tập trung vào FET kênh dẫn loại N, còn kênh dẫn loại P có thể phân tích tương tự chỉ đổi lẫn vị trí P cho N và đổi lẫn vai trò lỗ trống cho điện tử.

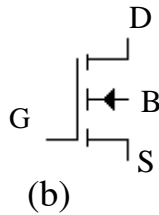
4-1. Tranzito hiệu ứng trường MOSFET kênh dẫn N

4.1.1 MOSFET giàu (Enhancement) kênh dẫn N

I. Cấu tạo:



Ký hiệu:



Hình 4-1 Cấu tạo (a) và ký hiệu (b) MOSFET giàu kênh dẫn N

MOSFET là tranzito hiệu ứng trường FET (Field Effect Transistor) có cực cửa cách điện IG (Insulated Gate) theo công nghệ MOS (Metal Oxide Semiconductor), còn có tên gọi khác là IGFET.

Tranzito được cấu tạo từ một phiến đế pha tạp nhẹ chất bán dẫn loại P. Bằng công nghệ quang khắc và khuếch tán đưa vào hai khối bán dẫn loại N pha tạp cao, gắn với các điện cực nguồn (S-Source) và cực máng (D-Drain), cách nhau một đoạn trong phiến đế gọi là kênh dẫn. Vùng kênh được phủ một lớp điện môi oxit (SiO₂). Lớp kim loại (M-Metal) hoặc bán dẫn đa tinh thể phủ trên lớp

điện môi gắn với *cực cửa* (G-Gate). Lớp điện môi (O-Oxide) đảm bảo cách điện một chiều từ phiến đế bán dẫn (S-Semiconductor) đến cực cửa. Thực tế dòng qua lớp điện môi chỉ khoảng 10^{-15} A hoặc nhỏ hơn.

Các kích thước vật lý quan trọng của MOSFET là độ rộng cực cửa W , độ dài cực cửa L , độ dày lớp ôxít t_{ox} .

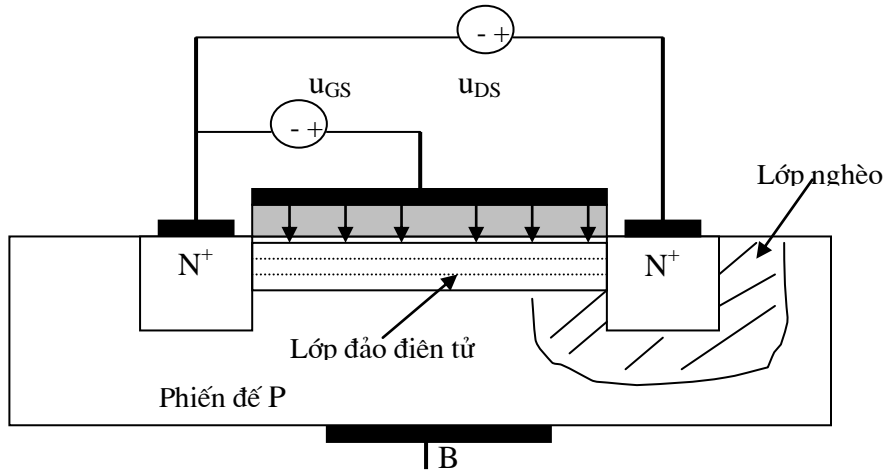
Điện cực gắn với phiến đế là *cực thân* (B-Body), trong các tranzito rời rạc, cực này thường được nối với cực nguồn, MOSFET còn lại ba cực: S, G, D. Thông thường cấu trúc MOSFET là đối xứng nên có thể đổi lẫn S và D mà không làm thay đổi tính chất của FET.

II. MOSFET khi không có điện áp cực cửa u_{GS}

Khi $u_{DS} > 0$, tiếp giáp PN giữa D và phiến đế phân cực ngược, không cho dòng điện chảy qua lớp nghèo giữa D và phiến đế nên dòng cực máng $i_D=0$.

Khi $u_{DS} < 0$ thì tiếp giáp giữa phiến đế và S cũng phân cực ngược, $i_D=0$. Như vậy, khi không có u_{GS} , MOSFET ở chế độ cắt dòng.

III. MOSFET khi có điện áp cực cửa u_{GS}



Hình 4-2 MOSFET khi có điện áp cực cửa u_{GS}

Giả thiết $u_{DS} > 0$ và $u_{GS} > 0$. Do có u_{GS} , hình thành điện trường trong lớp ôxít. Dưới tác động của điện trường này mà các lỗ trống bị đẩy lùi sâu vào phiến đế, để lại các ion âm Axépto không dẫn điện, MOSFET vẫn ở chế độ cắt dòng. Khi tăng u_{GS} đến giá trị ngưỡng U_{TR} , trường lớp ôxít bắt đầu hút các điện tử về phía cực cửa hình thành *lớp đảo điện tử* nối giữa cực S và cực D gọi là *kênh dẫn*. Kênh dẫn bắc cầu qua vùng nghèo giữa D và phiến đế vì vậy có thể cho dòng i_D chảy qua. Độ dẫn điện của kênh dẫn tăng theo u_{GS} vì khi u_{GS} tăng, mật độ các điện tử trong kênh dẫn tăng, kênh dẫn *giàu* các điện tử. Kênh dẫn gồm toàn các điện tử nên gọi là *kênh dẫn loại N*. Do tồn tại kênh dẫn nên xuất hiện lớp nghèo mỏng giữa kênh dẫn và phiến đế hình thành lớp ngăn cách giữa kênh dẫn và phiến đế. Kênh dẫn được hình thành do cảm ứng điện trường nên loại MOSFET này còn được gọi là *loại kênh cảm ứng*.

Mỗi MOSFET có giá trị ng-ỡng xác định, phụ thuộc vào mức pha tạp trong phiên đế và các thông số chế tạo khác. Đối với MOSFET giàu giá trị này khoảng 0,5 đến 3 V.

1. MOSFET khi u_{DS} nhỏ:

Khi u_{DS} còn nhỏ (khoảng 1V) và u_{GS} lớn hơn U_{TR} (có kênh dẫn), mật độ các điện tử trong kênh dẫn là đồng đều, MOSFET hoạt động nh- điện trở có dòng máng tỷ lệ tuyến tính với u_{DS} với hệ số tỷ lệ phụ thuộc vào u_{GS} . Quan hệ này đ- ợc biểu diễn qua đ- ờng liền nét trên đồ thị hình 4-2. Vùng làm việc này đ- ợc gọi là *vùng điện trở*.

Đặc tuyến biểu diễn vùng điện trở theo biểu thức sau:

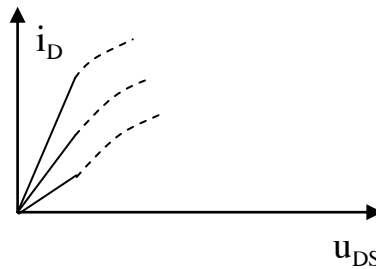
$$i_D = 2K(u_{GS} - U_{TR})u_{DS} \tag{4.1}$$

Điện trở kênh dẫn sẽ là: u_{DS}/i_D và là hàm biến đổi tuyến tính theo u_{GS} .

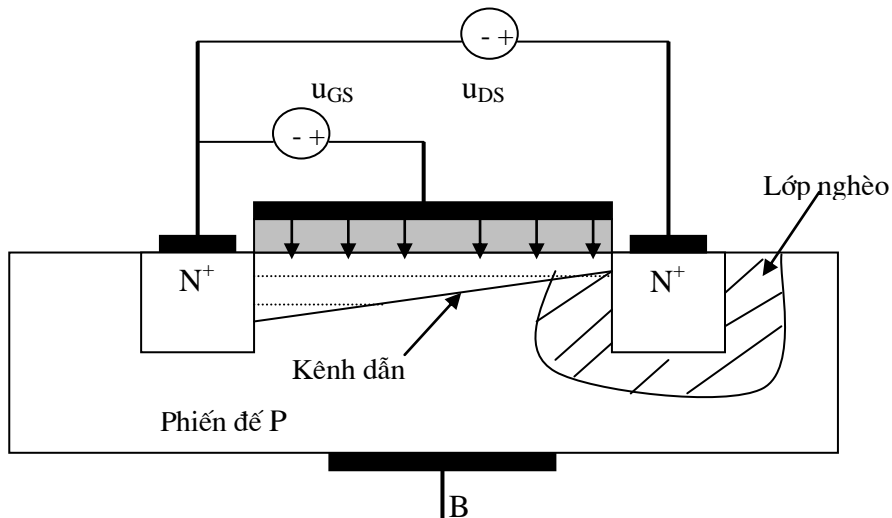
Hằng số K là hệ số dẫn phụ thuộc vào vật liệu và kích th- ớc chế tạo:

$$K = \frac{\mu_e \epsilon_{ox} W}{2t_{ox} L} \text{ (mA/V}^2\text{)}, \tag{4.2}$$

trong đó μ_e là độ linh động điện tử trong chất bán dẫn và ϵ_{ox} là hằng số điện môi của lớp ôxít. W và L là kích th- ớc cực cửa (L là chiều dài dọc theo kênh dẫn và W là chiều rộng cực cửa), t_{ox} là độ dày lớp ôxít.



Hình 4-2 Đặc tuyến V-A khi u_{DS} nhỏ



Hình 4-3 MOSFET khi tăng u_{DS}

Khi u_{DS} tăng, điện áp u_{DS} phân bố dọc theo kênh dẫn: tại cực nguồn S bằng 0 và tại cực D bằng u_{DS} . Chênh lệch điện áp qua lớp ôxít gần D là $u_{GS}-u_{DS}$ nhỏ hơn u_{GS} . Điện trở trong lớp ôxít gần cực máng sẽ yếu nên bề dày kênh dẫn sẽ nhỏ hơn (hình 4-3).

Do tiết diện kênh dẫn giảm dần về phía D nên đặc tuyến V-A trở nên phi tuyến (đường đứt nét trên đồ thị hình 4-2), giống chế độ điện tích không gian của đèn điện tử nên gọi là chế độ Triốt (*vùng triốt*):

$$i_D = K[2(u_{GS} - U_{TR})u_{DS} - u_{DS}^2] \quad (4.3)$$

2. MOSFET khi u_{DS} lớn

Tiếp tục tăng u_{DS} tới giá trị giới hạn mà kênh dẫn có độ dày bằng không (thắt lại) tại cực máng, điện áp sụt trên lớp ôxít dẫn tới U_{TR} .

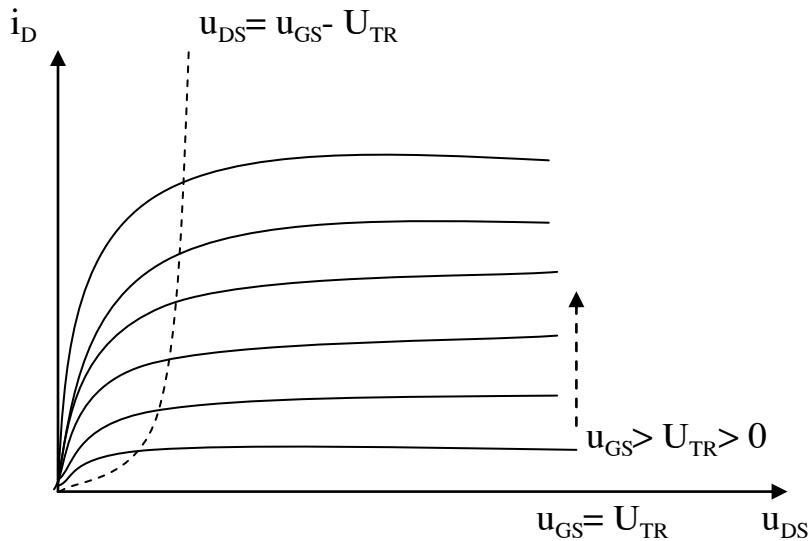
Giá trị giới hạn của u_{DS} đ-ợc tính từ điều kiện:

$$u_{GS} - u_{DS} = U_{TR} \Rightarrow u_{DS} = u_{GS} - U_{TR} \quad (4.4)$$

Khi u_{DS} tăng đến giá trị giới hạn ở trên gọi là ng-ỡng thắt, dòng i_D vẫn tồn tại do lớp đảo điện tử vẫn nối tới cực máng đ-ợc nhờ điện trở phân cực ng-ợc của lớp nghèo. Biên độ dòng qua kênh dẫn đ-ợc xác định duy nhất qua điện áp sụt trên kênh dẫn. Dòng điện này có giá trị không đổi khi u_{DS} v-ợt quá giá trị ng-ỡng thắt ($u_{GS} - U_{TR}$). Vùng làm việc này gọi là *vùng dòng không đổi*:

$$i_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2 \quad (4.5)$$

Nh- vậy đặc tuyến V-A biểu thị quan hệ giữa dòng i_D và điện áp u_{DS} của MOSFET giàu kênh dẫn N nh- trên hình 4-4.



Hình 4-4 Đặc tuyến V-A cực máng của MOSFET giàu kênh dẫn N

Đặc tuyến gồm ba vùng:

Vùng cắt dòng khi $u_{GS} < U_{TR}$ (ch- a có kênh dẫn):

$$i_D = 0$$

Vùng Triệt khi $u_{GS} > U_{TR}$ (có kênh dẫn) và $0 < u_{DS} < (u_{GS} - U_{TR})$:

$$i_D = K[2(u_{GS} - U_{TR})u_{DS} - u_{DS}^2]$$

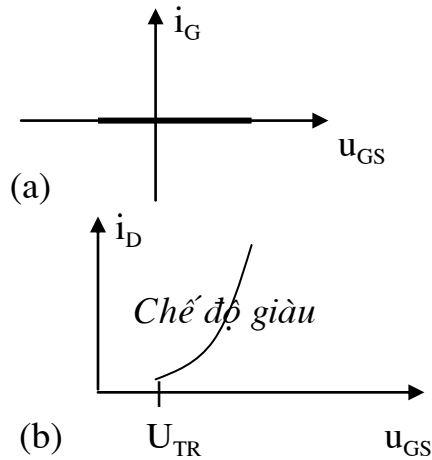
Vùng dòng không đổi $u_{GS} > U_{TR}$ và $u_{DS} \geq (u_{GS} - U_{TR})$:

$$i_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2$$

Đ-ờng biên giới giữa vùng triệt và vùng dòng không đổi là đ-ờng Parabol: $i_D = Ku_{DS}^2$, $u_{DS} = u_{GS} - U_{TR}$. Trong vùng triệt i_D phụ thuộc cả vào u_{GS} và u_{DS} , vùng dòng không đổi dòng điện chỉ phụ thuộc vào $(u_{GS} - U_{TR})$

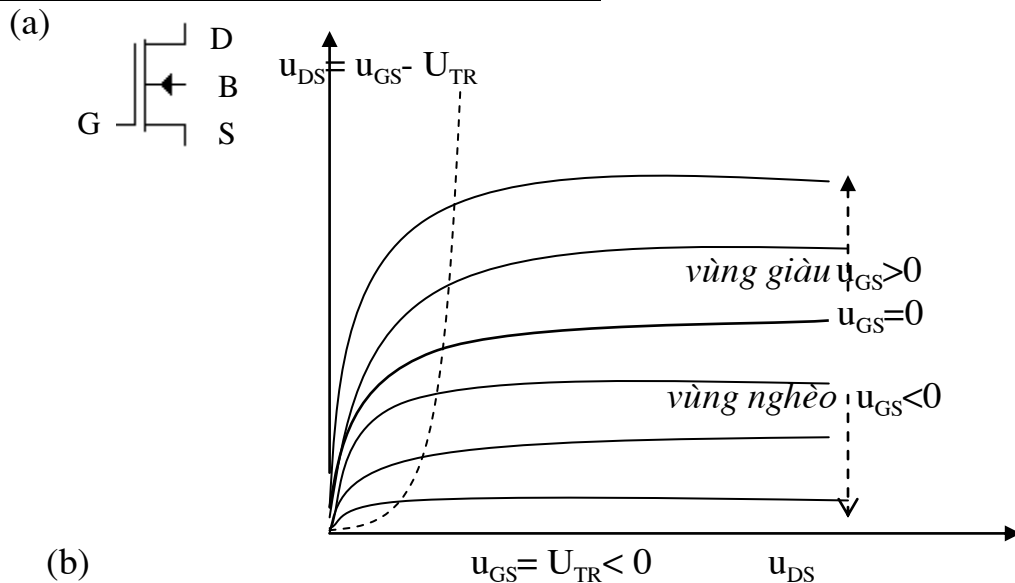
Đặc tuyến V-A giữa dòng i_G và u_{GS} trên hình 4-5a. Dòng điện cực cửa qua lớp điện môi SiO_2 luôn bằng không với mọi giá trị của u_{GS} .

Đặc tuyến truyền dẫn giữa i_D và u_{GS} trên hình 4-5b. Dòng điện i_D chỉ xuất hiện khi $u_{GS} > U_{TR}$.



Hình 4-5 Đặc tuyến V-A cực cửa (a) và đặc tuyến truyền dẫn (b) của MOSFET giàu kênh dẫn N

4.1.2. MOSFET nghèo (Depletion) kênh dẫn N



Hình 4-6 Ký hiệu (a) và đặc tính V-A cực máng (b)
của MOSFET nghèo kênh dẫn N

MOSFET kênh dẫn N có thể làm việc ở chế độ nghèo khi u_{GS} âm gọi là MOSFET nghèo kênh dẫn N. Bằng cách đ- a vào một lớp các ion d- ơng Đônô đặt giữa lớp điện môi và phiến đế P, lớp ion này thu hút các điện tử trong phiến đế hình thành kênh dẫn. Kênh dẫn còn có thể là khối bán dẫn N đ- a vào giữa lớp điện môi và phiến đế P. MOSFET nghèo tồn tại kênh dẫn ngay cả khi ch- a có u_{GS} nên còn đ- ợc gọi là MOSFET có *kênh đặt sẵn*.

MOSFET nghèo kênh dẫn N đ- ợc ký hiệu nh- hình 4-6a. MOSFET nghèo kênh dẫn N có điện áp ng- ỡng U_{TR} âm. Đặc tuyến V-A giữa dòng máng và điện áp máng - nguồn trên hình 4-6b. Đặc tuyến cũng gồm ba vùng:

Vùng cắt dòng khi $u_{GS} < U_{TR}$ (u_{GS} âm hơn U_{TR})

$$i_D = 0$$

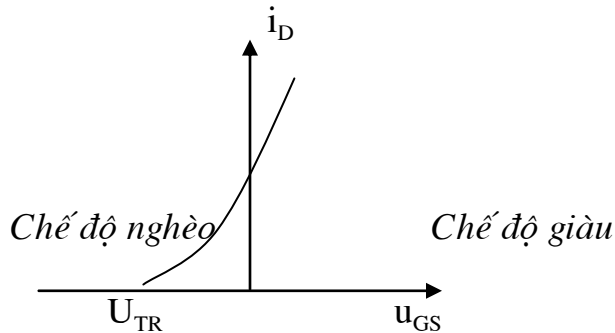
Vùng Triôt khi $u_{GS} > U_{TR}$ (u_{GS} d- ơng hơn U_{TR}) và $0 < u_{DS} < (u_{GS} - U_{TR})$:

$$i_D = K(2(u_{GS} - U_{TR})u_{DS} - u_{DS}^2)$$

Vùng dòng không đổi khi $u_{GS} > U_{TR}$ và $u_{DS} \geq (u_{GS} - U_{TR})$:

$$i_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2$$

Khi $u_{GS} > 0$ và d- ơng lên, l- ợng các điện tử trong kênh dẫn tăng, dòng i_D tăng, MOSFET làm việc ở chế độ giàu. Khi $u_{GS} < 0$ và âm đi, l- ợng các điện tử kênh dẫn giảm, i_D giảm, MOSFET làm việc ở chế độ nghèo. Nh- vậy MOSFET nghèo có thể làm việc cả ở chế độ giàu và nghèo. Trên đặc tuyến truyền dẫn giữa dòng i_D và u_{DS} , dòng i_D xuất hiện từ U_{TR} có giá trị âm (hình 4-7).



Hình 4-7 Đặc tuyến truyền dẫn MOSFET nghèo kênh dẫn N

Đặc tuyến i_G và u_{GS} cũng giống nh- MOSFET giàu: dòng i_G luôn bằng không với mọi giá trị u_{GS} .

4.2. Tranzito hiệu ứng tr- ờng loại JFET kênh dẫn n

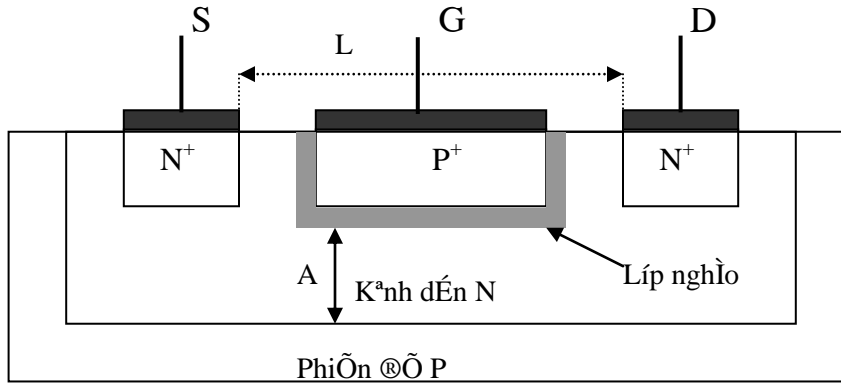
4.2.1 Cấu tạo

JFET (Junction FET) là tranzito hiệu ứng tr- ờng có tiếp giáp PN. Cấu tạo và ký hiệu của JFET kênh dẫn N trên hình 4-8.

Từ phiên đế pha tạp nhẹ loại P, bằng công nghệ quang khắc và khuếch tán, lần lượt đưa vào các khối bán dẫn N làm kênh dẫn và 3 khối bán dẫn N, P, N pha tạp mạnh để gắn vào các cực S, G, D.

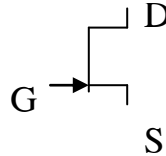
Tiếp giáp PN giữa kênh dẫn và cực cửa hình thành lớp nghèo. Bề rộng lớp nghèo có thể thay đổi được nhờ điện trường phân cực ngược giữa kênh dẫn và cực cửa, do vậy có thể thay đổi được tiết diện A của kênh dẫn.

Điện trở của kênh dẫn được xác định từ điện trở suất ρ của chất bán dẫn loại N, chiều dài hiệu dụng kênh L, tiết diện hiệu dụng A. Dòng điện i_D có thể điều khiển được bằng cách thay đổi điện trở kênh dẫn.



(a)

Ký hiệu:

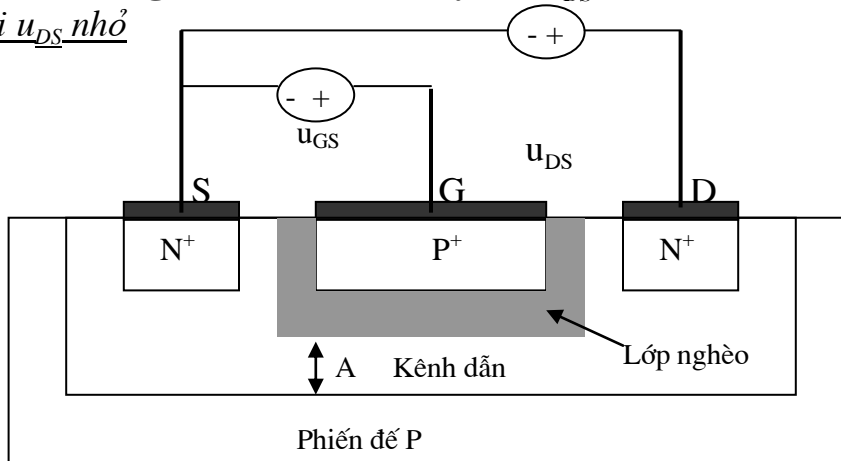


(b)

Hình 4-8 Cấu tạo (a) và ký hiệu (b) của JFET kênh dẫn N

4.2.2 Hoạt động của JFET khi thay đổi u_{DS}

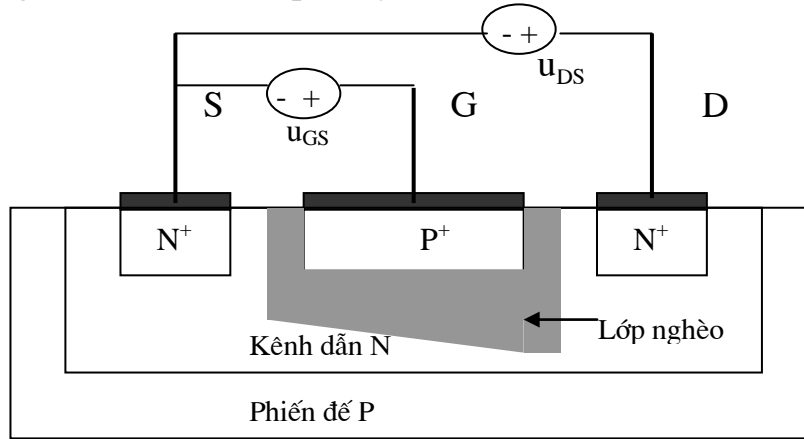
I. Khi u_{DS} nhỏ



Hình 4-9 JFET khi u_{DS} còn nhỏ

Điện áp u_{GS} âm tạo ra phân cực ng-ợc giữa cực cửa và phiến đế làm cho độ rộng lớp nghèo tăng, tiết diện kênh dẫn A nhỏ lại. Khi u_{GS} âm đạt đến giá trị ngưỡng U_{TR} , lớp nghèo mở rộng hoàn toàn kênh dẫn, điện trở kênh dẫn tiến tới vô cùng, $i_D = 0$, JFET rơi vào *chế độ cắt dòng*.

Khi $u_{GS} > U_{TR}$ (u_{GS} d-ơng hơn U_{TR}), u_{DS} còn nhỏ, độ rộng lớp nghèo đồng đều từ S đến D, quan hệ dòng i_D và u_{DS} là tuyến tính, JFET làm việc ở *chế độ điện trở*. Khi u_{DS} tăng, điện áp phân bố dọc theo kênh dẫn tăng dần từ S đến D, phân cực ng-ợc tăng, độ rộng lớp nghèo mở rộng, kênh dẫn có tiết diện nhỏ dần, quan hệ dòng i_D và u_{DS} trở nên phi tuyến, JFET làm việc ở *chế độ triôt*.



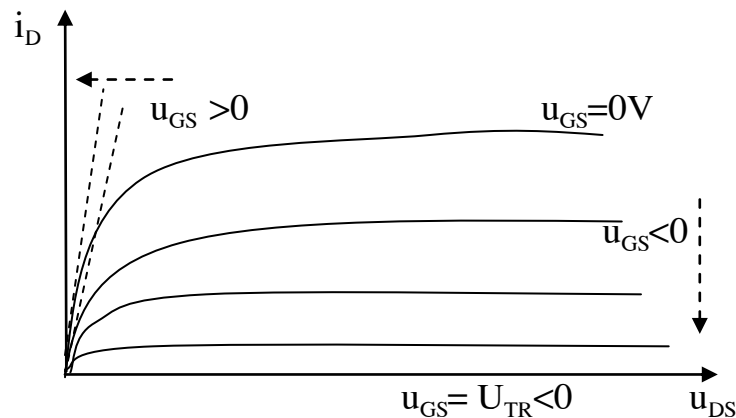
Hình 4-10 JFET khi u_{DS} tăng

II. Khi u_{DS} lớn.

Khi u_{DS} tăng đến khi tiết diện kênh dẫn tại D tiến tới 0, kênh dẫn bị thắt lại, các điện tử trôi qua vùng thắt với tốc độ không đổi, dòng i_D qua kênh dẫn sẽ không đổi, JFET làm việc ở *chế độ dòng không đổi*.

4.2.3. Đặc tuyến V-A của JFET

Đặc tuyến V-A của JFET biểu diễn quan hệ giữa i_D và u_{DS} (hình 4-11) gồm 3 vùng nh- MOSFET:



Hình 4-11 Đặc tuyến V-A cực máng của JFET

Vùng cắt dòng khi $u_{GS} < U_{TR}$ (u_{GS} âm hơn U_{TR}):

$$i_D = 0$$

Vùng triôt khi $u_{GS} > U_{TR}$ (u_{GS} d-ong hơn U_{TR}) và $0 < u_{DS} < (u_{GS} - U_{TR})$:

$$i_D = K[2(u_{GS} - U_{TR})u_{DS} - u_{DS}^2]$$

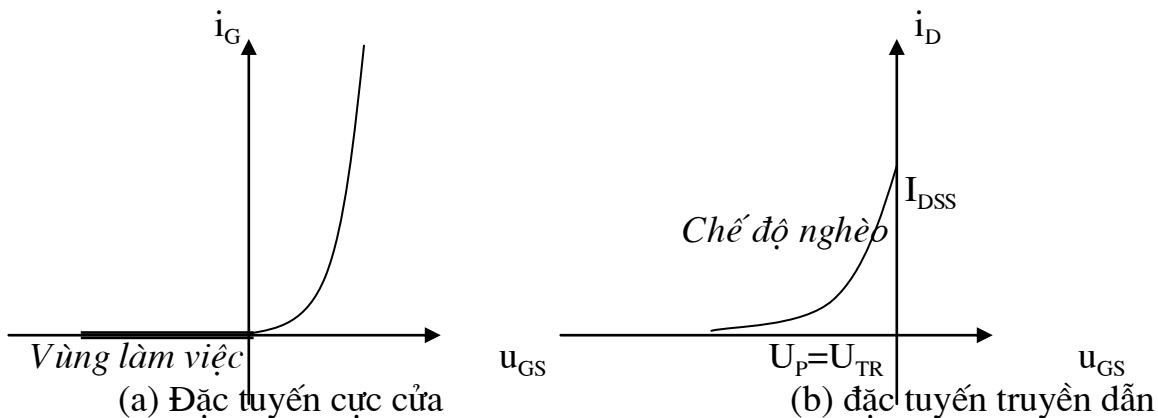
Vùng dòng không đổi khi $u_{GS} > U_{TR}$ và $u_{DS} \geq (u_{GS} - U_{TR})$:

$$i_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2$$

Hệ số K đối với JFET đ-ợc tính theo công thức sau:

$$K = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} = \text{hằng}, U_P = U_{TR}, i_D = I_{DSS} = K \cdot U_P^2 \text{ khi } u_{GS} = 0 \quad (4.6)$$

JFET chỉ hoạt động với u_{GS} âm, khi u_{GS} d-ong tiếp giáp PN giữa cực cửa và kênh dẫn phân cực thuận, dòng i_G nh- điôt phân cực thuận, u_{GS} sẽ không điều khiển đ-ợc dòng qua kênh nữa. Đặc tuyến V-A giữa i_G và u_{GS} nh- trên hình 4-12a: vùng làm việc của JFET là vùng GS phân cực ng-ợc, $i_G = 0$.



Hình 4-12 Đặc tuyến V-A cực cửa của JFET.

Đặc tuyến truyền dẫn của JFET (hình 4-12b) cắt trục i_D tại $i_D = I_{DSS}$ khi $u_{GS} = 0$. Vùng làm việc là chế độ nghèo ứng với $u_{GS} < 0$

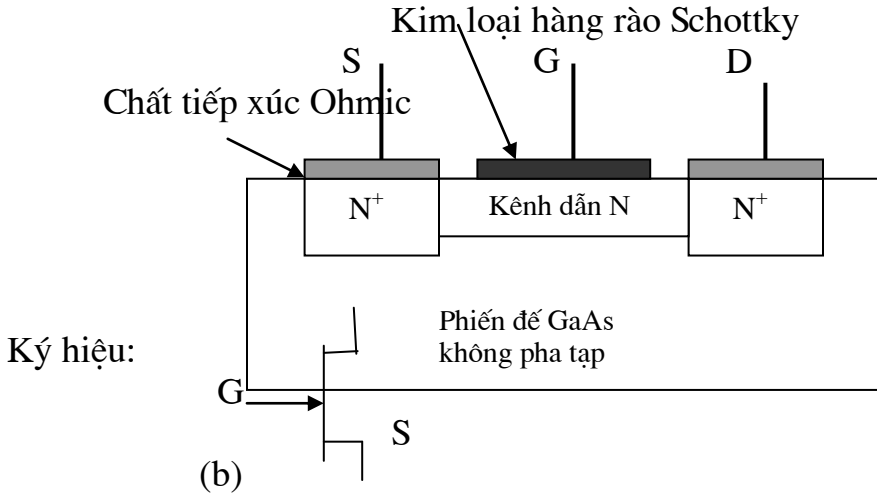
4-3 tranzito hiệu ứng tr-ờng loại GaAsMESFET

MESFET (Metal Semiconductor FET) là tranzito hiệu ứng tr-ờng có cực cửa kim loại và kênh bán dẫn.

GaAs là chất bán dẫn hợp chất hai nguyên tố gallium (nhóm III) và arsenic (nhóm V) có đặc tính giống silicon nh- ng có độ linh động điện tử cao gấp 5 lần so với silicon vì vậy mà tốc độ chuyển trạng thái từ cắt dòng sang bão hoà rất nhanh. Kênh dẫn N của GaAsMESFET đ-ợc làm từ Gallium Arsenide. GaAsMESFET đ-ợc ứng dụng nhiều trong các mạch khuếch đại tần số cao, các

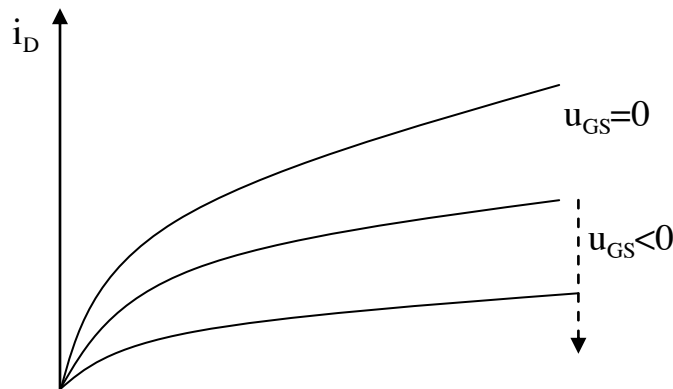
mạch logic tốc độ cao. Độ linh động các lỗ trống trong GaAs thấp nên loại MESFET kênh dẫn P lại ít đ-ợc sử dụng.

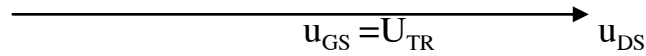
Cấu tạo và ký hiệu của GaAsMESFET trên hình 4-13. Cực nguồn S và cực máng D đ-ợc nối với các khối bán dẫn loại N pha tạp mạnh và nối với nhau qua kênh dẫn N, trên phiến đế GaAs không pha tạp có độ dẫn điện rất thấp, hình thành lớp nghèo để đảm bảo cách điện giữa các cực, giảm điện dung ký sinh để nâng cao tốc độ cho GaAsMESFET. Lớp kim loại gắn với cực của th-ờng là titanium hoặc nhôm. Tiếp giáp kim loại- bán dẫn hình thành hàng rào Schottky, làm việc nh- tiếp giáp PN trong JFET.



Hình 4-13 Cấu tạo (a) và ký hiệu (b) của GaAsMESFET

Đặc tuyến V-A gần giống nh- JFET có điện áp ng-ỡng U_{TR} âm. Điểm khác so với JFET là: trong GaAsMESFET có bão hoà tốc độ xảy ra hầu nh- trên toàn bộ kênh dẫn còn trong JFET chỉ xảy ra trên đoạn thất của kênh. Vì bão hoà tốc độ ở cả mức điện tr-ờng thấp trong GaAs nên độ linh động các điện tử trong GaAsMESFET cao. Một điểm khác nữa của GaAsMESFET là có kênh dẫn ngắn nên trong vùng dòng không đổi i_D vẫn phụ thuộc nhỏ vào u_{DS} , đ-ờng đặc tuyến V-A dốc hơn (hình 4-14).





Hình 4-14 Đặc tuyến V-A cực máng của GaAsMESFET

Đặc tuyến cũng gồm ba vùng nh- JFET:

Vùng cắt dòng $u_{GS} < U_{TR}$ (u_{GS} âm hơn U_{TR})

$$i_D = 0$$

Vùng Triệt $u_{GS} > U_{TR}$ (u_{GS} d-ơng hơn U_{TR}), $u_{DS} < (u_{GS} - U_{TR})$

$$i_D = K[2(u_{GS} - U_{TR})u_{DS} - u_{DS}^2](1 + \lambda u_{DS}) \quad (4.7)$$

Vùng dòng không đổi khi $u_{GS} > U_{TR}$ và $u_{DS} \geq (u_{GS} - U_{TR})$:

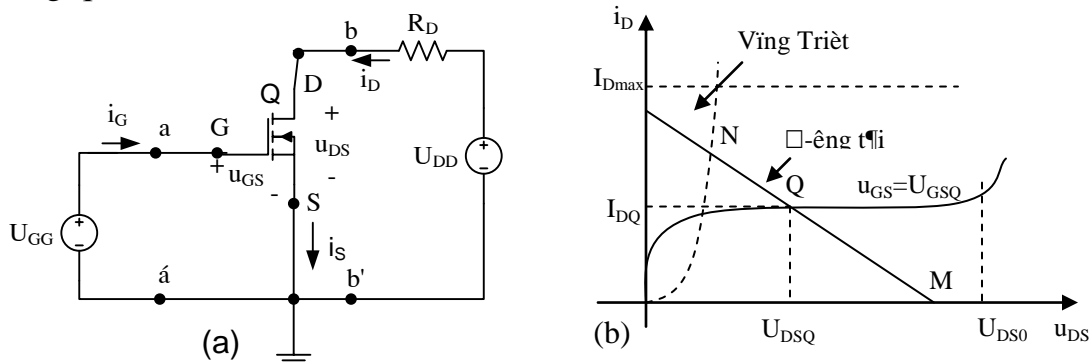
$$i_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2(1 + \lambda u_{DS}), \quad (4.8)$$

λ gọi là hệ số điều chế kênh dẫn có trị số 0,05 đến 0,2 V^{-1} . Điện áp ng-ỡng U_{TR} khoảng - 0,5 đến - 2,5V

4-4 Phân cực cho FET

Phân cực cho FET, chọn điểm làm việc ở giữa vùng dòng không đổi. Các giá trị tới hạn cần l- u ý là điểm cắt dòng $i_D = 0$, vùng triệt, dòng cực máng cực đại I_{Dmax} và điện áp cho phép cực đại trên DS: U_{DS0} .

Giá trị điện áp phân cực đầu vào U_{GG} đ-ợc chọn sao cho tín hiệu ra đối xứng có biên độ cực đại còn nằm trong vùng dòng không đổi. Sơ đồ phân cực tổng quát cho FET nh- trên hình 4-15.



Hình 4-15 Phân cực cho MOSFET

Mạch gồm hai nguồn U_{GG} cung cấp điện áp một chiều cho cực cửa và nguồn U_{DD} cung cấp điện áp cho kênh dẫn nguồn-máng.

Điểm làm việc $Q(I_{DQ}, U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})$ luôn có $I_{GQ} = 0$ và U_{GSQ} đ-ợc xác định tùy theo cấu trúc mạch phân cực đầu vào. Các giá trị I_{DQ}, U_{DSQ} đ-ợc xác định theo cấu trúc mạch phân cực đầu ra. Trên đặc tuyến ra (đặc tuyến cực máng), điểm làm việc là giao điểm đ-ờng tải với đ-ờng đặc tuyến tĩnh ứng với $u_{GS} = U_{GSQ}$ (hình 4-15b).

Đ-ờng tải theo sơ đồ hình 4-15:

$$i_D = \frac{U_{DD} - u_{DS}}{R_D} \quad (4.9)$$

Điểm làm việc Q đ- ợc chọn trong khoảng giữa đoạn MN của đ- ờng tải.

Thực tế có thể tạo ra hai nguồn U_{GG} và U_{DD} từ một nguồn theo các sơ đồ thông dụng d- ới đây.

1. Phân cực bằng phân áp (MOSFET giàu)

Điểm làm việc Q ($I_{GQ}, U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ}$), với: $I_G=0$, nên:

$$I_{GQ}=0 \quad (4.10)$$

Theo sơ đồ hình 4-16, điện áp GS luôn bằng điện áp phân áp trên R_B :

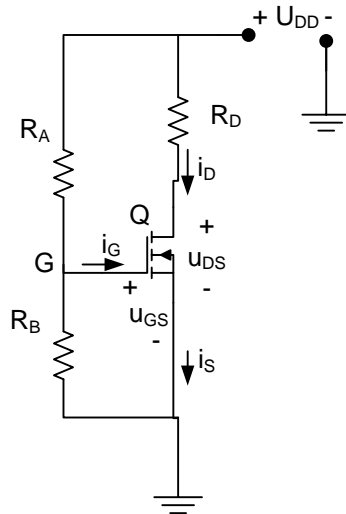
$$U_{GSQ} = u_{GS} = \frac{R_B}{R_A + R_B} \cdot U_{DD} \quad (4.11)$$

FET làm việc ở vùng dòng không đổi: $i_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2$

$$I_{DQ} = K(U_{GSQ} - U_{TR})^2 \quad (4.12)$$

Theo sơ đồ, ph- ơng trình đ- ờng tải: $u_{DS} = U_{DD} - i_D \cdot R_D$

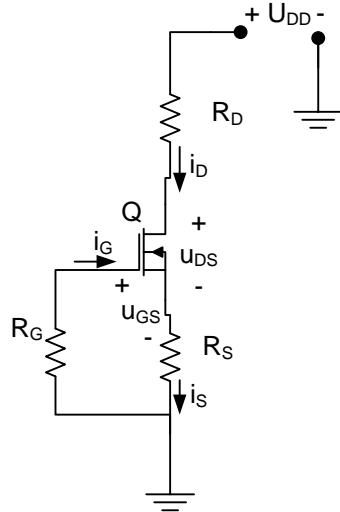
$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} \cdot R_D \quad (4.13)$$



Hình 4-16 Phân cực bằng phân áp

Trong sơ đồ, điện áp u_{GS} luôn d- ơng nên mạch này chỉ áp dụng cho MOSFET giàu kênh dẫn N.

2. Tự phân cực (MOSFET nghèo và JFET)



Hình 4-17 Tự phân cực

R_G trong sơ đồ hình 4-17 có giá trị bất kỳ do dòng $i_G=0$ nên điện áp trên nó luôn bằng không, không ảnh hưởng đến các giá trị phân cực. Thường R_G có giá trị lớn hàng $M\Omega$ đến hàng chục $M\Omega$. Không có dòng điện cực cửa nên theo 4.10: $I_{GQ}=0$

Dòng cực máng và cực nguồn nhau: $i_D=i_S$. Điện áp trên GS bằng điện áp trên R_S giữa đất và cực nguồn vì không có điện áp trên R_G :

$$U_{GSQ} = -i_S R_S = -I_{DQ} R_S \quad (4.14)$$

Dòng điện cực máng làm việc ở chế độ dòng không đổi:

$$I_{DQ} = K(U_{GSQ} - U_{TR})^2 = K(I_{DQ} R_S + U_{TR})^2 \quad (4.15)$$

I_{DQ} là nghiệm của phương trình bậc hai. Dòng điện cực máng chỉ có ý nghĩa khi có kênh dẫn, chọn nghiệm thỏa mãn điều kiện:

$$U_{GSQ} > U_{TR}, \quad (4.16)$$

điện áp cực cửa dương hơn giá trị ngưỡng.

Điện áp DS được tính theo đường tải cửa ra:

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ}(R_D + R_S) \quad (4.17)$$

Trong trường hợp $R_S=0$:

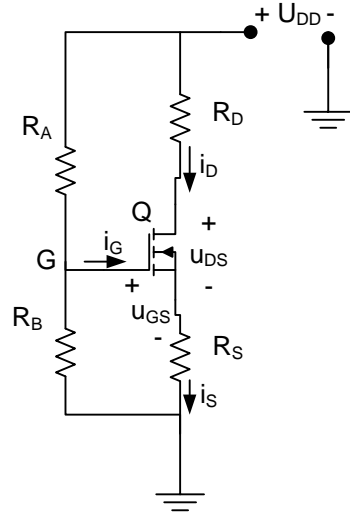
$$I_{GQ}=0, U_{GSQ}=0$$

$$I_{DQ} = K(-U_{TR})^2$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} \cdot R_D$$

Điện áp u_{GS} luôn âm nên mạch này chỉ áp dụng cho JFET và MOSFET nghèo kênh dẫn N.

3. Phân cực hồi tiếp



Hình 4-18 Phân cực hồi tiếp

Nh- BJT, phân cực cho FET kết hợp ổn định điểm làm việc. Phương pháp phân cực hồi tiếp cơ bản bằng điện áp song song hoặc dòng điện nối tiếp. Hình 4-18 là phân cực hồi tiếp dòng điện nối tiếp, với:

$$U_G = \frac{R_B}{R_A + R_B} \cdot U_{DD}, \quad (4.18)$$

$$u_{GS} = U_G - i_S R_S, \quad i_S = i_D \quad (4.19)$$

$$U_{GSQ} = U_G - I_{DQ} R_S \quad (4.20)$$

Dòng điện cực cửa bằng không: $I_{GQ} = 0$

FET làm việc ở vùng dòng không đổi: $I_D = K(u_{GS} - U_{TR})^2$, nh- 4.12:

$$I_{DQ} = K(U_{GSQ} - U_{TR})^2$$

Thay giá trị U_{GSQ} :

$$I_{DQ} = K[(U_G - U_{TR}) - I_{DQ} \cdot R_S]^2 \quad (4.21)$$

Giải phương trình bậc hai:

$$I_{DQ}^2 \cdot R_S^2 - I_{DQ} [1/K + 2 R_S (U_G - U_{TR})] + (U_G - U_{TR})^2 = 0, \quad (4.22)$$

tính được I_{DQ} , chọn nghiệm thỏa mãn: U_{GSQ} dương hơn U_{TR} : $U_{GSQ} > U_{TR}$.

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_S)$$

Trường hợp R_S lớn: $R_S (U_G - U_{TR}) \gg 1/K$ thì có thể tính gần đúng:

$$I_{DQ}^2 \cdot R_S^2 - 2 I_{DQ} R_S (U_G - U_{TR}) + (U_G - U_{TR})^2 = 0$$

$$I_{DQ} = (U_G - U_{TR}) / R_S$$

Khi $R_S = 0$ thì:

$$I_{DQ} = K(U_G - U_{TR})^2$$

Điện áp u_{GS} có thể âm hoặc dương tùy thuộc giá trị điện áp U_G nên phương pháp này có thể áp dụng cho tất cả các loại FET.

So với BJT, FET có một số đặc tính khác biệt sau:

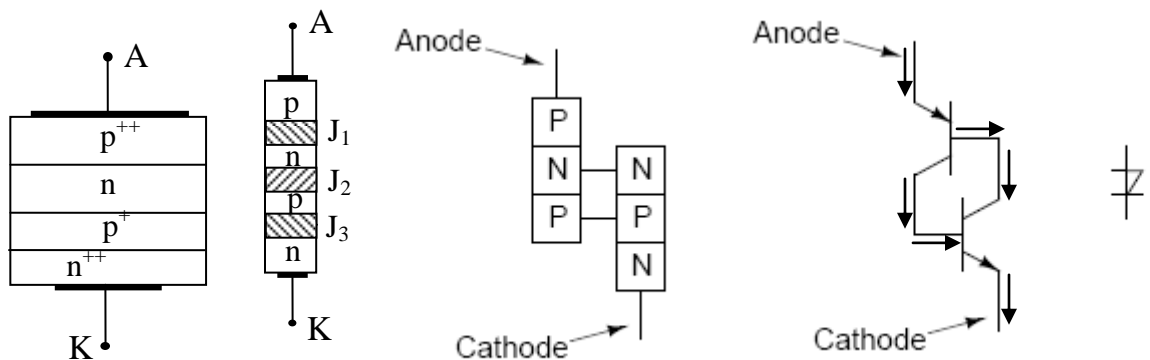
1. FET là cấu kiện điều khiển bằng điện áp, BJT điều khiển bằng dòng điện. FET thích hợp với những nguồn tín hiệu chỉ cung cấp dòng rất nhỏ, BJT thích hợp với nguồn tín hiệu cung cấp dòng lớn.
2. FET dẫn điện chỉ nhờ các phân tử mang điện đa số, các phân tử dẫn điện trong BJT gồm cả các phân tử thiểu số phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và các yếu tố năng lượng bên ngoài nên FET làm việc ổn định hơn ở các môi trường khác nhau.
3. Hệ số tạp âm của FET nhỏ hơn BJT (do không có tạp âm tái hợp giữa các phân tử mang điện trái dấu) nên FET rất thích hợp cho các tầng đầu vào tín hiệu nhỏ, đặc biệt với các thiết bị yêu cầu tạp âm nhỏ.
4. Cấu trúc FET đối xứng, các cực D và S trong FET giống nhau, nên có thể đổi lẫn được cực D cho S. BJT có cực E hoàn toàn khác cực C.
5. Do dòng cực cửa cách điện thực tế rất nhỏ nên công suất điều khiển cực cửa đối với FET rất nhỏ, có thể sử dụng được trong các mạch công suất nhỏ, rất thích hợp cho chế tạo các mạch tích hợp (IC). Hơn nữa, trở kháng vào của FET rất lớn nên có thể thích ứng với nhiều loại nguồn tín hiệu.

4.5. Thyristor

4.5.1. Diode Shockley

a. Cấu tạo, ký hiệu

Diode Shockley là một linh kiện bán dẫn có cấu trúc gồm 4 lớp bán dẫn p-n-p-n xen kẽ với nhau, kết hợp với 2 điện cực: Cực Anode (A) và cực Cathode (K). Diode Shockley hoạt động như một chuyển mạch “*on_off*” và sẽ tồn tại ở một trạng thái sau mỗi lần được kích mở hoặc ngắt.



b. Nguyên lý hoạt động

▪ $U_{AK} < 0$: Khi $|U_{AK}|$ nhỏ, tiếp giáp J_1 và J_3 được phân cực ngược, khi đó dòng qua diode Shockley là dòng rò ngược $I_D \approx 0$, miền đặc tuyến ứng với điều kiện này được gọi là “*miền chặn ngược*”. Nếu U_{AK} tăng đến một giá trị điện áp “đánh thủng ngược” thì tiếp giáp J_1 và J_3 lần lượt bị đánh thủng, dòng qua diode tăng mạnh.

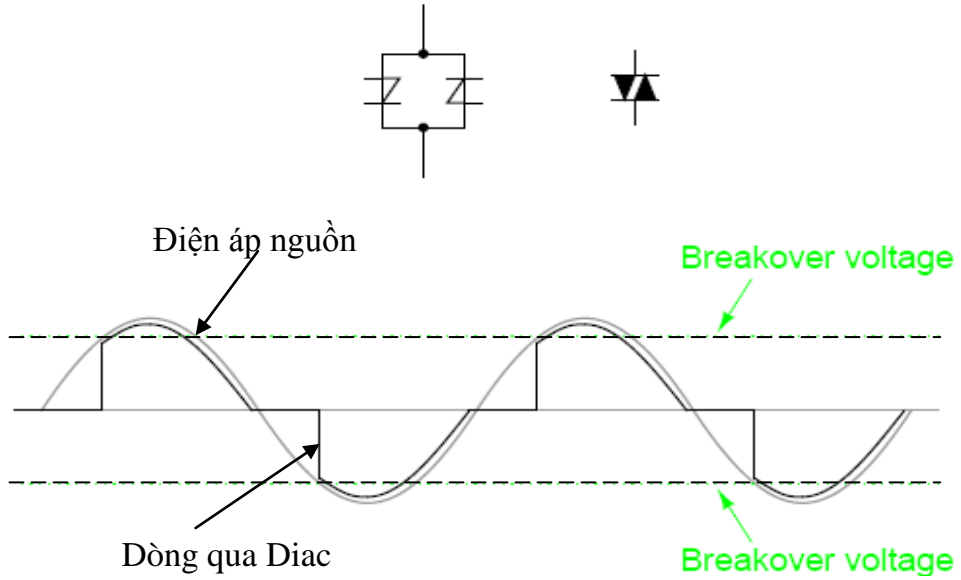
▪ $U_{AK} \geq 0$: Tiếp giáp J_2 được phân cực ngược nên dòng qua diode Shockley là dòng ngược bão hòa $I_D \approx 0$, cặp Transistor ở chế độ ngắt, miền đặc tuyến tương ứng được gọi là “*miền chặn thuận*”. Tăng điện áp U_{AK} đến giá trị đủ lớn để đánh thủng tiếp giáp J_2 , khi đó diode bắt đầu “thông” (*on*), giá trị U_{AK} tại điểm đó được gọi là điện áp “đánh thủng thuận” (*Breakover Voltage*). Tuy nhiên trong cấu trúc của diode Shockley có sự hồi tiếp dương nên cường độ dòng qua diode Shockley tăng mạnh và đưa cặp Transistor vào trạng thái bão hòa. Khi đó diode Shockley tương đương với một điện trở thuần có giá trị nhỏ do đó điện áp U_{AK} giảm đột ngột. Nếu tiếp tục tăng điện áp U_{AK} khi đó diode Shockley sẽ hoạt động như một điện trở thuần. Miền đặc tuyến khi đó được gọi là “*miền dẫn thuận*”. Để đưa diode Shockley trở về trạng thái ngắt phải giảm điện áp U_{AK} sao cho dòng qua diode I_D nhỏ hơn dòng duy trì I_H .

Ngoài ra, có thể kích mở diode Shockley bởi một xung có độ biến thiên du/dt đủ lớn. Do các điện dung tiếp giáp ký sinh trong mỗi Transistor chống lại sự thay đổi điện áp gây nên dòng điện đủ lớn để kích mở cho diode Shockley.

Do diode Shockley chỉ tồn tại tại một trạng thái sau mỗi lần được kích mở hoặc ngắt nên có thể coi diode Shockley như một “cái chốt” (*latch*).

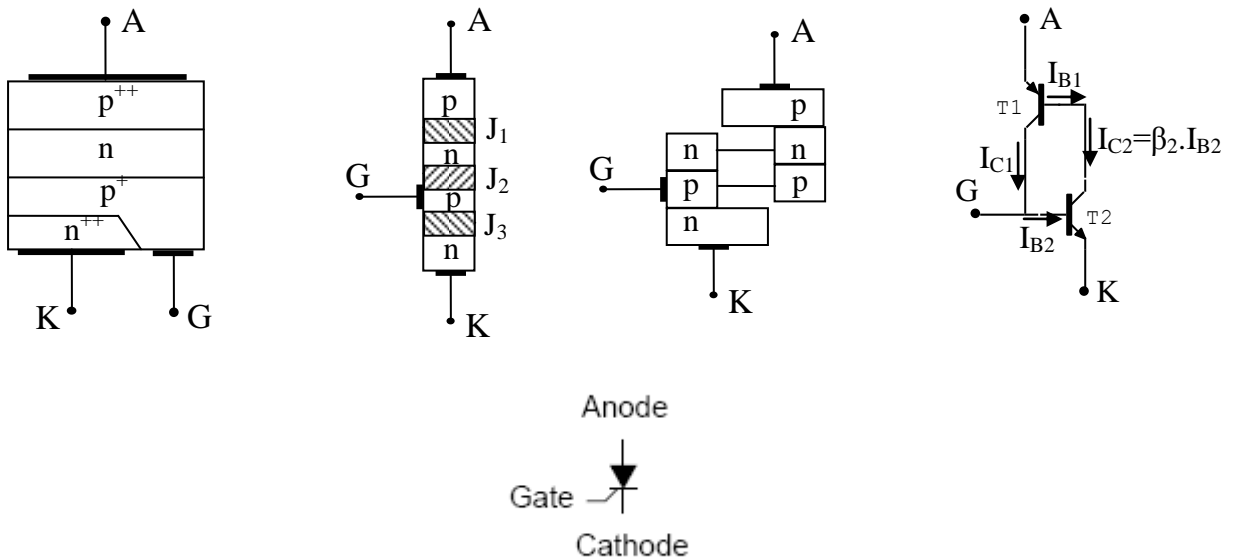
4.5.2. Diac

Diac là linh kiện bán dẫn gồm 2 diode Shockley được ghép song song nhưng ngược chiều nhau nên có thể dẫn dòng theo cả 2 chiều. Diac có 2 điện áp “ngưỡng đánh thủng”, được kích mở 1 lần trong mỗi nửa chu kỳ. Mỗi lần nguồn xoay chiều đảo cực tính, Diac ngắt dòng (*off*) tới thời điểm Diac được kích mở trong nửa chu kỳ tiếp theo, khi đó Diac chuyển sang trạng thái “thông” (*on*).



4.5.3. SCR

a. Cấu tạo: SCR (Silicon Controlled Rectifier - Chỉnh lưu có điều khiển) có cấu trúc giống diode Shockley nhưng có thêm cực cửa G (Gate) đóng vai trò là cực điều khiển.



b. Nguyên lý hoạt động

☞ $U_{AK} < 0$: Đặc tuyến Volt_Ampere của SCR trong miền này tương tự với đặc tuyến của diode Shockley.

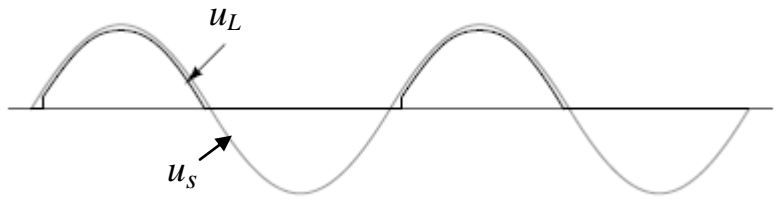
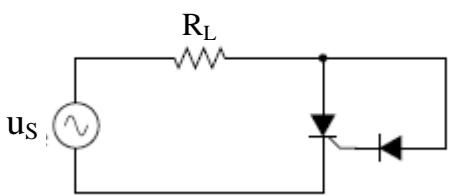
☞ $U_{AK} > 0$

- Nếu $V_G = 0$: SCR hoạt động như một diode Shockley.
- Nếu $V_G > 0$, xuất hiện dòng cực cửa I_G cùng chiều với dòng ngược bão hòa trong SCR do đó tiếp giáp J_2 bị đánh thủng với điện áp U_{AK} nhỏ hơn nhiều so với trường hợp $V_G = 0$; có thể nói điện áp V_G điều khiển điện áp “ngưỡng đánh thủng” U_{BO} . Điện áp V_G càng lớn thì điện áp U_{BO} càng nhỏ. Sau khi được kích mở, cực cửa G mất vai trò điều khiển và SCR sẽ dẫn cho đến khi dòng qua SCR nhỏ hơn dòng duy trì I_H .

Vậy có thể kích mở Thyristor theo 2 cách: tăng điện áp U_{AK} hoặc cấp một điện áp tới cực cửa G bởi một xung có năng lượng rất nhỏ. Điều này thể hiện đặc tính khuếch đại công suất của mạch chỉnh lưu sử dụng SCR.

c. Ứng dụng

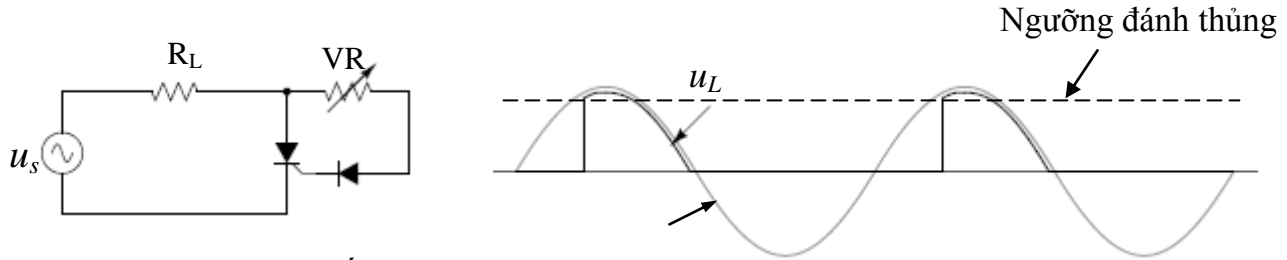
Do chỉ dẫn dòng theo một chiều nên SCR cũng được ứng dụng trong các



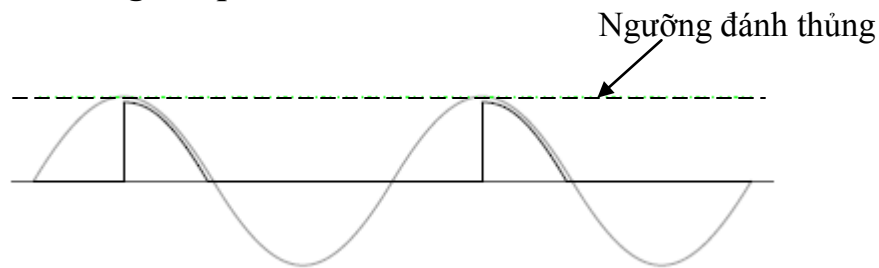
chỉnh lưu có độ nhạy tốt nhất.

Xét mạch chỉnh lưu có điều khiển đơn giản nhất. Diode D có tác dụng bảo vệ SCR trong nửa chu kỳ âm.

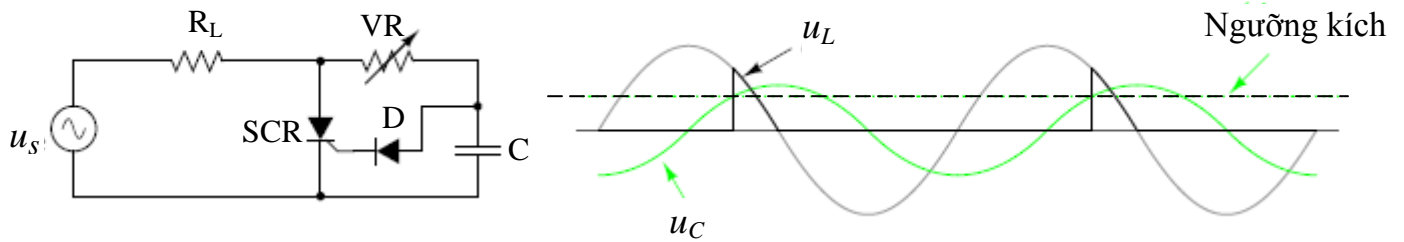
Ban đầu, SCR ngắt, điện áp trên tải $u_L \approx 0$. Sau đó, điện áp dương được đưa tới cực cửa G ($U_{GK} > 0$), SCR được kích mở tại giá trị điện áp $u_s = U_{BO}$ tương ứng với một giá trị U_{GK} xác định. Khi đó SCR tương đương với một điện trở thuần có giá trị rất nhỏ, nên điện áp trên tải $u_L = u_s$. Có thể mắc thêm biến trở VR điều chỉnh điện áp U_{GK} , tức là điều chỉnh điện áp ngưỡng đánh thủng U_{BO} nên có thể điều khiển được góc pha tại đó SCR được kích mở.



Tuy nhiên, đối với sơ đồ mạch như trên thì SCR có thể được kích mở tại góc pha lớn nhất là $\pi/2$, do tại thời điểm đó u_s đạt giá trị cực đại nếu SCR vẫn chưa được kích mở thì không thể kích mở tại góc pha lớn hơn. Mạch trên còn được gọi là **mạch không chế pha 90°** .



Vậy muốn kích mở SCR tại góc pha lớn hơn $\pi/2$ có thể mắc thêm tụ điện C.



$$u_C = u_D + u_{GK}$$

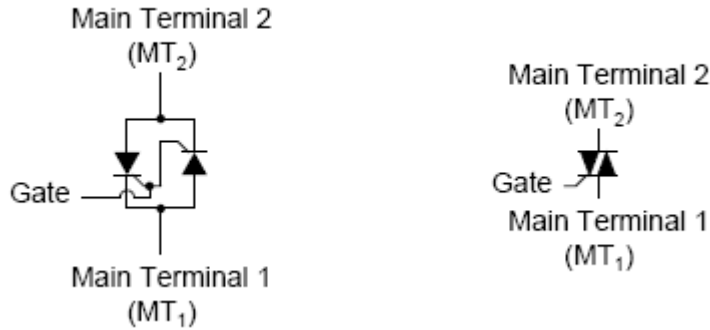
Điện áp u_C dịch pha so với điện áp nguồn một góc trong khoảng $(0 \div \pi/2)$, đóng vai trò giống điện áp nguồn đưa điện áp dương tới cực của G, nên có thể kích mở SCR tại góc pha bất kỳ trong khoảng $(0 \div \pi)$ và được gọi là **mạch không chế pha 180°** .

4.5.4. Triac

a. Cấu tạo

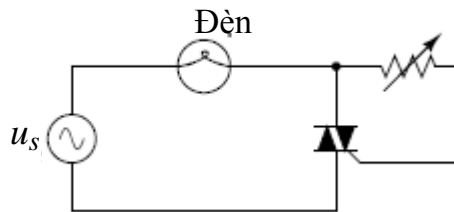
Triac là một linh kiện bán dẫn gồm 2 SCR được ghép song song nhưng ngược chiều, 2 cực của chúng được nối với nhau. Đối với Triac, không còn cực Anode

và Cathode mà thay vào đó là 2 cực chính MT_1 và MT_2 (Main Terminal). Cực G vẫn đóng vai trò là cực điều khiển.



b. Nguyên lý hoạt động

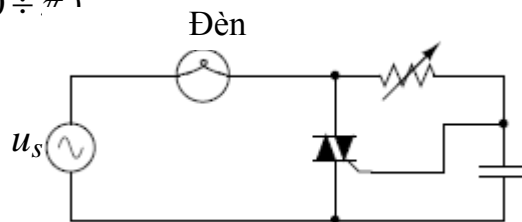
Triac tương đương với một cặp SCR nên có khả năng dẫn dòng theo cả 2 chiều. Tương ứng với mỗi giá trị của điện áp cực của V_G , Triac sẽ có 2 ngưỡng đánh thủng không



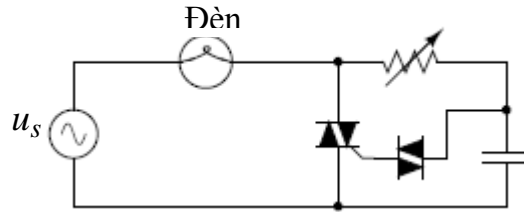
trong mỗi nửa chu kỳ. Tuy nhiên, vai trò của 2 cực MT_1 và MT_2 là không giống nhau. Dòng kích cực của G phải được đưa từ cực MT_2 .

c. Ứng dụng

Khác với SCR được ứng dụng trong các mạch công suất lớn, Triac được sử dụng trong một số mạch công suất nhỏ, ví dụ như chuyển mạch đèn báo hiệu trong gia đình. Khâu di pha RC có tác dụng kích mở Triac tại một giá trị góc pha bất kỳ trong khoảng $(0 \div \pi)$



Tuy nhiên, do Triac được kích mở tại các điện áp ngưỡng không đối xứng gây nên các thành phần hài trong dạng sóng đầu ra, do đó thường Diac được mắc thêm vào mạch như sau:

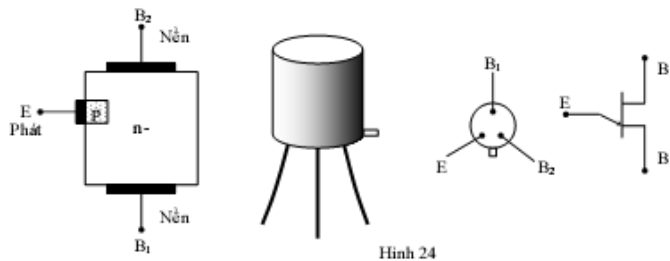


4.5.5. UJT (UNIUNCTION TRANSISTOR – TRANSISTOR ĐƠN NỐI).

Transistor thường (BJT) gọi là Transistor lưỡng cực vì có hai nối PN trong lúc UJT chỉ có một độc nhất nối P-N. Tuy không thông dụng như BJT, nhưng UJT có một số đặc tính đặc biệt nên một thời đã giữ vai trò quan trọng trong các mạch tạo dạng sóng và định giờ.

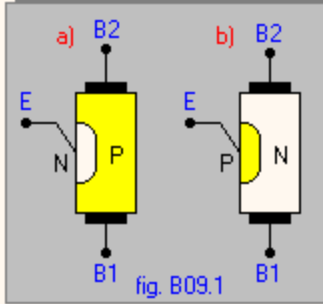
1. Cấu tạo và đặc tính của UJT:

Hình sau đây mô tả cấu tạo đơn giản hoá và ký hiệu của UJT

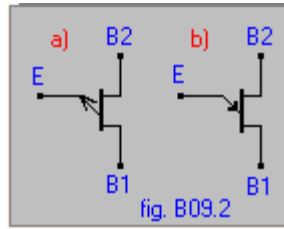


Một thỏi bán dẫn pha nhẹ loại n- với hai lớp tiếp xúc kim loại ở hai đầu tạo thành hai cực nền B1 và B2. Nối PN được hình thành thường là hợp chất của dây nhôm nhỏ đóng vai trò chất bán dẫn loại P. Vùng P này nằm cách vùng B1 khoảng 70% so với chiều dài của hai cực nền B1, B2. Dây nhôm đóng vai trò cực phát E.

Ký hiệu của Transistor một tiếp giáp UJT như trong hình B09.2 a và b.



Hình B09.1.



Hình B09.2.

Trở kháng giữa base 1 và base 2 được đo khi dòng emitter = 0 được gọi là “trở kháng giữa các base” (interbase) RBB và có giá trị điển hình khoảng 5K – 10 K Ohm.

Hình B09.3 chỉ ra mạch tương đương đơn giản của UJT với cực Base loại N. Trở kháng RBB được phân đôi bởi chuyển tiếp P-N (biểu thị bởi diode) thành 2 điện trở RB1 và RB2 , mà tổng của nó bằng RBB .

Trong chế độ hoạt động thông thường, điện áp VBB được cung cấp cho base 1 và base 2, với base 2 dương hơn so với 1. Khi không có dòng IE , thanh bán dẫn sẽ hoạt động giống như một bộ phân áp đơn giản và có một phần điện áp xác định của VBB xuất hiện trên RB1. Tỷ số n được gọi là “tỷ số cân bằng (stand-off) nội” và giá trị của nó không khoảng 0,5 đến 0,9 . Tỷ số này được cho bởi:

Điện áp VBB khiến cathode của diode của dương hơn so với B1 và có giá trị điện thế $n.VBB$. Nếu điện áp emitter VE nhỏ hơn giá trị này, chuyển tiếp sẽ được phân cực ngược và chỉ có một dòng emitter ngược nhỏ chảy qua.

Nếu VE lớn hơn $(nVBB + VD)$, với VD là điện áp ngưỡng của chuyển tiếp, thì diode sẽ được phân cực ngược và có một dòng emitter thuận IE chảy qua. Dòng này do các lỗ trống “khuếch tán” vào phần thấp hơn của thanh bán dẫn và làm tăng độ dẫn (do số lượng các hạt dẫn tự do tăng). Điều này khiến cho điện trở RB1 giảm. Khi RB1 giảm, điện áp $n.VBB$ cũng giảm, bởi thế có sự gia tăng điện áp thuận qua diode và tất nhiên dòng qua diode cũng tăng. Quá trình

tích lũy này tiếp tục cho đến khi đạt đến giá trị dòng IE tức đạt đến trạng thái bão hòa của thanh bán dẫn tại miền RB1 . Bắt đầu từ các điều kiện này, điện áp VE , mà có giá trị nhỏ nhất Vv (điện áp điểm trũng - valley voltage), bắt đầu tăng khi dòng tăng, giống như đặc tuyến thông thường của diode.

Đặc trưng của đặc tuyến dòng/áp của UJT như chỉ ra ở hình B09.4.

Trong đường cong này, có 3 miền làm việc:

1. $0 < V_E < V_P$: dòng IE là rất nhỏ và trở kháng vào rất cao.
2. $V_P < V_E < V_v$: trở kháng vào là âm, có nghĩa một sự gia tăng dòng sẽ khiến cho điện áp giảm.
3. $V_E > V_v$: trở kháng vào lại trở nên dương và có giá trị tương tự với trở kháng của diode khi dẫn.

Các điểm đặc trưng:

1. VP được gọi là điện áp đỉnh và bằng:
$$V_P = n.V_{B2B1} + V_D = n.V_{BB} + V_D.$$
2. Vv : điện áp điểm trũng.
3. Iv : dòng điện điểm trũng.

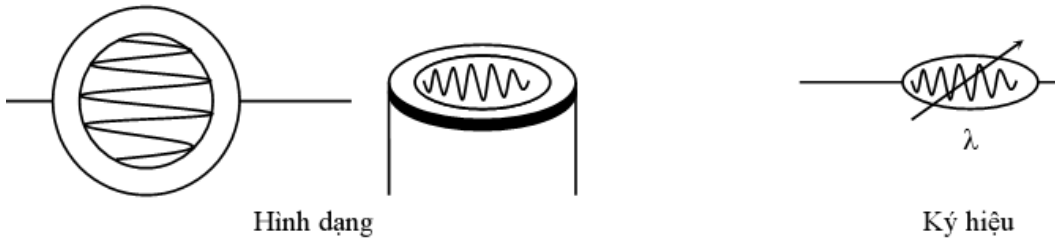
Transistor UJT được dùng chủ yếu trong các mạch chuyển mạch, định thời, mạch trigger và mạch tạo xung.

CHƯƠNG 5: LINH KIỆN QUANG ĐIỆN TỬ

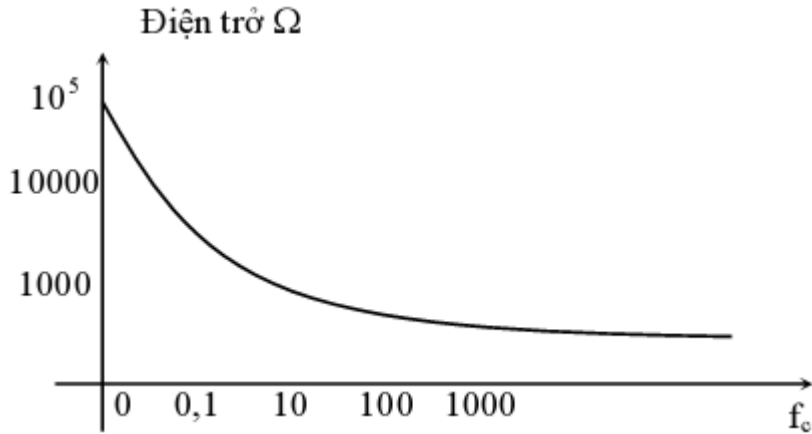
Trong chương này, chúng ta chỉ đề cập đến một số các linh kiện quang điện tử thông dụng như quang điện trở, quang diod, quang transistor, led... các linh kiện quang điện tử quá đặc biệt không được đề cập đến.

I. QUANG ĐIỆN TRỞ (PHOTORESISTANCE).

Là điện trở có trị số càng giảm khi được chiếu sáng càng mạnh. Điện trở tối (khi không được chiếu sáng - ở trong bóng tối) thường trên $1M\Omega$, trị số này giảm rất nhỏ có thể dưới 100Ω khi được chiếu sáng mạnh



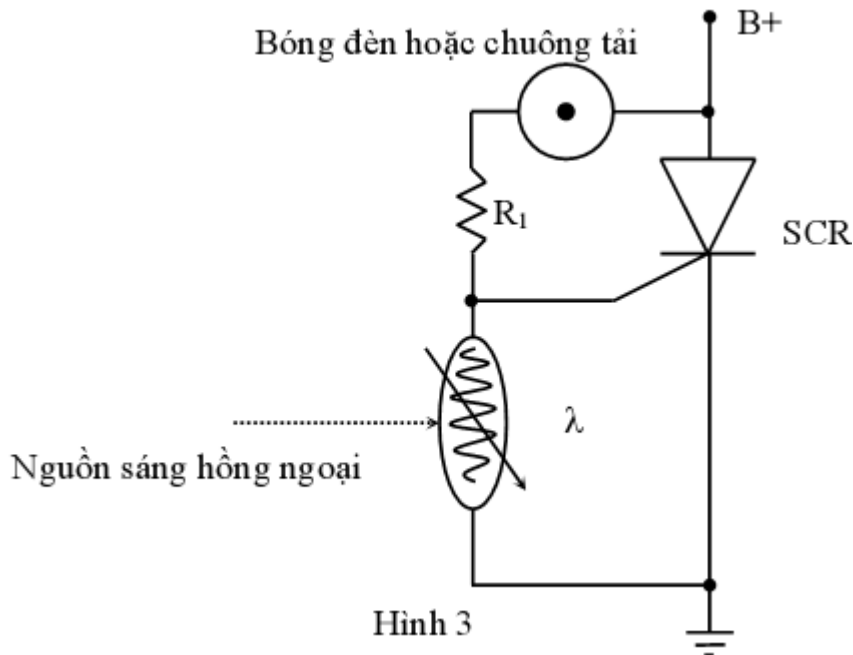
Nguyên lý làm việc của quang điện trở là khi ánh sáng chiếu vào chất bán dẫn (có thể là Cadmium sulfide – CdS, Cadmium selenide – CdSe) làm phát sinh các điện tử tự do, tức sự dẫn điện tăng lên và làm giảm điện trở của chất bán dẫn. Các đặc tính điện và độ nhạy của quang điện trở dĩ nhiên tùy thuộc vào vật liệu dùng trong chế tạo.



Về phương diện năng lượng, ta nói ánh sáng đã cung cấp một năng lượng $E=h.f$ để các điện tử nhảy từ dải hóa trị lên dải dẫn điện. Như vậy năng lượng cần thiết $h.f$ phải lớn hơn năng lượng của dải cấm.

Vài ứng dụng của quang điện trở: Quang điện trở được dùng rất phổ biến trong các mạch điều khiển

1. Mạch báo động:



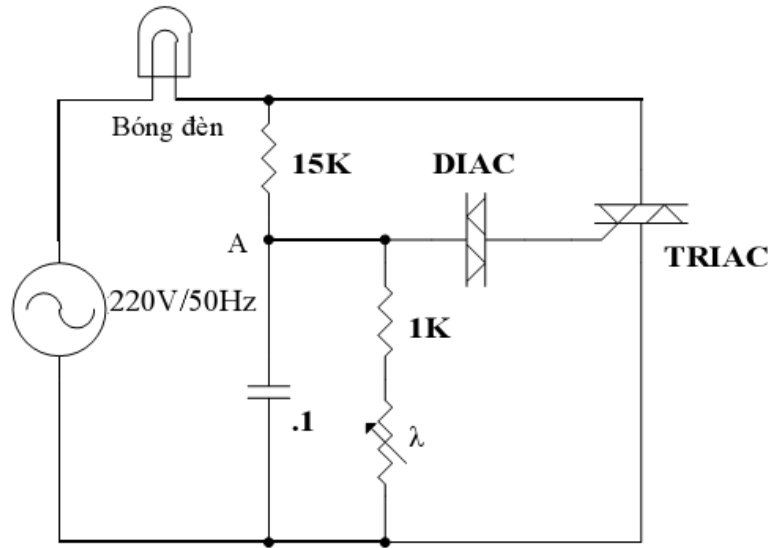
Hình 3

Khi quang điện trở được chiếu sáng (trạng thái thường trực) có điện trở nhỏ, điện thế cổng của SCR giảm nhỏ không đủ dòng kích nên SCR ngưng. Khi

nguồn sáng bị chặn, R tăng nhanh, điện thế cổng SCR tăng làm SCR dẫn điện, dòng điện qua tải làm cho mạch báo động hoạt động.

Người ta cũng có thể dùng mạch như trên, với tải là một bóng đèn để có thể cháy sáng về đêm và tắt vào ban ngày. Hoặc có thể tải là một relais để điều khiển một mạch báo động có công suất lớn hơn.

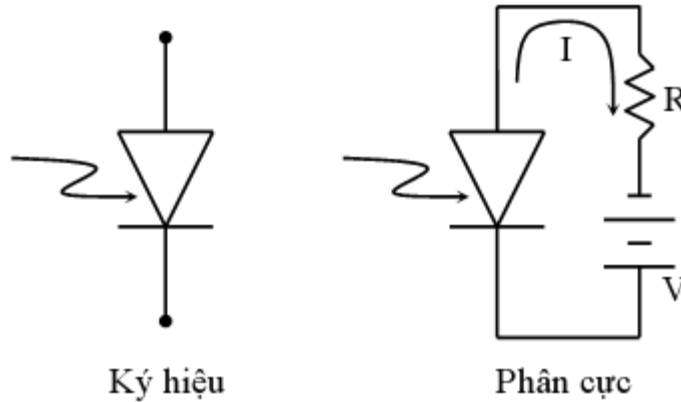
2. Mạch mở điện tự động về đêm dùng điện AC:



Ban ngày, trị số của quang điện trở nhỏ. Điện thế ở điểm A không đủ để mở Diac nên Triac không hoạt động, đèn tắt. về đêm, quang trở tăng trị số, làm tăng điện thế ở điểm A, thông Diac và kích Triac dẫn điện, bóng đèn sáng lên.

II. QUANG DIOD (PHOTODIODE).

Ta biết rằng khi một nối P-N được phân cực thuận thì vùng hiếm hẹp và dòng thuận lớn vì do hạt tải điện đa số (điện tử ở chất bán dẫn loại N và lỗ trống ở chất bán dẫn loại P) di chuyển tạo nên. Khi phân cực nghịch, vùng hiếm rộng và chỉ có dòng điện rỉ nhỏ (dòng bão hòa nghịch I_0) chạy qua.



Bây giờ ta xem một nối P-N được phân cực nghịch. Thí nghiệm cho thấy khi chiếu sáng ánh sáng vào mối nối (giả sử diod được chế tạo trong suốt), ta thấy dòng điện nghịch tăng lên gần như tỉ lệ với quang thông trong lúc dòng điện thuận không tăng. Hiện tượng này được dùng để chế tạo quang diod.

Khi ánh sáng chiếu vào nối P-N có đủ năng lượng làm phát sinh các cặp điện tử - lỗ trống ở sát hai bên mối nối làm mật độ hạt tải điện thiểu số tăng lên. Các hạt tải điện thiểu số này khuếch tán qua mối nối tạo nên dòng điện đáng kể cộng thêm vào dòng điện bão hòa nghịch I_0 tự nhiên của diod, thường là dưới vài trăm nA với quang diod Si và dưới vài chục μA với quang diod Ge.

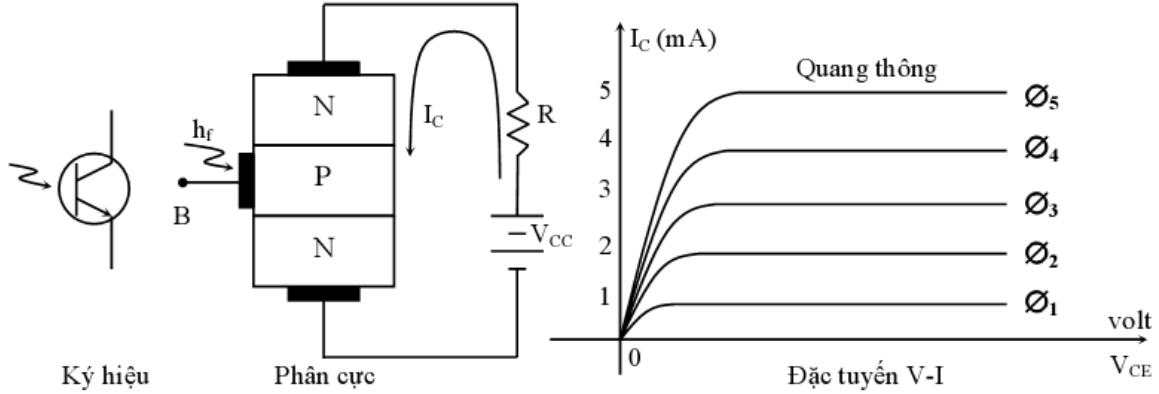
Độ nhạy của quang diod tùy thuộc vào chất bán dẫn là Si, Ge hay Selenium... Hình vẽ sau đây cho thấy độ nhạy đó theo tần số của ánh sáng chiếu vào các chất bán dẫn này:

III. QUANG TRANSISTOR (PHOTO TRANSISTOR).

Quang transistor là nơi rộng đương nhiên của quang diod. Về mặt cấu tạo, quang transistor cũng giống như transistor thường nhưng cực nền để hở. Quang transistor có một thấu kính trong suốt để tập trung ánh sáng vào mối P-N giữa thu và nền.

Khi cực nền để hở, nối nền-phát được phân cực thuận chút ít do các dòng điện rỉ (điện thế V_{BE} lúc đó khoảng vài chục mV ở transistor Si) và nối thu-nền được phân cực nghịch nên transistor ở vùng tác động.

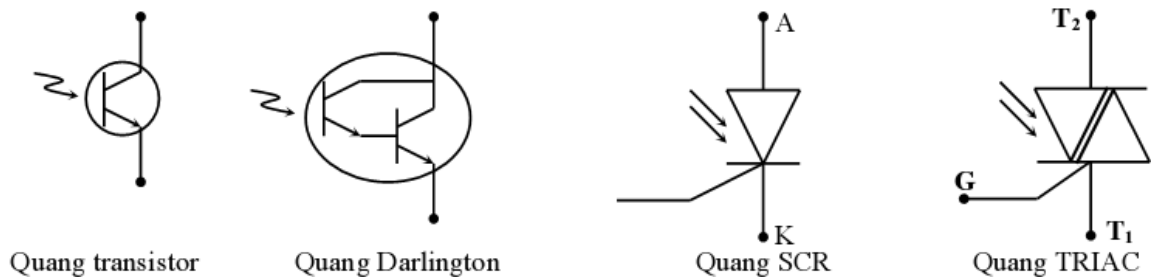
Vì nối thu-nền được phân cực nghịch nên có dòng rỉ I_{co} chạy giữa cực thu và cực nền. Vì cực nền bỏ trống, nối nền-phát được phân cực thuận chút ít nên dòng điện cực thu là $I_{co}(1+\beta)$. Đây là dòng tối của quang transistor.



Khi có ánh sáng chiếu vào mối nối thu nền thì sự xuất hiện của các cặp điện tử và lỗ trống như trong quang diod làm phát sinh một dòng điện I_λ do ánh sáng nên dòng điện thu trở thành: $I_C = (\beta + 1)(I_{co} + I_\lambda)$

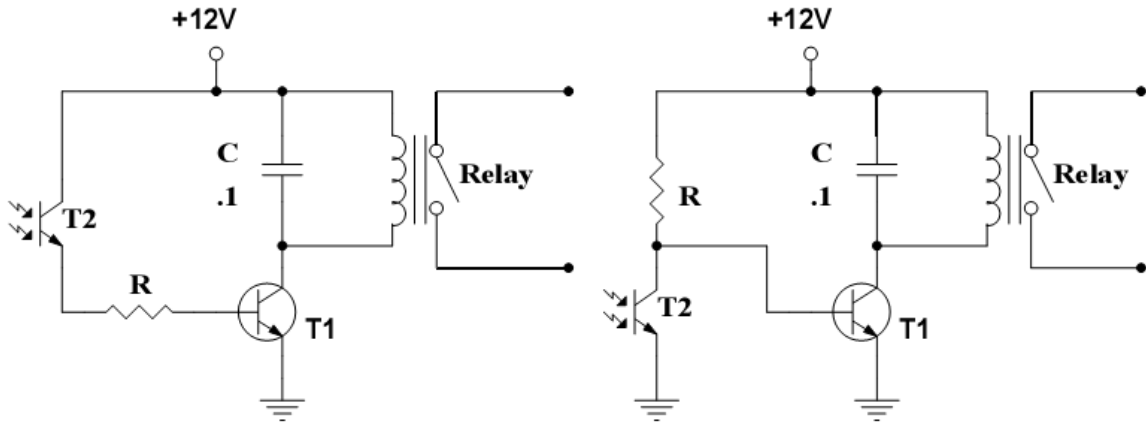
Như vậy, trong quang transistor, cả dòng tối lẫn dòng chiếu sáng đều được nhân lên $(\beta + 1)$ lần so với quang diod nên dễ dàng sử dụng hơn. Hình trên trình bày đặc tính V-I của quang transistor với quang thông là một thông số. Ta thấy đặc tuyến này giống như đặc tuyến của transistor thường mắc theo kiểu cực phát chung.

Có nhiều loại quang transistor như loại một transistor dùng để chuyển mạch dùng trong các mạch điều khiển, mạch đếm... loại quang transistor Darlington có độ nhạy rất cao. Ngoài ra người ta còn chế tạo các quang SCR, quang triac...



Vài ứng dụng của quang transistor:

Đóng hay tắt Relais:

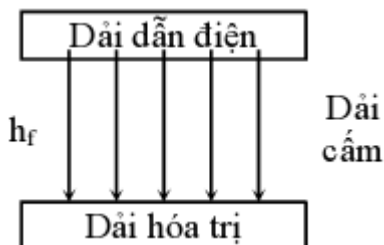


Trong mạch đóng relais, khi quang transistor được chiếu sáng nó dẫn điện làm T1 thông, Relais hoạt động. Ngược lại trong mạch tắt relais, ở trạng thái thường trực quang transistor không được chiếu sáng nên quang transistor ngưng và T1 luôn thông, Relais ở trạng thái đóng. Khi được chiếu sáng, quang transistor dẫn mạnh làm T1 ngưng, Relais không hoạt động (ở trạng thái tắt).

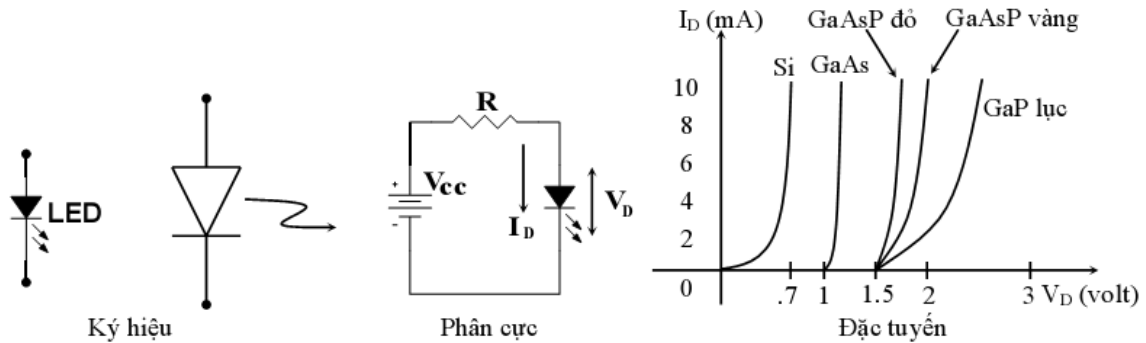
IV. DIOD PHÁT QUANG (LED-LIGHT EMITTING DIODE).

Ở quang trở, quang diod và quang transistor, năng lượng của ánh sáng chiếu vào chất bán dẫn và cấp năng lượng cho các điện tử vượt dải cấm. Ngược lại khi một điện tử từ dải dẫn điện rơi xuống dải hoá trị thì sẽ phát ra một năng lượng $E=h.f$

Khi phân cực thuận một nối P-N, điện tử tự do từ vùng N xuyên qua vùng P và tái hợp với lỗ trống (về phương diện năng lượng ta nói các điện tử trong dải dẫn điện – có năng lượng cao – rơi xuống dải hoá trị - có năng lượng thấp – và kết hợp với lỗ trống), khi tái hợp thì sinh ra năng lượng.



Đối với diod Ge, Si thì năng lượng phát ra dưới dạng nhiệt. Nhưng đối với diod cấu tạo bằng GaAs (Gallium Arsenide) năng lượng phát ra là ánh sáng hồng ngoại (không thấy được) dùng trong các mạch báo động, điều khiển từ xa...). Với GaAsP (Gallium Arsenide phosphor) năng lượng phát ra là ánh sáng vàng hay đỏ. Với GaP (Gallium phosphor), năng lượng ánh sáng phát ra màu vàng hoặc xanh lá cây. Các Led phát ra ánh sáng thấy được dùng để làm đèn báo, trang trí... Phần ngoài của LED có một thấu kính để tập trung ánh sáng phát ra ngoài.



Để có ánh sáng liên tục, người ta phân cực thuận LED. Tùy theo vật liệu cấu tạo, điện thế thềm của LED thay đổi từ 1 đến 2.5V và dòng điện qua LED tối đa khoảng vài mA.