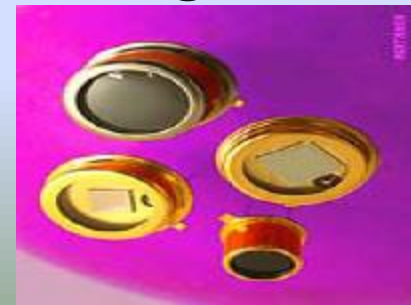


# Kỹ thuật đo lường (5)

**GV: Hoàng Sĩ Hồng**

# Chuyển đổi điện tử và ion

- Nguyên lý chung: dựa vào sự thay đổi dòng ion và dòng điện tử dưới tác dụng của đại lượng đo
- Chuyển đổi điện tử: chuyển đổi phát xạ điện tử, chuyển đổi phát xạ nhiệt điện tử và chuyển đổi phát xạ quang điện tử.
- Chuyển đổi phát xạ điện tử là đèn hai cực: dưới tác dụng của điện trường mạnh, các điện tử bị bắn ra khỏi katot, trên đường đi chúng ion hoá các phân tử khí tạo thành ion dương và âm. Và dòng điện đó phụ thuộc vào mật độ không khí trong đèn. Ứng dụng chế tạo các thiết bị đo áp suất thấp gọi là chân không kế ( $2 \cdot 10^{-6}$  -  $8 \cdot 10^{-4}$  mm Hg)



# Chuyển đổi điện tử và ion



- Chuyển đổi có phát xạ nhiệt điện tử: được chế tạo dưới dạng đèn 2 cực và 3 cực, do catot bị đốt nóng, các điện tử bắn ra khỏi nó và dưới tác dụng của điện trường, các điện tử chuyển động từ anot sang catot. Trên đường đi cũng ion hoá chất khí tạo thành ion dương và âm, dùng để đo độ chân không đến  $10^{-6}$  mmHg.
- Nếu giữ cho đèn có độ chân không ổn định, dòng điện chạy trong mạch phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai điện cực. Ứng dụng dùng để đo di chuyển, đo áp suất...

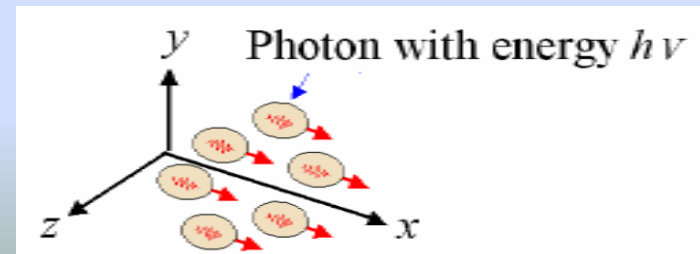
# Chuyển đổi điện tử và ion

- Tính chất cơ bản của ánh sáng: sóng và hạt.
- Dạng sóng của ánh sáng là sóng điện từ. Bước sóng ánh sáng là  $\lambda$ ,  $\nu$  là tần số.
- Ánh sáng khi truyền qua một chất nào đó có thể bị hấp thụ hoặc tán xạ.

$$E_{ph} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

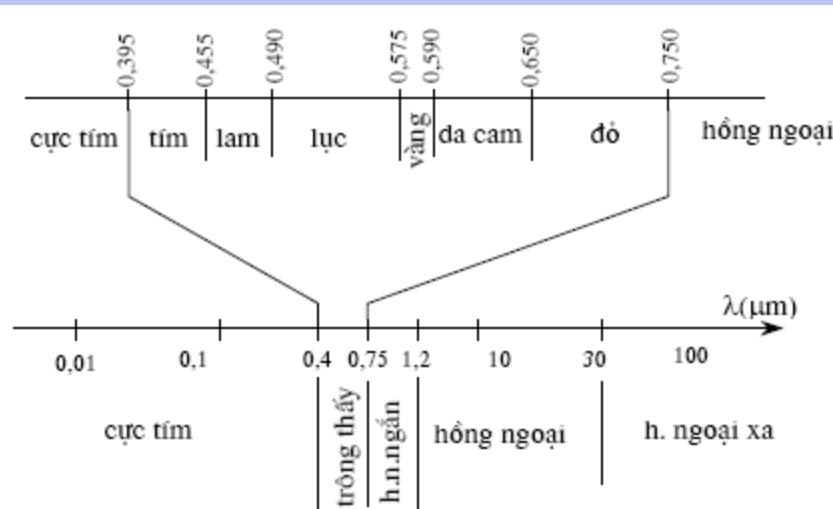
$h$  = Plank' s constant =  $6.63 \times 10^{-34}$  J · s

$c = \nu\lambda$  = light velocity =  $2.998 \times 10^8$  m/s



# Tính chất của ánh sáng

- Ánh sáng là một sóng điện từ, vùng ánh sáng nhìn thấy được có bước sóng từ 0.4 đến 0.75μm.



Hình 2.1 Phổ ánh sáng

- Khi môi trường là chân không :  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

- Khi môi trường là vật chất :  $\lambda = \frac{v}{\nu}$  .

Trong đó  $\nu$  là tần số ánh sáng.

Vận tốc truyền ánh sáng trong chân không  $c = 299.792 \text{ km/s}$ , trong môi trường vật chất vận tốc truyền sóng giảm, được xác định theo công thức:

$$\nu = \frac{c}{n}$$

$n$  - chiết suất của môi trường.

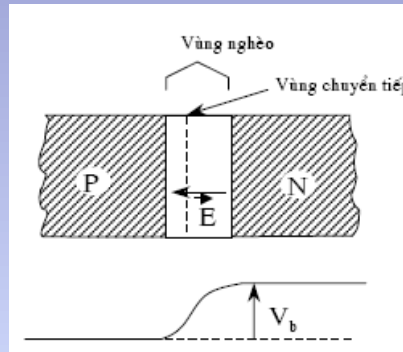
# Tính chất của ánh sáng

- Do ánh sáng có tính chất sóng nên khi dòng ánh sáng xuyên qua một chất nào đó có thể bị hấp thụ hoặc tán xạ. Cường độ của chùm tia song song đi qua một chất với khoảng cách  $x$  sẽ bị giảm đi do bị hấp thụ theo quy luật:

# Hiệu ứng quang dẫn

Hiệu ứng quang dẫn (hay còn gọi là hiệu ứng quang điện nội) là hiện tượng giải phóng những hạt tải điện (hạt dẫn) trong vật liệu dưới tác dụng của ánh sáng làm tăng độ dẫn điện của vật liệu.

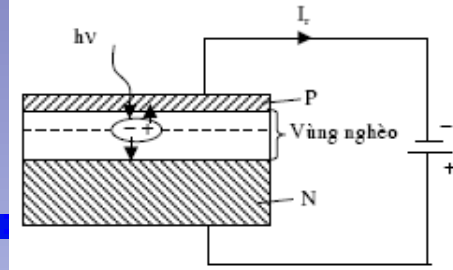
# photodiode



- Cấu tạo và nguyên lý hoạt động:
- Xét hai tấm bán dẫn, một thuộc loại N và một thuộc loại P, ghép tiếp xúc nhau. Tại mặt tiếp xúc hình thành một vùng nghèo hạt dẫn vì tại vùng này tồn tại một điện trường và hình thành hàng rào thế  $V_b$ .
- Khi không có điện thế ở ngoài đặt lên chuyển tiếp ( $V=0$ ), dòng điện chạy qua chuyển tiếp  $i = 0$ , thực tế dòng  $I$  chính là dòng tổng cộng của hai dòng điện bằng nhau và ngược chiều:
- - Dòng khuếch tán các hạt cơ bản sinh ra khi ion hoá các tạp chất (lỗ trống trong bán dẫn loại P, điện tử trong bán dẫn loại N) do năng lượng nhiệt của các hạt dẫn cơ bản đủ lớn để vượt qua hàng rào thế.
- - Dòng hạt dẫn không cơ bản sinh ra do kích thích nhiệt (điện tử trong bán dẫn P, lỗ trống trong bán dẫn N) chuyển động dưới tác dụng của điện trường  $E$  trong vùng nghèo.



# photodiode



Khi có điện áp đặt lên diốt, hàng rào thế thay đổi kéo theo sự thay đổi dòng hạt cơ bản và bề rộng vùng nghèo. Dòng điện qua chuyển tiếp:

$$I = I_0 \exp\left[\frac{qV_d}{kT}\right] - I_0$$

Khi điện áp ngược đủ lớn ( $V_d \ll -\frac{kT}{q} = -26\text{mV}$  ở 300K), chiều cao hàng rào thế lớn đến mức dòng khuếch tán của các hạt cơ bản trở nên rất nhỏ và có thể bỏ qua và chỉ còn lại dòng ngược của diốt, khi đó  $I = I_0$ .

Khi chiếu sáng diốt bằng bức xạ có bước sóng nhỏ hơn bước sóng ngưỡng, sẽ xuất hiện thêm các cặp điện tử - lỗ trống. Để các hạt dẫn này tham gia dẫn điện cần phải ngăn cản sự tái hợp của chúng, tức là nhanh chóng tách rời cặp điện tử - lỗ trống. Sự tách cặp điện tử - lỗ trống chỉ xảy ra trong vùng nghèo nhờ tác dụng của điện trường.

$V$  là điện áp đặt lên diode và  $I_0$  là dòng điện tối

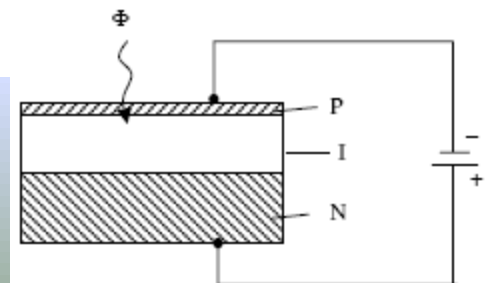
# photodiode

Số hạt dẫn được giải phóng phụ thuộc vào thông lượng ánh sáng đạt tới vùng nghèo và khả năng hấp thụ của vùng này. Thông lượng ánh sáng chiếu tới vùng nghèo phụ thuộc đáng kể vào chiều dày lớp vật liệu mà nó đi qua:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha x}$$

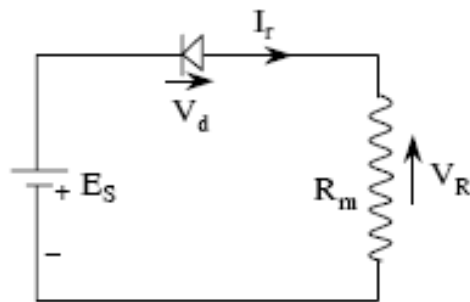
Trong đó hệ số  $\alpha \approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$ . Để tăng thông lượng ánh sáng đến vùng nghèo người ta chế tạo điốt với phiên bán dẫn chiều dày rất bé.

Khả năng hấp thụ bức xạ phụ thuộc rất lớn vào bề rộng vùng nghèo. Để tăng khả năng mở rộng vùng nghèo người ta dùng điốt PIN, lớp bán dẫn riêng I kẹp giữa hai lớp bán dẫn P và N, với loại điốt này chỉ cần điện áp ngược vài vôn có thể mở rộng vùng nghèo ra toàn bộ lớp bán dẫn I.

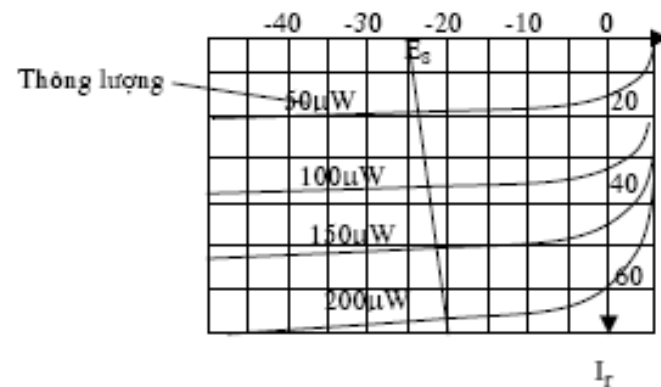


# Chế độ hoạt động quang dẫn

Sơ đồ nguyên lý (hình 2.12a) gồm một nguồn  $E_s$  phân cực ngược điôt và một điện trở  $R_m$  để đo tín hiệu.



a)



b)

Hình 2.12 Sơ đồ nguyên lý và chế độ làm việc

Dòng ngược qua điôt:

$$I_r = -I_0 \exp\left[\frac{qV_d}{kT}\right] + I_0 + I_p \quad (2.40)$$

# Chế độ hoạt động quang dẫn

Trong đó  $I_p$  là dòng quang điện:

$$I_p = \frac{q\eta(1-R)\lambda}{hc} \Phi_0 \exp(-\alpha X) \quad (2.41)$$

Khi điện áp ngược  $V_d$  đủ lớn, thành phần  $\exp\left[\frac{qV_d}{kT}\right] \rightarrow 0$ , ta có:

$$I_R = I_0 + I_p$$

Thông thường  $I_0 \ll I_p$  do đó  $I_R \approx I_p$ .

Phương trình mạch điện:

$$E = V_R - V_D$$

Trong đó  $V_R = R_m I_r$  cho phép vẽ đường thẳng tải  $\Delta$  (hình 2.11b).

Dòng điện chạy trong mạch:

$$I_r = \frac{E}{R_m} + \frac{V}{R_m}$$

Điểm làm việc của điôt là điểm giao nhau giữa đường thẳng tải  $\Delta$  và đường đặc tuyến I-V với thông lượng tương ứng. Chế độ làm việc này là tuyến tính,  $V_R$  tỉ lệ với thông lượng.

# Chế độ quang thế

Trong chế độ này không có điện áp ngoài đặt vào điốt. Điốt làm việc như một bộ chuyển đổi năng lượng tương đương với một máy phát và người ta đo thế hở mạch  $V_{oc}$  hoặc đo dòng ngắn mạch  $I_{sc}$ .

Đo thế hở mạch: Khi chiếu sáng, dòng  $I_p$  tăng làm cho hàng rào thế giảm một lượng  $\Delta V_b$ . Sự giảm chiều cao hàng rào thế làm cho dòng hạt dẫn cơ bản tăng lên, khi đạt cân bằng  $I_r = 0$ .

Ta có: 
$$-I_0 \exp\left[\frac{qV_d}{kT}\right] + I_0 + I_p = 0$$

Rút ra: 
$$\Delta V_b = \frac{kT}{q} \log\left[1 + \frac{I_p}{I_0}\right]$$

Độ giảm chiều cao  $\Delta V_b$  của hàng rào thế có thể xác định được thông qua đo điện áp giữa hai đầu điốt khi hở mạch.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \log\left[1 + \frac{I_p}{I_0}\right]$$

# Chế độ quang thế

Khi chiếu sáng yếu  $I_p \ll I_0$ :

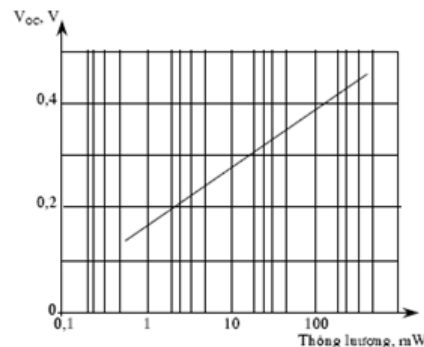
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{I_p}{I_0}$$

Trong trường hợp này  $V_{oc}$  ( $kT/q=26\text{mV}$  ở  $300\text{K}$ ) nhỏ nhưng phụ thuộc tuyến tính vào thông lượng.

Khi chiếu sáng mạnh,  $I_p \gg I_0$  và ta có:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \log \frac{I_p}{I_0}$$

Trong trường hợp này  $V_{oc}$  có giá trị tương đối lớn (cỡ  $0,1 - 0,6 \text{ V}$ ) nhưng phụ thuộc vào thông lượng theo hàm logarit.

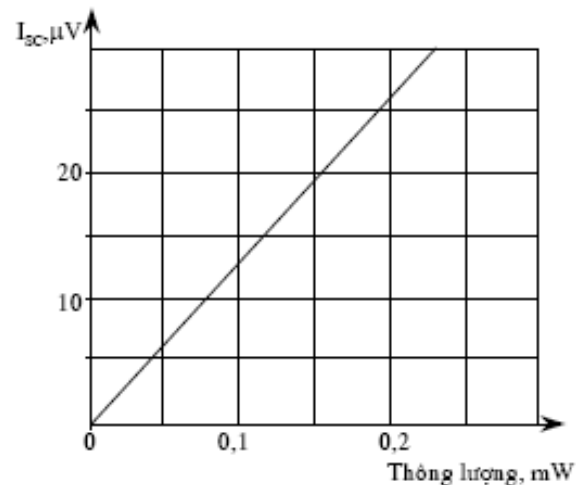


Hình 2.13 Sự phụ thuộc của thế hở mạch vào thông lượng

# Chế độ ngắn mạch

Đo dòng ngắn mạch: Khi nối ngắn mạch hai đầu điôt bằng một điện trở nhỏ hơn  $r_d$  nào đó, dòng đoản mạch  $I_{SC}$  chính bằng  $I_P$  và tỉ lệ với thông lượng (hình 2.14):

$$I_{SC} = I_P$$



Hình 2.14 Sự phụ thuộc của dòng ngắn mạch vào thông lượng ánh sáng

Đặc điểm quan trọng của chế độ này là không có dòng tối, nhờ vậy có thể giảm nhiễu và cho phép đo được thông lượng nhỏ.

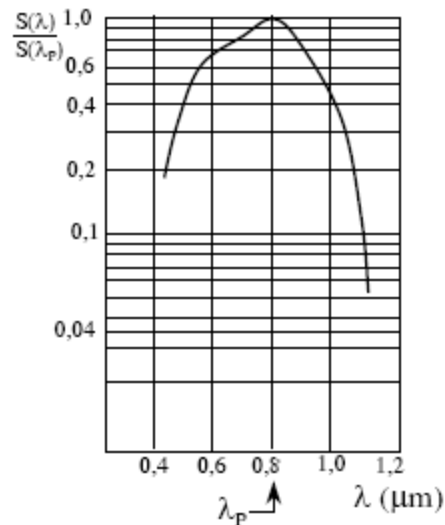
# Độ nhạy

Đối với bức xạ có phổ xác định, dòng quang điện  $I_p$  tỉ lệ tuyến tính với thông lượng trong một khoảng tương đối rộng, cỡ 5 - 6 decad. Độ nhạy phổ xác định theo công thức:

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi} = \frac{q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda$$

Với  $\lambda \leq \lambda_s$ .

Độ nhạy phổ phụ thuộc vào  $\lambda$ , hiệu suất lượng tử  $\eta$ , hệ số phản xạ  $R$  và hệ số hấp thụ  $\alpha$ .



Hình 2.15 Phổ độ nhạy của photodiode



# Mạch đo của chế độ quang dẫn

- Sơ đồ làm việc ở chế độ quang dẫn:

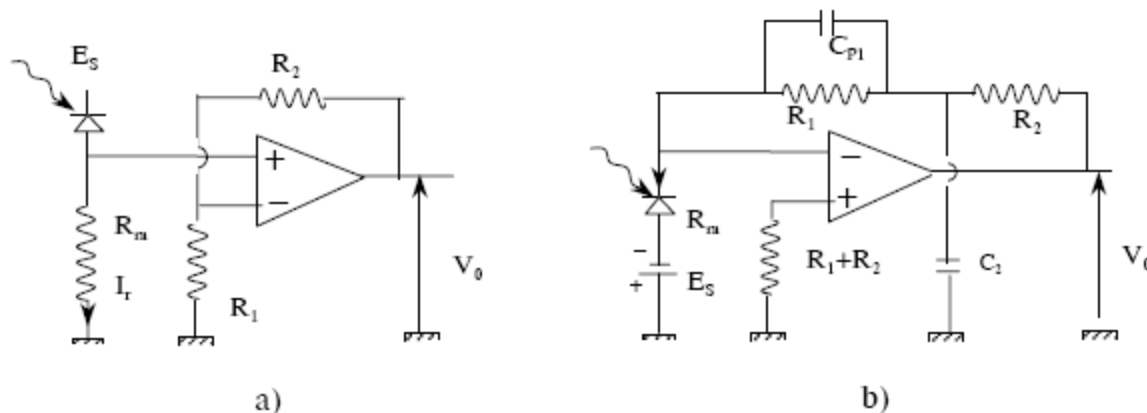
Đặc trưng của chế độ quang dẫn:

- + Độ tuyến tính cao.
- + Thời gian hồi đáp ngắn.
- + Dải thông lớn.

Hình 2.16 trình bày sơ đồ đo dòng ngược trong chế độ quang dẫn.

Sơ đồ cơ sở (hình 2.17a):

$$V_0 = R_m \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] I_r$$



Hình 2.17 Sơ đồ mạch đo dòng ngược trong chế độ quang dẫn

# Mạch đo của chế độ quang thế

- Sơ đồ làm việc ở chế độ quang thế:

Đặc trưng của chế độ quang thế:

+ Có thể làm việc ở chế độ tuyến tính hoặc logarit tùy thuộc vào tải.

+ Ít nhiễu.

+ Thời gian hồi đáp lớn.

+ Dải thông nhỏ.

+ Nhạy cảm với nhiệt độ ở chế độ log.

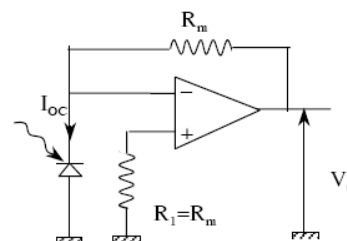
Sơ đồ tuyến tính (hình 2.18a): đo dòng ngắn mạch  $I_{sc}$ .

Trong chế độ này:

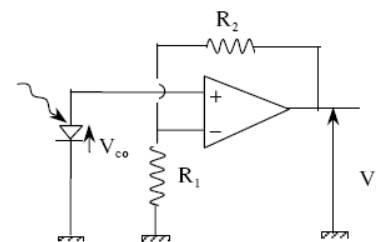
$$V_0 = R_m \cdot I_{sc}$$

Sơ đồ logarit (hình 2.18b): đo điện áp hở mạch  $V_{oc}$ .

$$V_0 = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] V_{oc}$$



a)



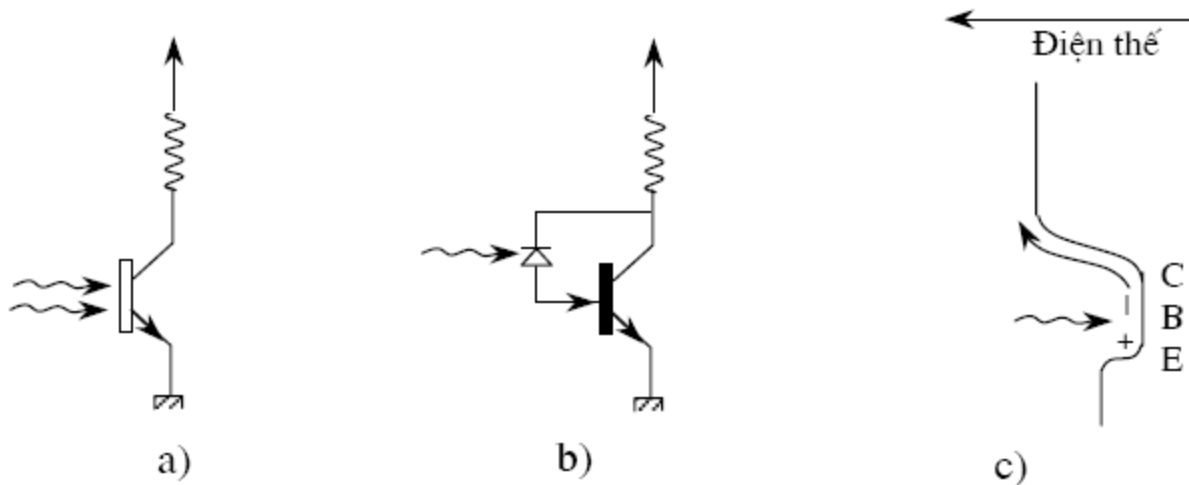
b)

Hình 2.18 Sơ đồ mạch đo ở chế độ quang áp

# Phototranzito

- Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Phototranzito là các tranzito mà vùng bazơ có thể được chiếu sáng, không có điện áp đặt lên bazơ, chỉ có điện áp trên C, đồng thời chuyển tiếp B-C phân cực ngược.



Hình 2.19 Phototranzito

- a) Sơ đồ mạch điện b) Sơ đồ tương đương  
c) Tách cặp điện tử lỗ trống khi chiếu sáng bazơ

# Phototranzito

Điện áp đặt vào tập trung hầu như toàn bộ trên chuyển tiếp B-C (phân cực ngược) trong khi đó chênh lệch điện áp giữa E và B thay đổi không đáng kể ( $V_{BE} \approx 0,6-0,7$  V). Khi chuyển tiếp B-C được chiếu sáng, nó hoạt động giống như photodiode ở chế độ quang thế với dòng ngược:

$$I_r = I_0 + I_p$$

Trong đó  $I_0$  là dòng ngược trong tối,  $I_p$  là dòng quang điện dưới tác dụng của thông lượng  $\Phi_0$  chiếu qua bề dày  $X$  của bazơ (bước sóng  $\lambda < \lambda_s$ ):

$$I_p = \frac{q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda \Phi_0$$

Dòng  $I_r$  đóng vai trò dòng bazơ, nó gây nên dòng collector  $I_c$ :

$$I_c = (\beta + 1)I_r = (\beta + 1)I_0 + (\beta + 1)I_p$$

$\beta$  - hệ số khuếch đại dòng của tranzito khi đấu chung emitter.

Có thể coi phototranzito như tổ hợp của một photodiode và một tranzito (hình 2.19b).

Photodiode cung cấp dòng quang điện tại bazơ, còn tranzito cho hiệu ứng khuếch đại  $\beta$ .

Các điện tử và lỗ trống phát sinh trong vùng bazơ (dưới tác dụng của ánh sáng) sẽ bị phân chia dưới tác dụng của điện trường trên chuyển tiếp B - C.

# Độ nhạy



Khi nhận được thông lượng  $\Phi_0$ , điốt bazo-colector sinh ra dòng quang điện  $I_p$ , dòng này gây nên trong phototranzito một dòng  $I_{cp} = (\beta + 1)I_p$ , trong đó giá trị của  $I_{cp}$  được rút ra từ công thức của  $I_p$ :

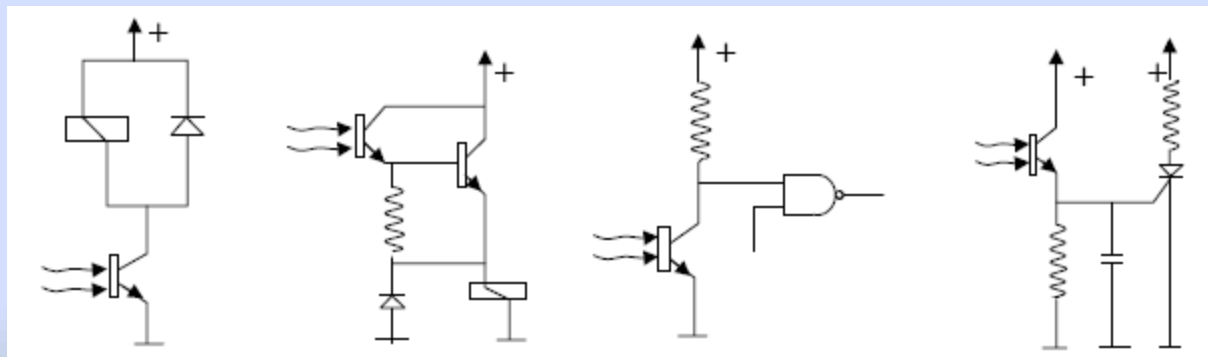
$$I_{cp} = \frac{(\beta + 1)q\eta(1 - R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda \Phi_0$$

# Mạch đo

Phototranzito có thể dùng làm bộ chuyển mạch, hoặc làm phần tử tuyến tính. Ở chế độ chuyển mạch nó có ưu điểm so với photodiode là cho phép sử dụng một cách trực tiếp dòng chạy qua tương đối lớn. Ngược lại, ở chế độ tuyến tính, mặc dù cho độ khuếch đại nhưng người ta thích dùng photodiode vì nó có độ tuyến tính tốt hơn.

- Phototranzito chuyển mạch:

Trong trường hợp này sử dụng thông tin dạng nhị phân: có hay không có bức xạ, hoặc ánh sáng nhỏ hơn hay lớn hơn ngưỡng. Tranzito chặn hoặc bảo hoà cho phép điều khiển trực tiếp (hoặc sau khi khuếch đại) như một role, điều khiển một cổng logic hoặc một thyristo (hình 2.21).



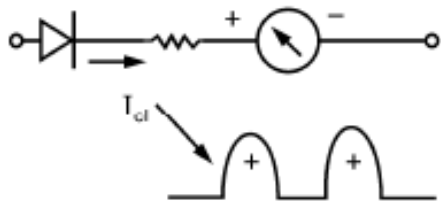
Hình 2.21 Photodiode trong chế độ chuyển mạch  
a) Role b) Role sau khuếch đại c) Cổng logic d) Thyristo

# Đo dòng điện xoay chiều

- Phương pháp chỉnh lưu bằng diod

Dòng điện qua diod nối tiếp với cơ cấu từ điện là dòng điện xoay chiều đã chỉnh lưu thành dòng DC. Trị trung bình của dòng điện chỉnh lưu:

$$I_{cltb}^* = \frac{1}{T} \int_0^T i_{cl} dt \leq I_{\max} \quad (2.16)$$

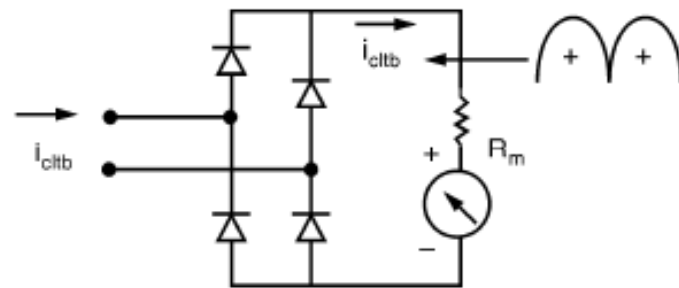


Hình 2.16

Dòng chỉnh lưu qua cơ cấu

Ví dụ: Dòng điện AC:  $V_{AC} = I_m \sin \omega t$

Khi đó:  $i_{cl} = I_m \sin \omega t : (0 \leq t \leq \frac{T}{2})$ ;  $i_{cl} = 0 : (\frac{T}{2} \leq t \leq T)$ .

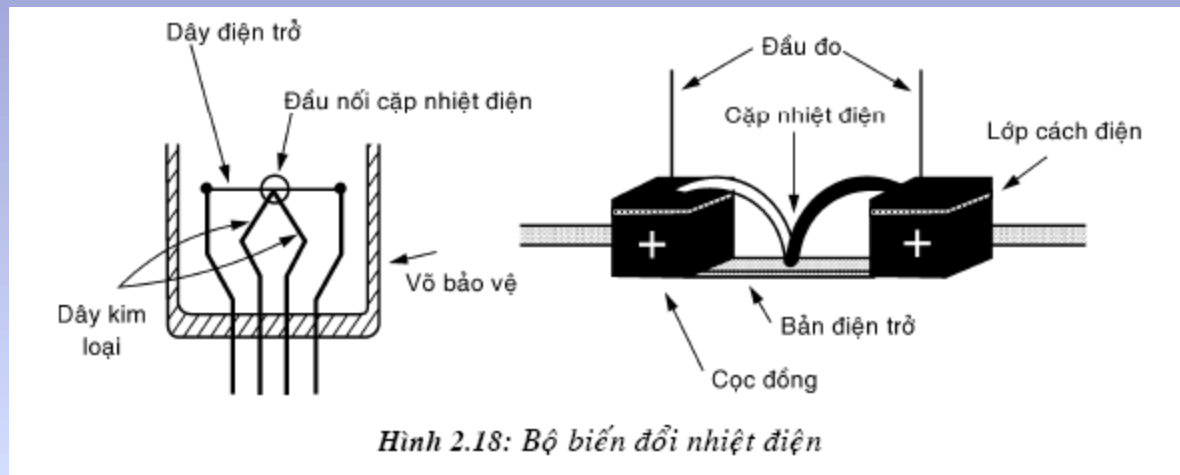


Hình 2.17

Cầu chỉnh lưu diod

Cầu diod (H.2.17). Dòng điện xoay chiều được chỉnh lưu ở hai bán kỳ, khi đó trị chỉnh lưu trung bình:  $I_{cltb} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{cl} dt$ .

# Phương pháp biến đổi nhiệt điện



Dùng phương pháp biến đổi nhiệt điện: Bộ biến đổi nhiệt điện (H.2.18) gồm có dây điện trở được đốt nóng nhờ trị hiệu dụng của dòng điện xoay chiều cần đo. Cặp nhiệt điện (*thermocouple*) được cung cấp nhiệt lượng do dòng điện này sẽ tạo ra điện áp một chiều (dòng điện DC) cho cơ cấu điện tử:

$$E_o(DC) = K_T R I_{hd}^2 \quad (2.17)$$

với:  $I_{hd}$  - trị số hiệu dụng của dòng điện AC

$R$  - điện trở của dây đốt nóng

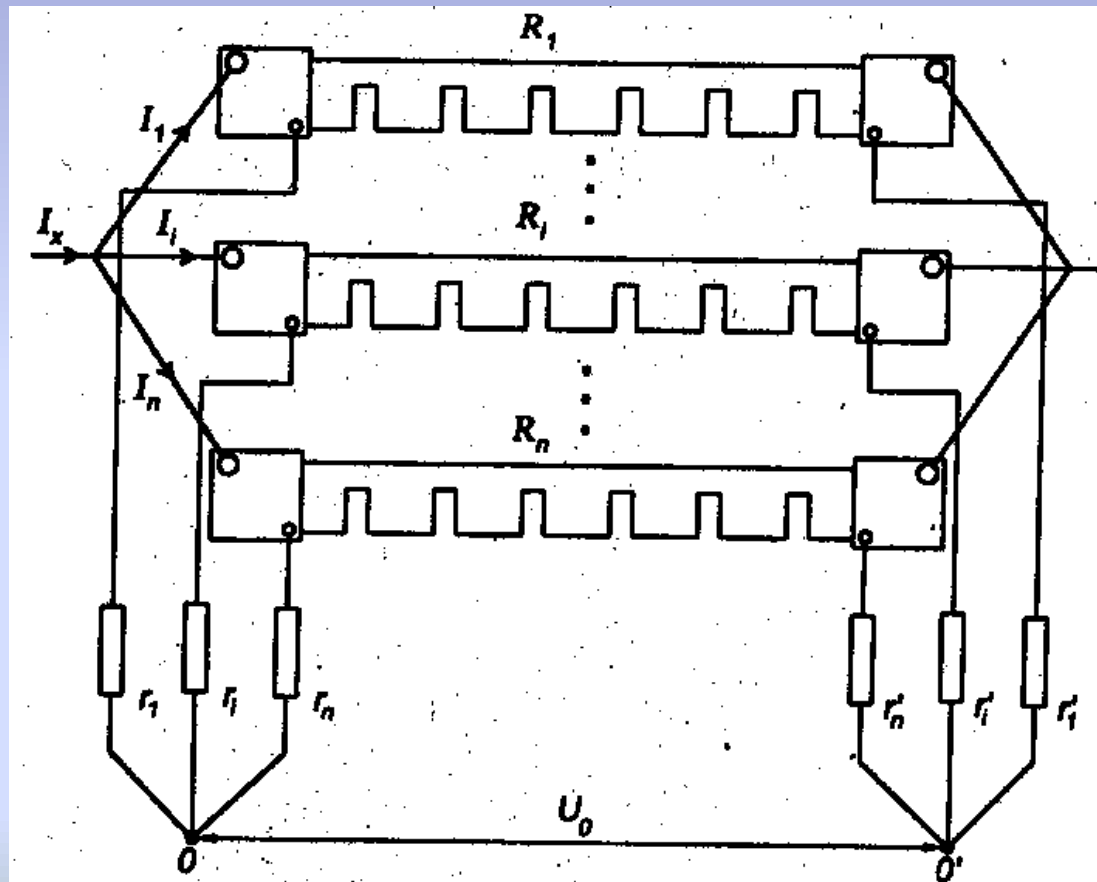
$K_T$  - hằng số tỉ lệ của bộ biến đổi nhiệt điện.

Khi sử dụng bộ biến đổi chỉ dùng trong khoảng tuyến tính của đặc tuyến  $E_o$  theo  $I_{hd}$ . Phương pháp biến đổi nhiệt điện có ưu điểm là không phụ thuộc vào dạng của tín hiệu AC và tần số. Do đó để cho dòng điện có tần số cao, dạng bất kỳ, người ta thường dùng bộ biến đổi này.



# Đo dòng điện lớn (1 chiều)

Ghép song song các sun



Hình 8-14 : Ghép song song các sun.

# Đo dòng 1 chiều lớn

Ta có thể dùng các phương pháp và thiết bị đo như sau :

a) Ghép song song các sun (h,8-14)

$I_x = I_1 + I_2 + \dots + I_i + \dots + I_n$  : dòng điện cần đo ;

$I_1 ; I_2 ; \dots$  dòng định mức ghi trên sun ;

$R_1 ; R_2 ; \dots$  điện trở sun tương ứng ;

$r_1 ; r_2 ; \dots ; r'_1 ; r'_2 ; \dots$  được mắc tương ứng với  $R_1 ; R_2 ; \dots$  trong mạch áp theo quan hệ.

$\frac{r_1}{R_1} = \frac{r_2}{R_2} = \dots = \frac{r_i}{R_i}$  sao cho dòng qua các  $r_i, r'_i$  rất nhỏ so với dòng qua sun.

$I_x = \sum_{i=1}^n I_i$  ;  $U_0$  : điện áp rơi trên các sun.

Từ đây bằng phương pháp gián tiếp ta sẽ đo được dòng điện cần đo

$$I_x = U_0 \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Phương pháp này đơn giản nhưng không an toàn cho người sử dụng.

# Đo từ trường sinh ra quanh dây dẫn

Trong lý thuyết trường điện từ ta có các công thức biểu hiện mối liên hệ giữa các thông số từ trường và điện trường :

$$B = \frac{\phi}{S} ;$$

$$\phi = \frac{F}{R_m} = \frac{I.W}{R_m}$$

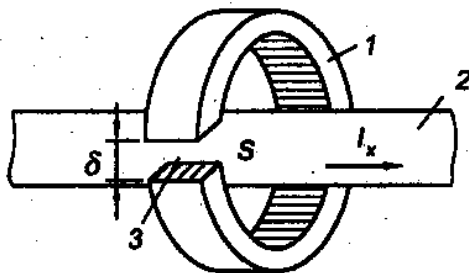
Trong đó  $B$  : từ cảm ;  $\phi$  : từ thông ;  $S$  : tiết diện mà từ thông xuyên qua,  $F$  : lực từ ;  $R_m$  : Từ trở của mạch từ ;  $I$  : dòng điện chạy trong cuộn dây tạo ra lực từ  $F$  ;  $W$  : số lượng vòng dây quấn trên mạch từ.

$$R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$$

$\delta$  : khoảng cách giữa hai cực của mạch từ hở (khe hở không khí);

$\mu_0$  : hệ số thẩm từ của không khí;

$S$  : tiết diện của cực từ.



Hình 8-15 :

1. Mạch từ hình xuyên ;
2. Dây dẫn điện để dòng  $I_x$  chạy qua ;
3. Khe hở không khí.

# Đo từ trường sinh ra quanh dây dẫn

Nếu số lượng vòng dây  $W = 1$  ; biến đổi các biểu thức trên ta sẽ có :

$B = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot I_x$  . Từ đây ta thấy rằng có thể đo từ cảm  $B$  rồi suy ra dòng  $I_x$  .

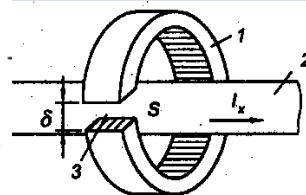
Muốn đo dòng  $I_x$  ta phải tạo mạch từ trở hình xuyên và lồng dây dẫn qua mạch từ này (h.8-15).

Mạch từ hình xuyên được tạo bởi vật liệu từ mềm (có  $\mu$  lớn) để cho từ trở của mạch từ ( $r_m$ ) nhỏ hơn nhiều so với từ trở  $R_m$  của khe hở không khí, có thể bỏ qua  $r_m$  .

Khi dòng  $I_x$  chạy trong dây dẫn thì trong khe hở không khí (như chứng minh ở trên) sẽ có từ cảm  $B$  :  $B = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot I_x$  . Với khe hở không khí nhất định thì  $\mu_0$  - const và  $\delta$  - const.

Ta đo  $B$  sẽ suy ra  $I_x$  . Đo  $B$  bằng các thiết bị đo từ hoặc bằng chuyển đổi Hall.

Sai số chủ yếu của phương pháp này phụ thuộc vào tính chất phi tuyến của lõi sắt từ.



Hình 8-15 :

- 1. Mạch từ hình xuyên ;
- 2. Dây dẫn điện để dòng  $I_x$  chạy qua ;
- 3. Khe hở không khí.

# Hiệu ứng Hall

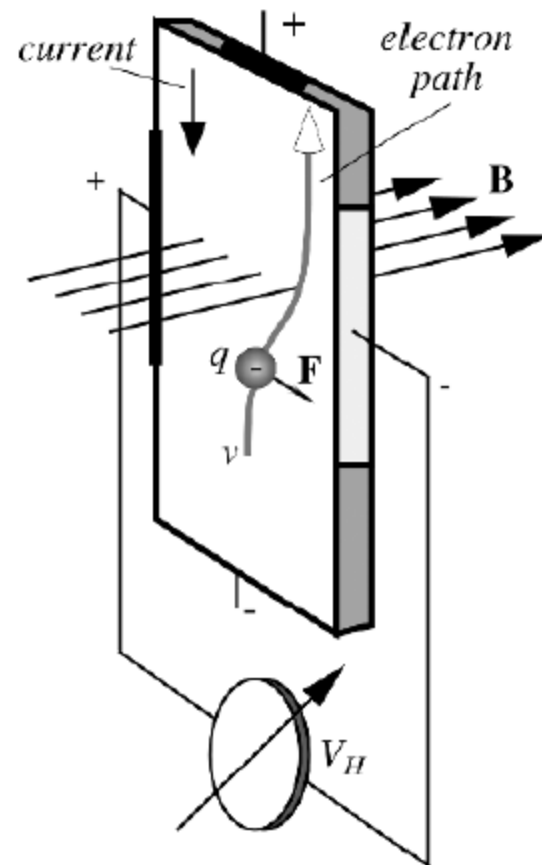
- Sức điện động Hall được tính

$$V_H = h i B \sin \alpha$$

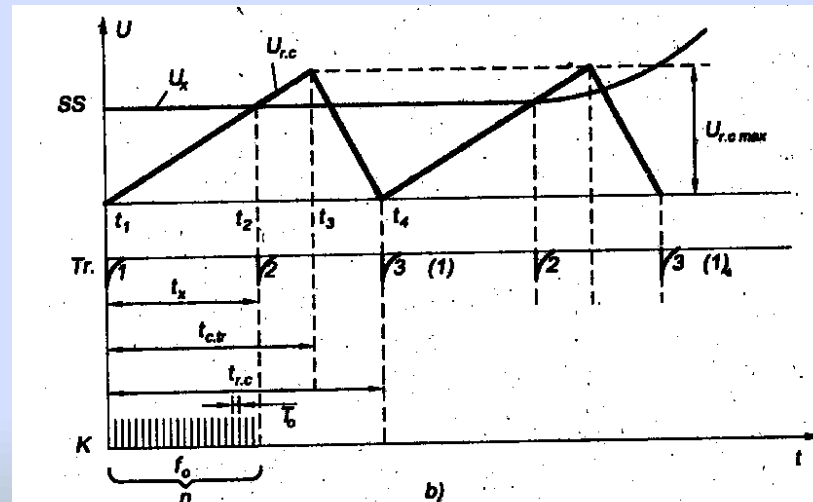
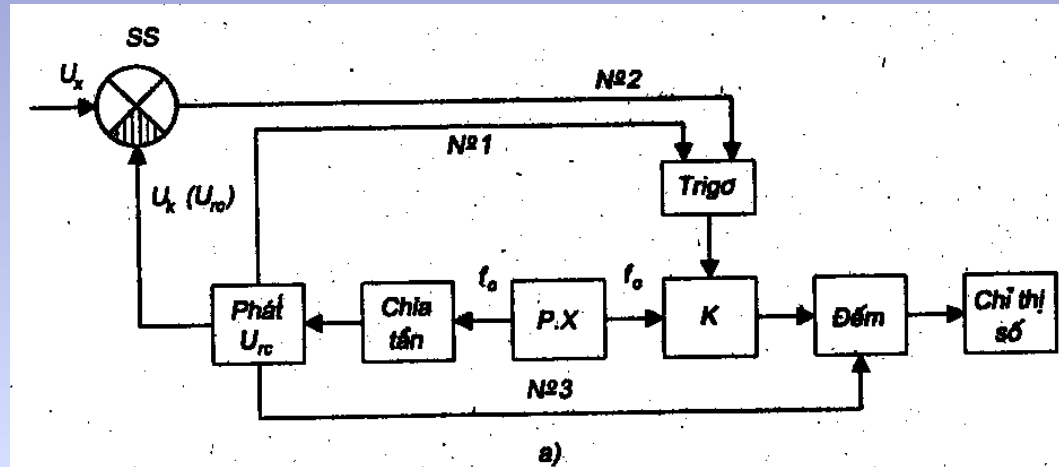
- Cường độ điện trường H

$$H = \frac{1}{N c q}$$

- Trong đó : N – số điện tử tự do;
  - Cường độ ánh sáng c



# Vôn mét chỉ thị số (chuyển đổi theo thời gian)



Hình 9-23 : a) Sơ đồ khối của vôn mét số chuyển đổi thời gian một nhịp ;  
b) Biểu đồ thời gian.

# Nguyên lý (

Các xung N°1 làm nhiệm vụ khởi động vônmet ; N°2 tác động vào trigơ để khoá (K); N°3 xoá kết quả.

Vônmet làm việc như sau :

Mở máy, máy phát xung chuẩn qua bộ chia tần khởi động máy phát xung răng cưa. Từ đầu ra máy phát xung răng cưa có  $U_{rc}$  ( $U_k$ ) đi đến bộ so sánh để so với  $U_x$  cần đo ở đầu vào. Đồng thời cũng từ đầu ra của bộ phát áp răng cưa ta có xung thứ nhất đến trigơ, đặt trigơ ở trạng thái thích hợp thông khoá (K) cho phép các xung mang tần số chuẩn ( $f_0$ ) từ phát xung qua khoá (K) đến bộ đếm và chỉ thị số. Tại thời điểm  $t_2$  khi  $U_x = U_{rc}$ ; thiết bị so sánh phát xung thứ 2 (N°2) tác động trigơ khoá (K). Thời gian từ  $t_1$  đến  $t_2$  tương ứng với  $t_x$ . Từ đây ta có mối quan hệ :

$$\frac{t_x}{t_{cfr}} = \frac{U_x}{U_{r.cmax}} \rightarrow t_x = \frac{t_{c.fr}}{U_{r.cmax}} \cdot U_x$$