



BÀI GIẢNG MÔN

CƠ SỞ TRUYỀN THÔNG SỢI QUANG

Bộ môn:

Thông tin quang - Khoa VT1

Năm biên soạn:

2010

Nội dung

Chương

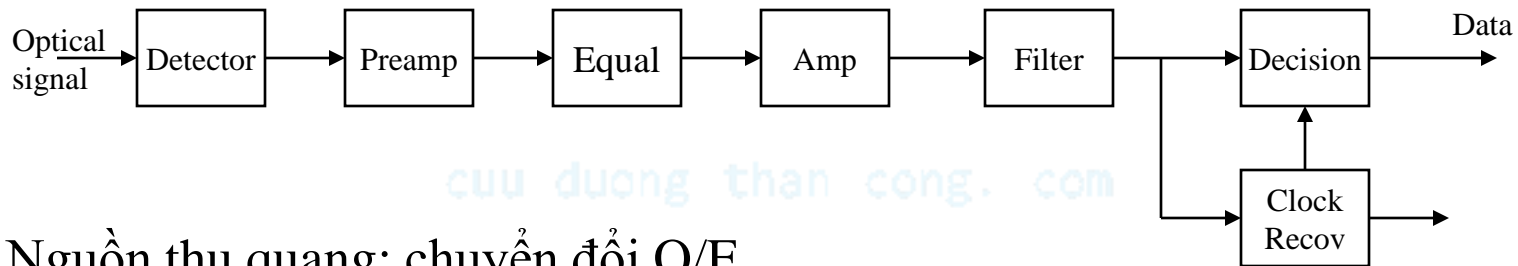
- 1 Tổng quan về kỹ thuật thông tin quang
- 2 Sợi quang
- 3 Bộ phát quang
- 4 Bộ thu quang
- 5 Một số vấn đề trong thiết kế truyền TTQ đơn kênh điểm – điểm

Chương 4- Bộ thu quang

- ✦ **Các khái niệm cơ bản**
- ✦ **Các phần tử chuyển đổi quang- điện bán dẫn (Photodiode)**
- ✦ **Các bộ tiền khuếch đại**
- ✦ **Nhiều trong bộ thu quang**
- ✦ **Các tham số của bộ thu quang**

4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (1)

❖ Mạch thu quang:

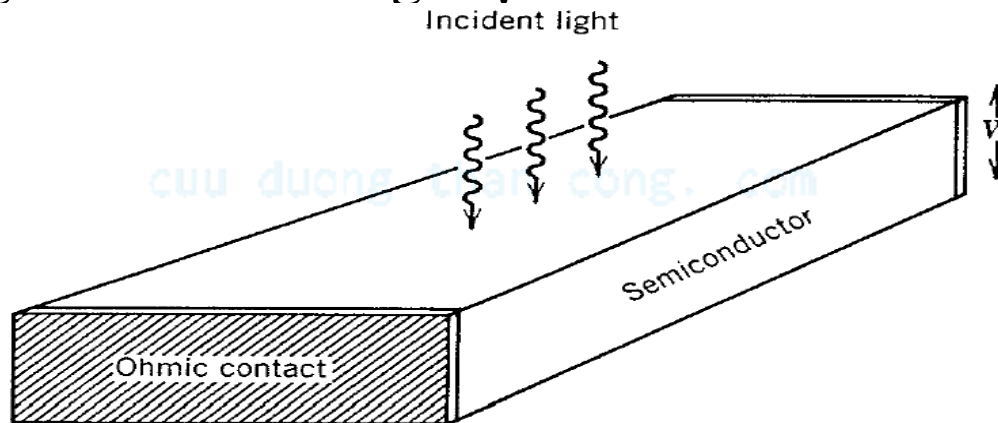


- . Nguồn thu quang: chuyển đổi O/E
- . Bộ tiền khuếch đại: chuyển đổi I/V và khuếch đại, đảm bảo nhiễu thấp.
- . Bộ cân bằng: kết hợp với tiền khuếch đại đảm bảo băng tần bộ thu
- . Bộ khuếch đại: khuếch đại và giữ ổn định tín hiệu điện đầu ra
- . Bộ lọc: hạn chế bớt nhiễu, loại bỏ các thành phần tần số không muốn
- . Mạch quyết định: Tái sinh tín hiệu số

4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (2)

❖ Độ đáp ứng:

- . Quá trình thu tín hiệu quang: hấp thụ năng lượng photon
- . Đối với vật liệu bán dẫn: năng lượng photon đủ lớn $h\nu \geq E_g \Rightarrow$ photon bị hấp thụ \Rightarrow sinh ra cặp e - h tự do.
- . Dưới tác động của điện trường đặt vào \Rightarrow các điện tử và lỗ trống bị quét ra mạch ngoài sinh ra dòng điện.



4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (3)

❖ Độ đáp ứng:

. Dòng quang điện tỉ lệ trực tiếp với công suất quang vào

$$I_p = RP_{in}, \quad (4.1)$$

Trong đó: R - độ đáp ứng (độ nhạy) của nguồn thu (đơn vị: A/W)

. Hiệu suất lượng tử:

$$\eta = \frac{\text{electron generation rate}}{\text{photon incidence rate}} = \frac{I_p/q}{P_{in}/h\nu} = \frac{h\nu}{q} R, \quad (4.2)$$

. Độ đáp ứng: $R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta \lambda}{1.24}, \quad (4.3)$

⇒ Hiệu suất chuyển đổi O/E. R tăng theo bước sóng.

4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (4)

❖ Độ đáp ứng:

. Sự phụ thuộc η vào λ : liên quan đến hệ số hấp thụ

Giả sử lớp bán dẫn bọc lớp chống phản xạ \Rightarrow công suất truyền qua lớp bán dẫn:

$$P_{tr} = \exp(-\alpha W) P_{in}. \quad (4.4)$$

. Công suất bị hấp thụ:

$$P_{abs} = P_{in} - P_{tr} = [1 - \exp(-\alpha W)] P_{in}. \quad (4.5)$$

. Mỗi photon bị hấp thụ \Rightarrow cặp e-h tự do được tạo ra \Rightarrow Hiệu suất lượng tử:

$$\eta = P_{abs}/P_{in} = 1 - \exp(-\alpha W). \quad (4.6)$$

$\Rightarrow \eta = 0$ khi $\alpha = 0$, $\eta \rightarrow 1$ khi $\alpha W \gg 1$.

4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (5)

❖ Độ đáp ứng:

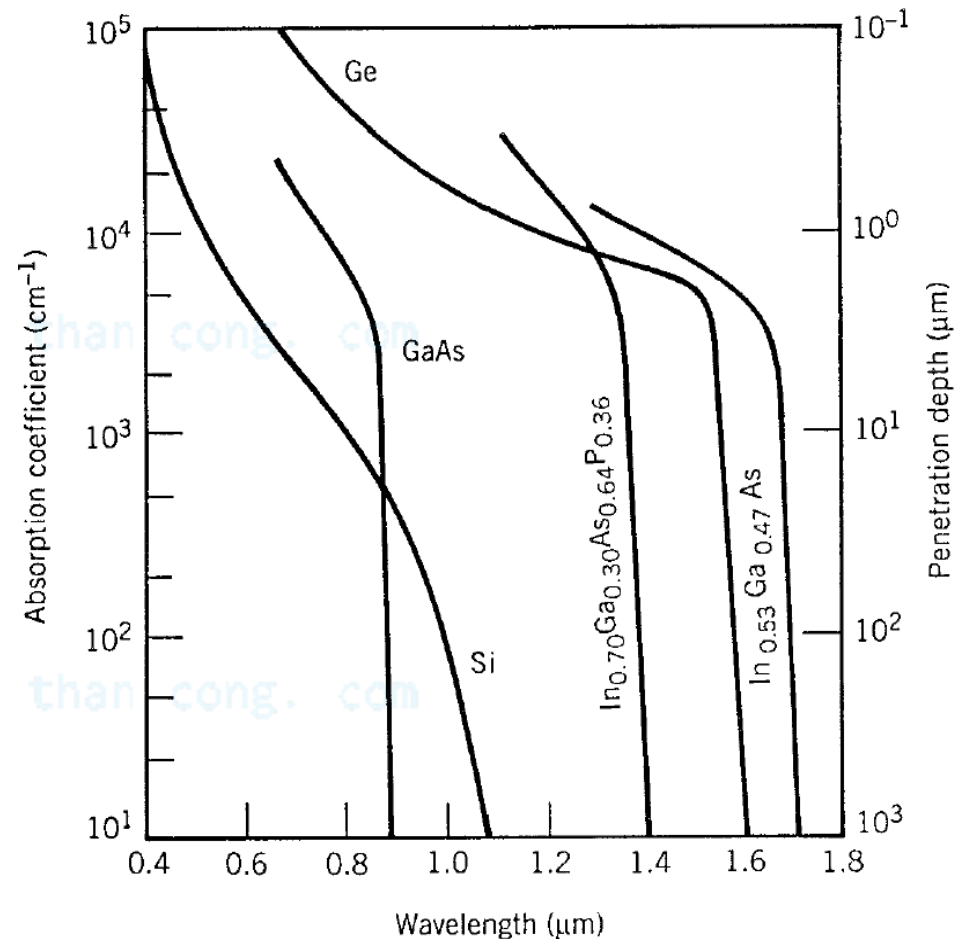
. Sự phụ thuộc α vào λ :

$\alpha = 0$ tại $\lambda = \lambda_c$

α tăng khi λ giảm

α lớn $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow$

$\eta \rightarrow 1$ khi $W \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$



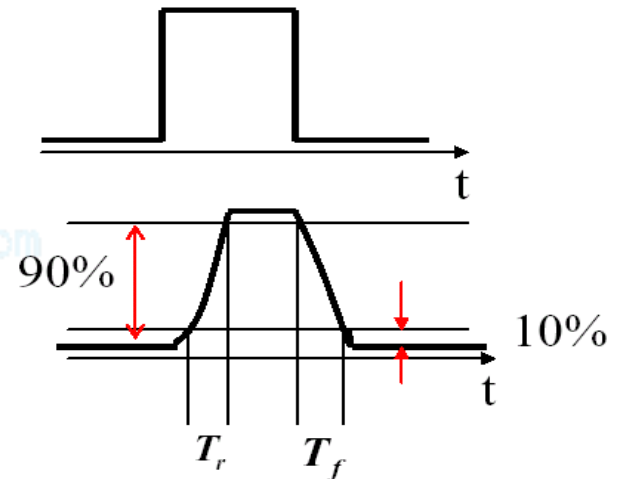
4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (6)

❖ Thời gian lên và độ rộng băng tần:

- . Độ rộng băng tần của photodiode: Tốc độ tại đó nó đáp ứng với sự thay đổi công suất quang vào.
- . Thời gian lên: thời gian tại đó dòng tăng từ 10 đến 90 % giá trị đỉnh khi công suất quang vào dạng bậc.

Tr phụ thuộc vào:

- Thời gian mà các điện tử và lỗ trống dịch chuyển tới các điện cực ngoài.
- Thời gian đáp ứng của mạch điện



4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (7)

❖ Thời gian lên và độ rộng băng tần:

. Thời gian lên của mạch tuyến tính: thời gian đáp ứng tăng từ 10 đến 90 % giá trị đỉnh khi đầu vào dạng bậc.

Điện áp đầu vào mạch RC thay đổi tức thời từ 0 đến V_0

Điện áp đầu ra thay đổi:

$$V_{\text{out}}(t) = V_0[1 - \exp(-t/RC)], \quad (4.7)$$

Trong đó: R - điện trở, C - điện dung của mạch RC

. Thời gian lên: $T_r = (\ln 9)RC \approx 2.2\tau_{RC}$, (4.8)

Trong đó: $\tau_{RC} = RC$ - hằng số thời gian của mạch RC

4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (8)

- ❖ Thời gian lên và độ rộng băng tần:
 - . Thời gian lên của photodiode:

$$T_r = (\ln 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC}), \quad (4.9)$$

Trong đó: τ_{tr} - thời gian chuyển tiếp, τ_{RC} - hằng số thời gian của mạch RC tương đương.

- . Thời gian chuyển tiếp: thời gian mất trước khi các hạt tải được gom sau khi sinh ra bởi hấp thụ photon.

Thời gian chuyển tiếp cực đại: bằng với thời gian một điện tử mất để đi qua vùng hấp thụ $\Rightarrow \tau_{tr}$ giảm khi giảm W

Tuy nhiên η giảm mạnh khi $\alpha W < 3 \Rightarrow$ Có sự bù trừ giữa độ rộng băng tần và độ đáp ứng (tốc độ và độ nhạy) của PD

4.1 CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN (9)

❖ Thời gian lên và độ rộng băng tần:

. Hằng số thời gian: giới hạn băng tần vì điện ký sinh.

. Giá trị τ_{tr} và τ_{RC} phụ thuộc vào cấu trúc PD và có thể biến đổi trên một dải rộng.

. Độ rộng băng tần của PD:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1} \quad (4.10)$$

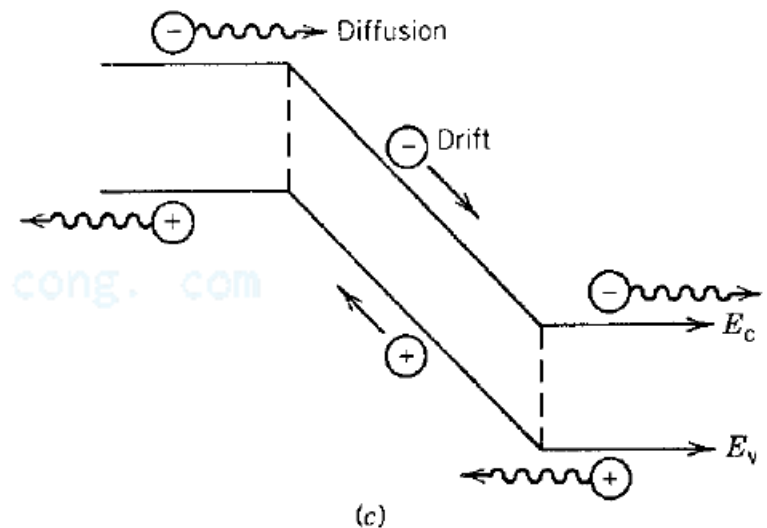
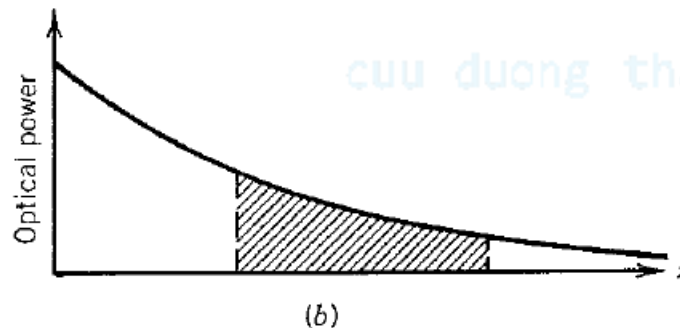
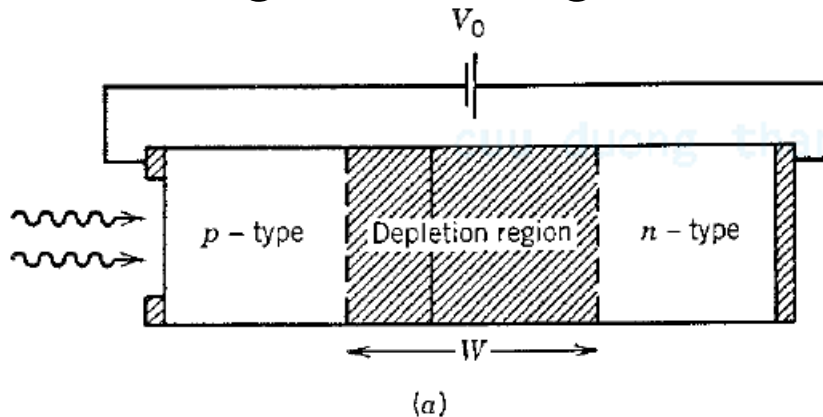
để hoạt động ở 10 Gb/s trở lên: τ_{tr} và $\tau_{RC} < 10$ ps

. Bên cạnh đó, một tham số quan trọng của PD là dòng tối: sinh ra khi không có tín hiệu quang.

Một PD tốt: $I_d < 10$ nA

4.2 DIODE THU QUANG P-N (1)

- . Cấu trúc: tiếp giáp p-n phân cực ngược \Rightarrow vùng nghèo
- . Khi không có ánh sáng chiếu vào \Rightarrow không có dòng

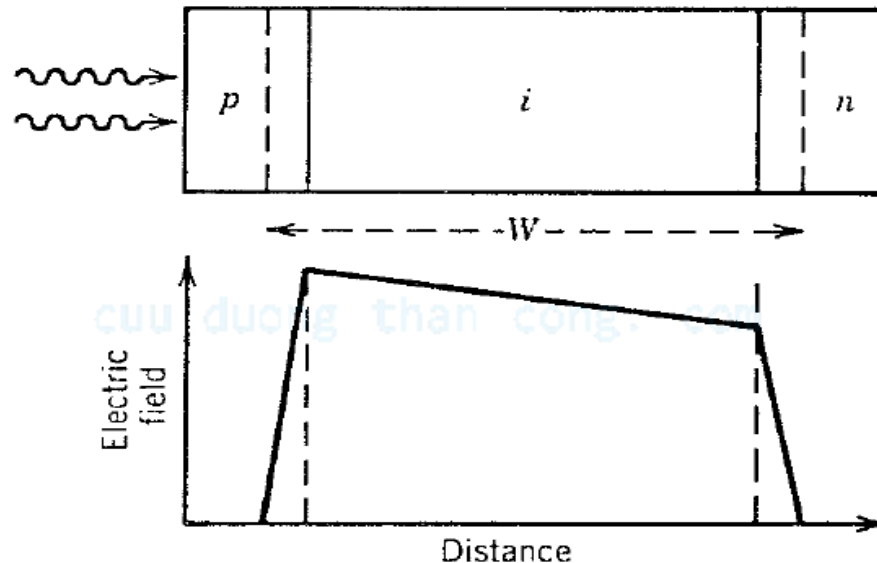


4.2 DIODE THU QUANG P-N (2)

- . Khi có ánh sáng chiếu vào \Rightarrow sinh ra cặp e-h nhờ hấp thụ \Rightarrow Dưới tác động của điện trường ngoài: e dịch chuyển về phía n, h dịch chuyển về phía p \Rightarrow tạo dòng chạy ở mạch ngoài (dòng quang điện)
- . Các hạt tải sinh ra trong vùng nghèo (vùng tập trung điện trường lớn) trôi nhanh chóng về phía n hoặc p.
- . Các hạt tải sinh ra ngoài vùng nghèo:
 - Các điện tử sinh ra trong vùng p phải khuếch tán tới biên vùng nghèo trước khi trôi về phía n.
 - Các lỗ trống sinh ra trong vùng n phải khuếch tán tới biên vùng nghèo trước khi trôi về phía p.

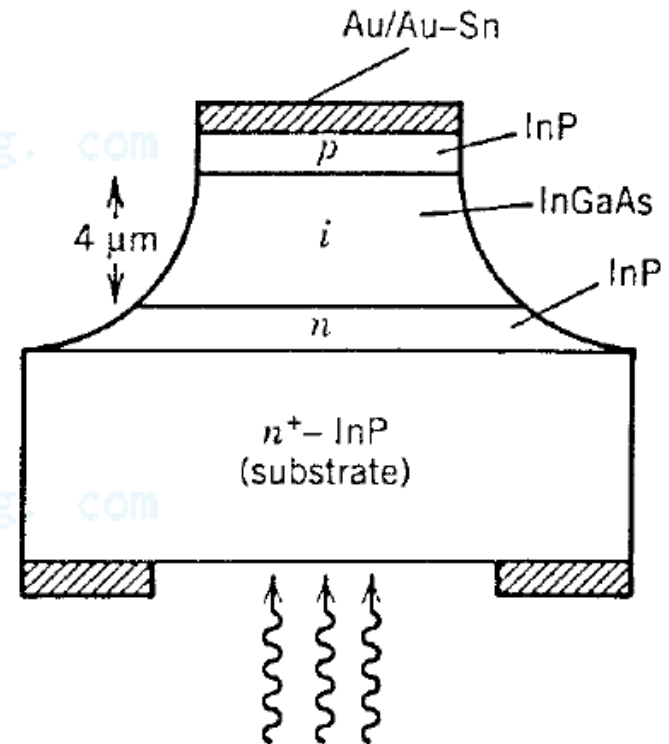
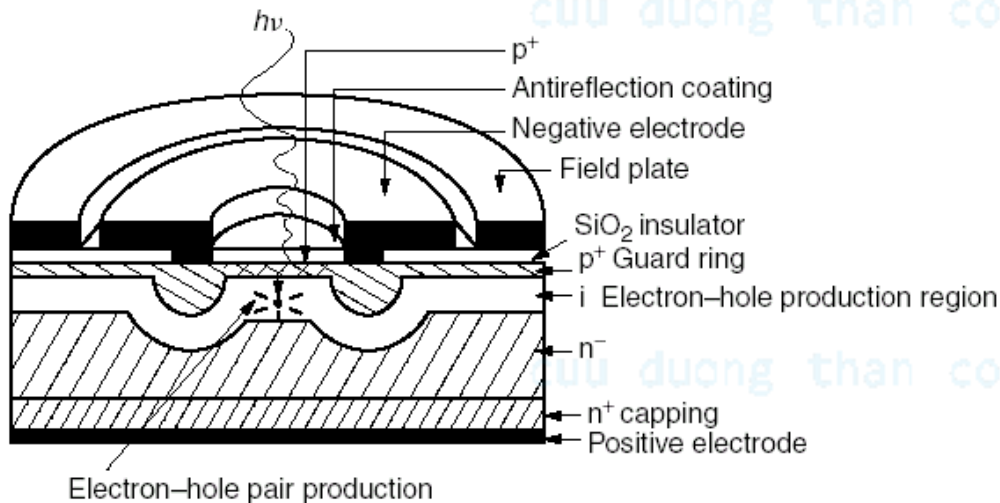
4.3 DIODE THU QUANG PIN (1)

- . Cấu trúc: gồm 3 lớp, lớp i được xen giữa lớp p và n
- . Lớp i có điện trở cao \Rightarrow hầu hết điện áp rơi trên vùng này \Rightarrow thành phần trôi \gg thành phần khuếch tán.
- . Độ rộng W được quyết định bởi độ dày lớp i



4.3 DIODE THU QUANG PIN (2)

- . Si, Ge: $W \sim 20\text{-}50 \mu\text{m} \Rightarrow \tau_{\text{tr}} > 200 \text{ ps}$
- . InGaAs: $W \sim 3\text{-}5 \mu\text{m} \Rightarrow \tau_{\text{tr}} \sim 10 \text{ ps} \Rightarrow B \sim 10 \text{ GHz} (\tau_{\text{tr}} \gg \tau_{\text{RC}})$



4.3 DIODE THU QUANG PIN (3)

. Nâng cao tính năng của PIN:

- Cấu trúc dị thể kép \Rightarrow loại bỏ dòng khuếch tán
- Hộp cộng hưởng F-P \Rightarrow tăng hiệu suất lượng tử
- Sử dụng ống dẫn sóng quang \Rightarrow tăng hiệu suất lượng tử, giảm điện dung kí sinh và điện trở nội nối tiếp.

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R	A/W	0.4–0.6	0.5–0.7	0.6–0.9
Quantum efficiency	η	%	75–90	50–55	60–70
Dark current	I_d	nA	1–10	50–500	1–20
Rise time	T_r	ns	0.5–1	0.1–0.5	0.02–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Bias voltage	V_b	V	50–100	6–10	5–6

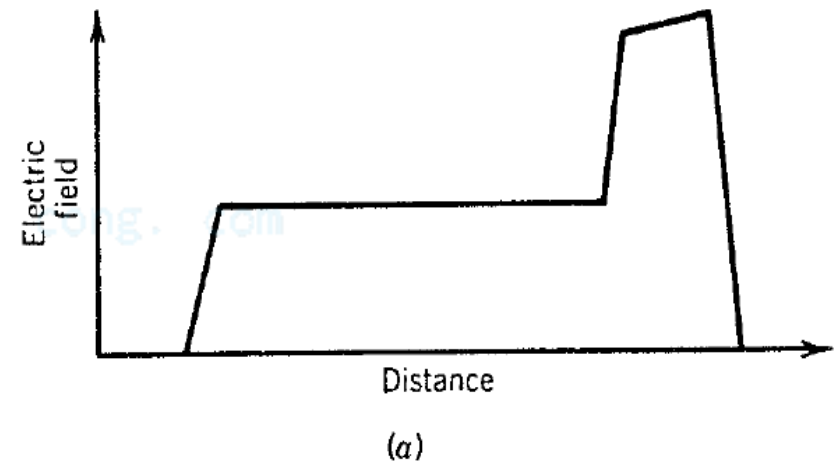
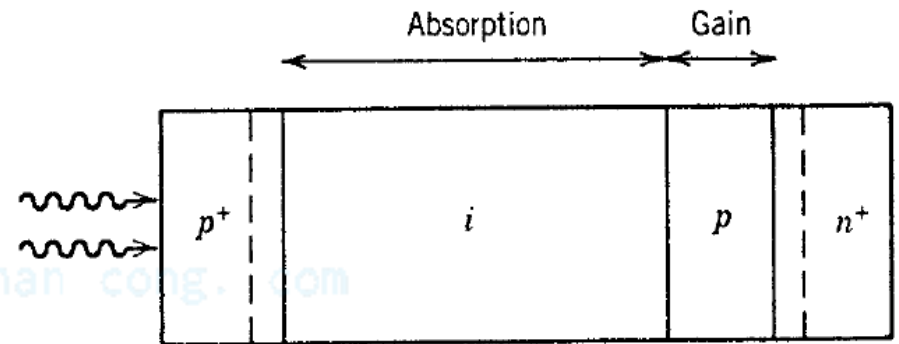
4.4 DIODE THU QUANG APD (1)

. Cấu trúc: gồm 4 lớp, bổ xung thêm 1 lớp p giữa lớp i và n⁺.

. Điện trường cao ở vùng tiếp giáp p-n⁺ ⇒ Vùng nhân

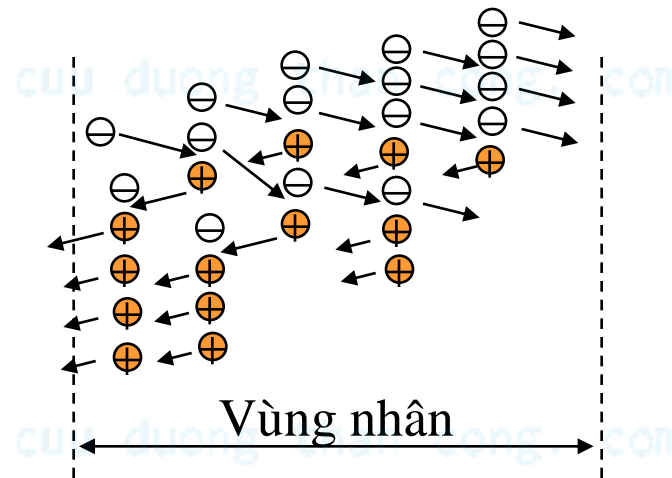
. Hoạt động:

- Hấp thụ chủ yếu tại vùng i
- Các e trôi qua i tới vùng p-n⁺ ⇒ Xảy ra quá trình nhân hạt tải (quá trình ion hoá do va chạm)



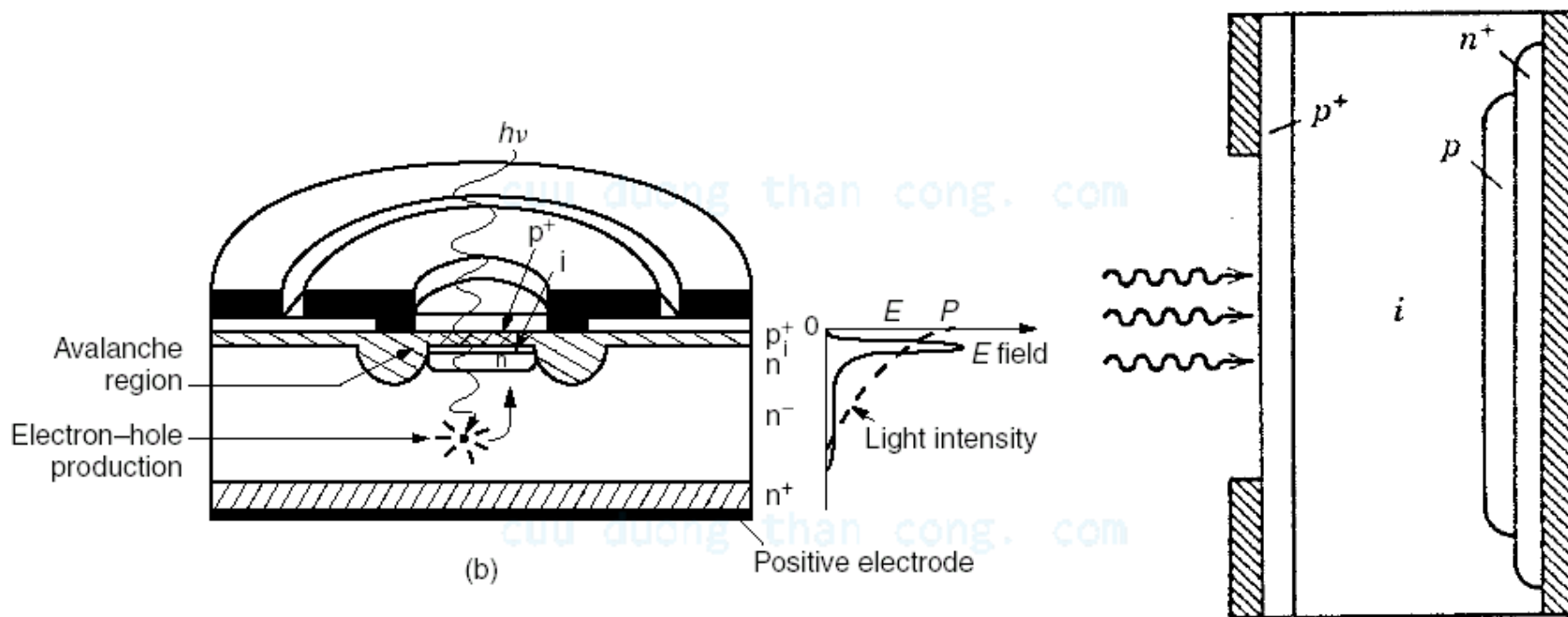
4.4 DIODE THU QUANG APD (2)

. Quá trình ion hoá do va chạm: Vùng nhân tồn tại điện trường đủ lớn (cường độ trường $> 3 \times 10^5$ V/cm) \Rightarrow gia tốc cho hạt tải có được năng lượng đủ lớn \Rightarrow sinh ra e-h mới do va chạm



. Tốc độ sinh hạt tải mới được đặc trưng bởi các hệ số ion hoá do va chạm α_e , α_h

4.4 DIODE THU QUANG APD (3)

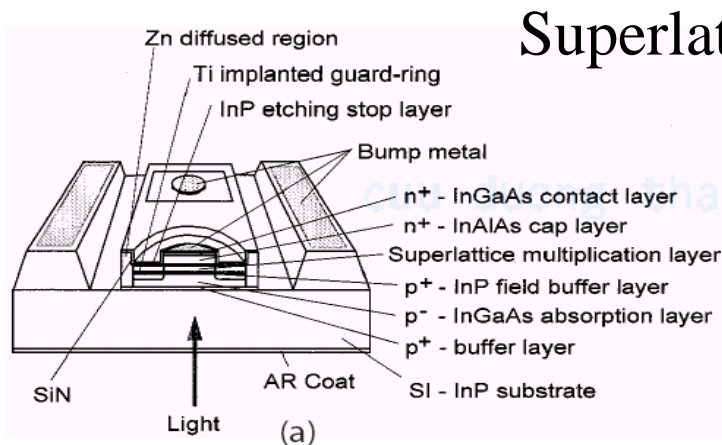
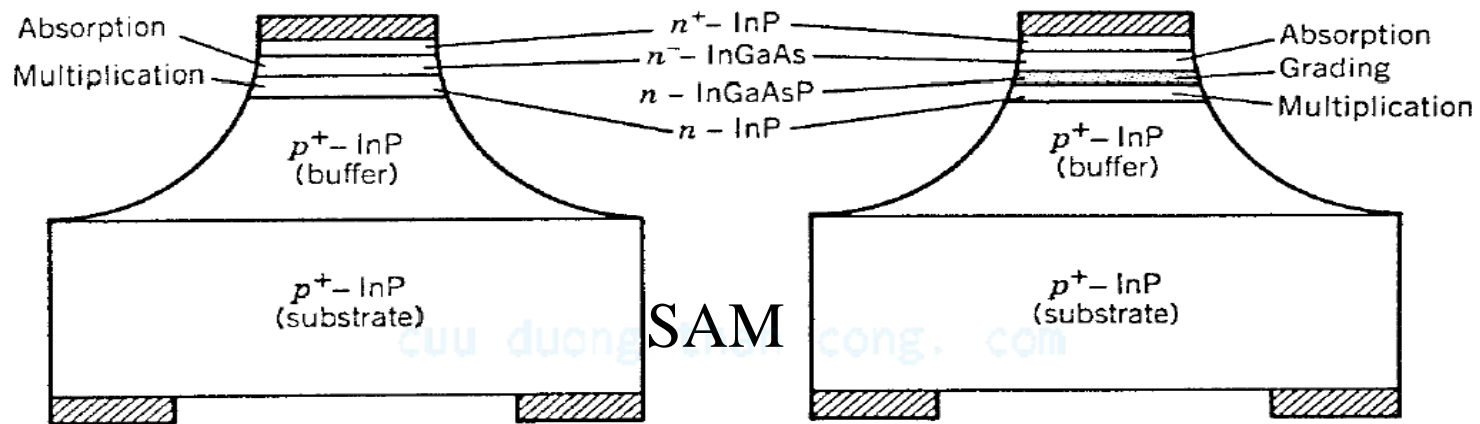


4.4 DIODE THU QUANG APD (4)

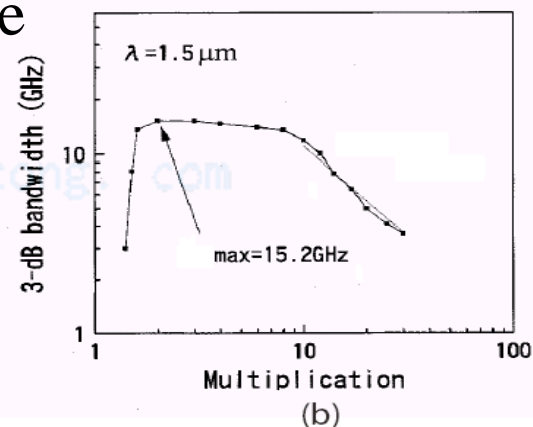
Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Responsivity	R_{APD}	A/W	80–130	3–30	5–20
APD gain	M	—	100–500	50–200	10–40
k -factor	k_A	—	0.02–0.05	0.7–1.0	0.5–0.7
Dark current	I_d	nA	0.1–1	50–500	1–5
Rise time	T_r	ns	0.1–2	0.5–0.8	0.1–0.5
Bandwidth	Δf	GHz	0.2–1	0.4–0.7	1–10
Bias voltage	V_b	V	200–250	20–40	20–30

- . Nâng cao tính năng của APD:
 - Cấu trúc vùng nhân và hấp thụ tách rời (SAM)
 - Cấu trúc vùng nhân, giảm dần và hấp thụ tách rời (SAGM)
 - Cấu trúc siêu mạng

4.4 DIODE THU QUANG APD (5)

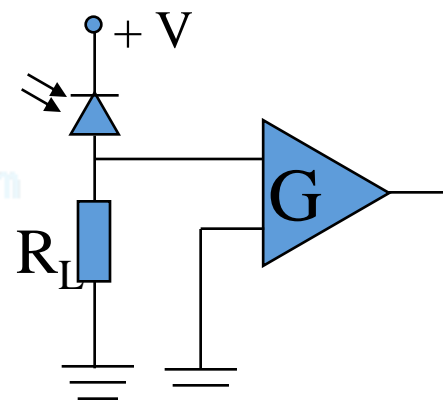
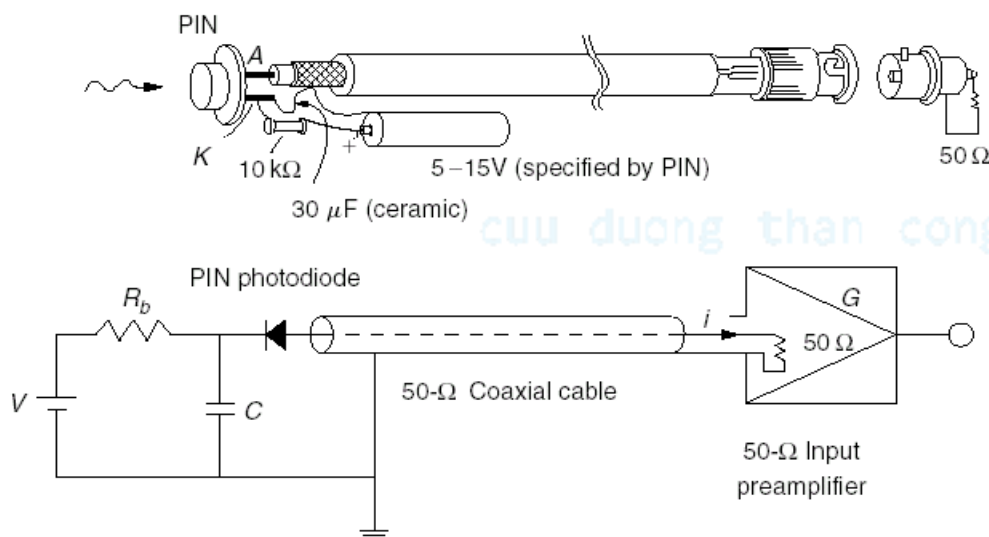


Superlattice



4.5 CÁC BỘ TIỀN KHUẾCH ĐẠI (1)

❖ Bộ tiền khuếch đại trở kháng thấp

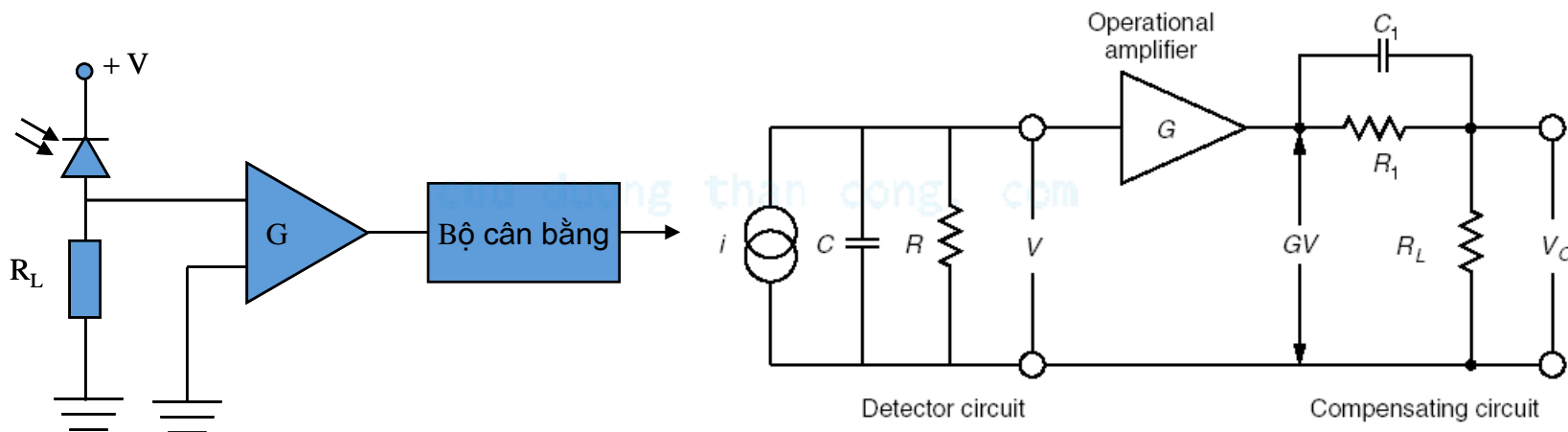


- . Nguồn PD hoạt động với bộ khuếch đại trở kháng thấp (trở kháng đầu vào $\sim 50 \Omega$) qua 1 cáp đồng trục.
- . Điện trở tải được chọn bằng với trở kháng đầu vào bộ khuếch đại.

4.5 CÁC BỘ TIỀN KHUẾCH ĐẠI (2)

❖ Bộ tiền khuếch đại trở kháng cao

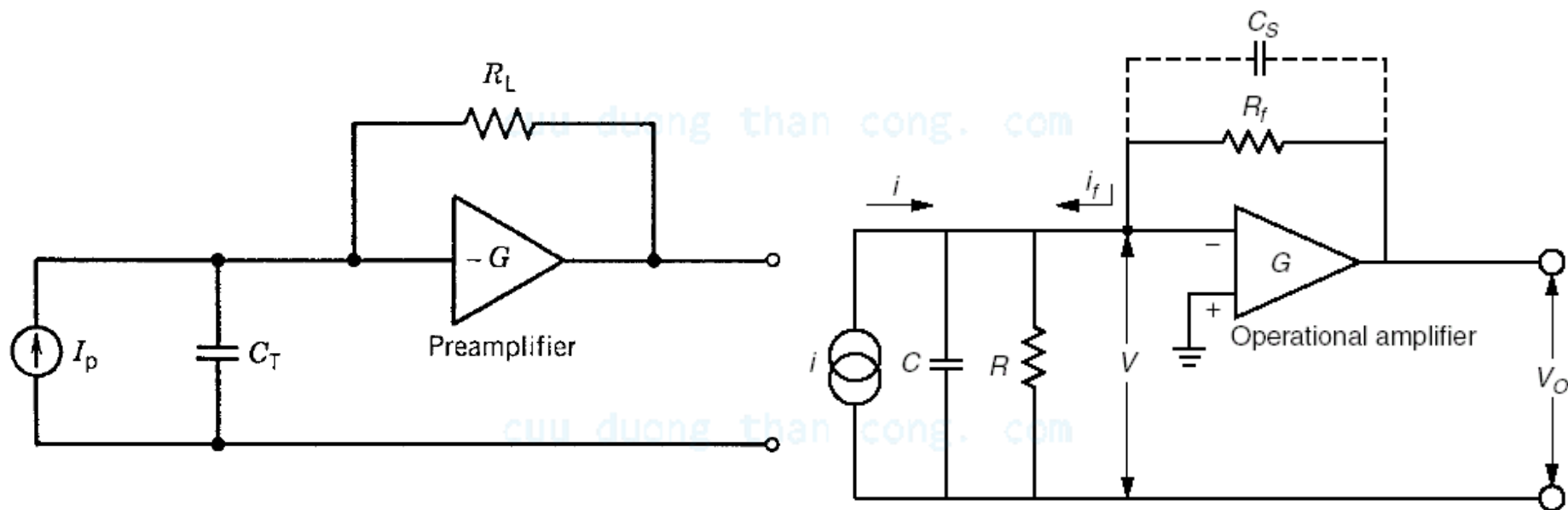
- . Trở kháng tải cao \Rightarrow Giảm nhiễu nhiệt, tần số cắt của đáp ứng tần nhỏ \Rightarrow Phải sử dụng thêm mạch cân bằng (mạch $// R_1 C_1$)
- . Điện áp đầu ra được phân chia giữa trở kháng của mạch $R_1 C_1$ và R_L
- . Mạch tương đương:



4.5 CÁC BỘ TIỀN KHUẾCH ĐẠI (3)

❖ Bộ tiền khuếch đại trở kháng cao

. Sử dụng mạch hồi tiếp âm



4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (1)

❖ Nhiều nơ:

- . Nguyên nhân: quá trình lượng tử hoá điện tích thành các hạt q hoặc tương đương với quá trình lượng tử hoá năng lượng ánh sáng thành các photon.
- . Các photon tới hoặc quá trình sinh các hạt tải bởi các photon là ngẫu nhiên được mô tả bởi thống kê Poisson.

cuu duong than cong. com

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (2)

❖ Nhiều nơ:

. Mật độ phổ của nhiễu nơ là không đổi và được xác định:

$$S_s(f) = qI_p \quad (4.11)$$

. Phương sai nhiễu:

$$\sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_s(f) df = 2qI_p \Delta f, \quad (4.12)$$

. Khi xét tới hàm truyền của các thành phần bộ thu:

$$\sigma_s^2 = 2qI_p \int_0^{\infty} |H_T(f)|^2 df = 2qI_p \Delta f, \quad (4.13) \quad \Delta f = \int_0^{\infty} |H_T(f)|^2 df \quad (4.14)$$

Trong đó: Δf - độ rộng băng tần nhiễu hiệu dụng.

I_p - dòng trung bình đầu ra PD, σ_s - dòng nhiễu rms

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (3)

❖ Nhiễu n^o:

. Đối với PIN: dòng sinh ra từ PD gồm 3 thành phần

$$I = I_p + I_b + I_d \quad (4.15)$$

Trong đó: I_p - dòng quang điện sinh ra do ánh sáng tới

I_b - dòng do quá trình bức xạ nền

I_d - dòng tối sinh ra khi không có bức xạ ánh sáng đi vào, do nhiệt ở lớp tiếp giáp và dòng dò bề mặt vì các khuyết tật.

. Đối với APD: quá trình nhân thác cũng đóng góp nhiễu

$$\sigma_s^2 = 2qM^2F_A(RP_{in} + I_d)\Delta f. \quad (4.16)$$

Trong đó: F_A - hệ số nhiễu trội, là hàm của M và phụ thuộc vào vật liệu, dạng cường độ trường E và tốc độ ion hoá của các hạt tải

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (4)

❖ Nhiều n²:

. Hệ số nhiều vượt:

$$F_A(M) = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M). \quad (4.17)$$

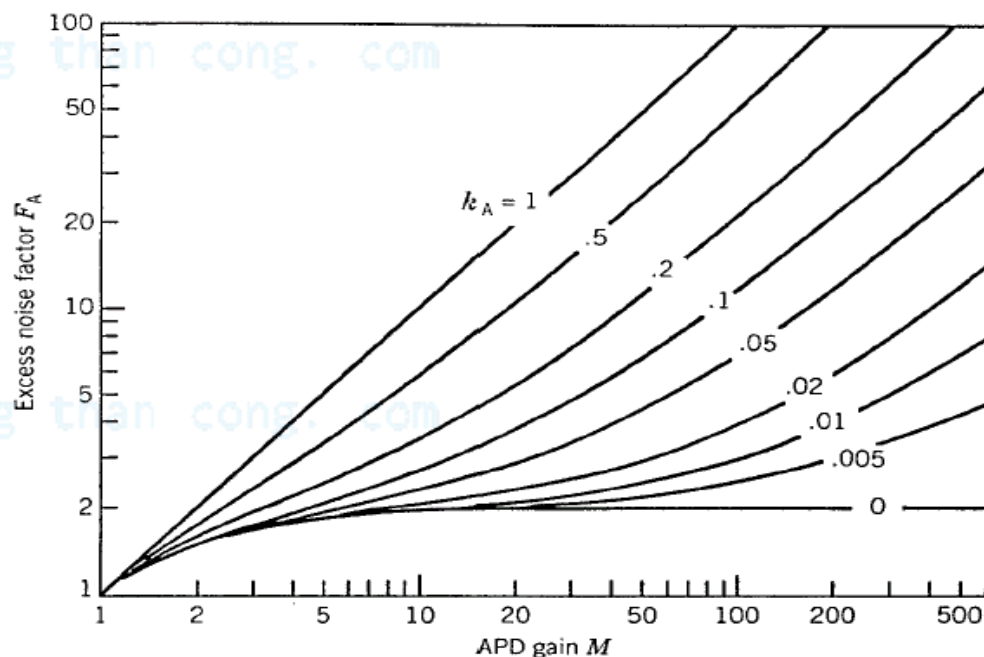
Gần đúng:

$$F_A \approx M^x \quad (4.18)$$

Si: $x \sim 0,3-0,5$

Ge: $x \sim 1$

InGaAs: $x \sim 0,5-0,7$



4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (5)

❖ Nhiều nhiệt:

. Tại nhiệt độ xác định, các điện tử chuyển động ngẫu nhiên trong vật dẫn (điện trở) \Rightarrow gây ra thăng giáng dòng (thành phần nhiễu bổ xung gọi là nhiễu nhiệt - nhiễu Johnson)

. Dòng quang điện sinh ra: $I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t),$ (4.19)

Trong đó: i_T - sự thăng giáng dòng gây ra bởi nhiễu nhiệt

. Mật độ phổ nhiễu: $S_T(f) = 2k_B T / R_L,$ (4.20)

Trong đó: k_B - hằng số Boltzman, T - nhiệt độ tuyệt đối, R_L - điện trở tải.

. Phương sai nhiễu: $\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_T(f) df = (4k_B T / R_L) \Delta f,$ (4.21)

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (6)

❖ Nhiều nhiệt:

- . Bộ thu quang gồm nhiều thành phần điện khác nhau \Rightarrow bổ sung nhiều nhiệt.
- . Nhiều bộ khuếch đại (KĐ): chủ yếu nhiều nhiệt (bổ xung phụ thuộc vào kiểu bộ tiền KĐ và bộ KĐ sử dụng).
- . Nhiều nhiệt ở các bộ KĐ khác nhau được đặc trưng qua đại lượng F_n - hình ảnh nhiều bộ khuếch đại

$$\sigma_T^2 = (4k_B T / R_L) F_n \Delta f. \quad (4.22)$$

Hệ số F_n đặc trưng cho sự tăng cường nhiều nhiệt bởi các điện trở khác nhau được sử dụng trong các bộ tiền khuếch đại và bộ khuếch đại chính.

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (7)

❖ Nhiễu tổng:

- . Dòng nhiễu tổng: cộng các đóng góp của nhiễu nơ và nhiễu nhiệt.
- . Vì $i_s(t)$ và $i_T(t)$ là quá trình ngẫu nhiên độc lập thống kê gần đúng dạng Gauss.
- . Phương sai dòng tổng:

$$\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_I^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + (4k_B T / R_L) F_n \Delta f. \quad (4.23)$$

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (8)

❖ Tỉ số tín hiệu trên nhiễu:

. Tỉ số SNR đặc trưng cho chất lượng của bộ thu quang:

$$\text{SNR} = \frac{\text{average signal power}}{\text{noise power}} = \frac{I_p^2}{\sigma^2}, \quad (4.24)$$

. Đối với các bộ thu sử dụng PIN:

$$\text{SNR} = \frac{R^2 P_{\text{in}}^2}{2q(RP_{\text{in}} + I_d)\Delta f + 4(k_B T / R_L)F_n \Delta f}, \quad (4.25)$$

Trong đó: độ đáp ứng $R = \eta q / h\nu$

4.6 NHIỀU TRONG BỘ THU QUANG (9)

❖ Tỷ số tín hiệu trên nhiễu:

. Giới hạn bởi nhiễu nhiệt ($\sigma_T^2 \gg \sigma_s^2$):

$$\text{SNR} = \frac{R_L R^2 P_{\text{in}}^2}{4k_B T F_n \Delta f} \quad (4.26)$$

. Giới hạn bởi nhiễu nơ ($\sigma_T^2 \ll \sigma_s^2$): khi công suất quang lớn

$$\text{SNR} = \frac{R P_{\text{in}}}{2q \Delta f} = \frac{\eta P_{\text{in}}}{2h\nu \Delta f} \quad (4.27)$$

. Đối với các bộ thu sử dụng APD:

$$\text{SNR} = \frac{I_p^2}{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} = \frac{(M R P_{\text{in}})^2}{2q M^2 F_A (R P_{\text{in}} + I_d) \Delta f + 4(k_B T / R_L) F_n \Delta f} \quad (4.28)$$

4.7 CÁC THAM SÔ BỘ THU QUANG (1)

❖ Tỉ số lỗi bit:

- . Tính năng bộ thu được đặc trưng bởi độ nhạy bộ thu.
- . Đối với hệ thống số: tính năng thể hiện qua tỉ số lỗi bit (BER) - xác suất lỗi (nhận sai bit) tại mạch quyết định bộ thu.

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{Bt} \quad (4.29)$$

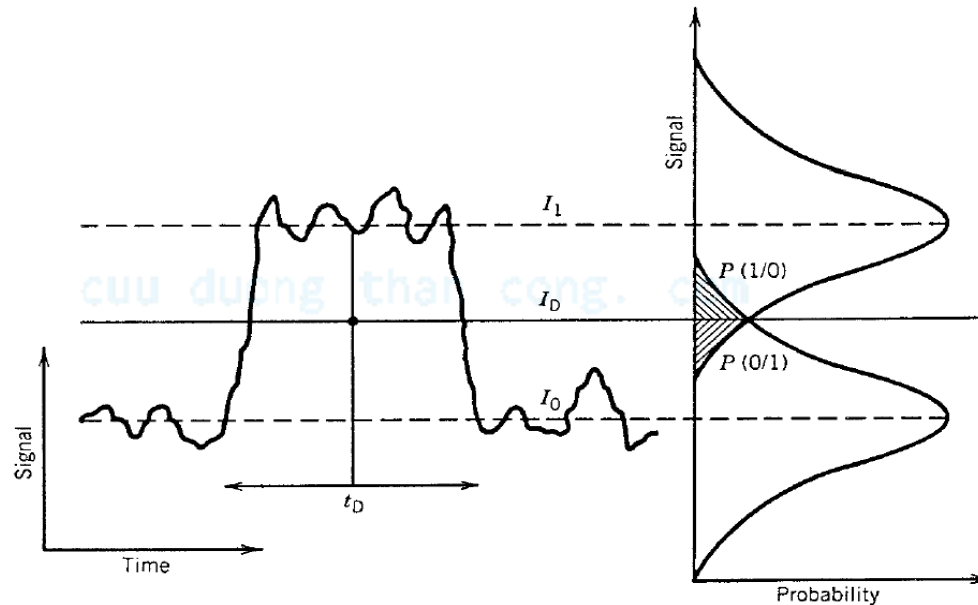
- . Tín hiệu đầu vào mạch quyết định có giá trị được lấy mẫu thẳng giáng quanh giá trị trung bình I_1 hoặc I_0 .

I_1 - Dòng trung bình tương ứng với bit 1

I_0 - Dòng trung bình tương ứng với bit 0

4.7 CÁC THAM SỐ BỘ THU QUANG (2)

❖ Tỷ số lỗi bit:



- . Mạch quyết định so sánh giá trị mẫu với giá trị ngưỡng I_D
 - Quyết định là bit 1 nếu $I > I_D$
 - Quyết định là bit 0 nếu $I < I_D$

4.7 CÁC THAM SỐ BỘ THU QUANG (3)

❖ Tỷ số lỗi bit:

. Đối với bit 1, lỗi xảy ra nếu $I < I_D$

. Đối với bit 0, lỗi xảy ra nếu $I > I_D$

. Xác suất lỗi: $BER = \frac{N_e}{N_t} = p(1)P(0|1) + p(0)P(1|0)$ (4.30)

Trong đó: $p(1)$, $p(0)$ - xác suất thu các bit 1 và 0

$P(0/1)$ - xác suất quyết định bit 0 khi thu bit 1

$P(1/0)$ - xác suất quyết định bit 1 khi thu bit 0

. Khi các bit 1 & 0 có xác suất xuất hiện như nhau:

$$p(1) = p(0) = 0.5 \longrightarrow BER = 0.5[P(0|1) + P(1|0)] \quad (4.31)$$

4.7 CÁC THAM SỐ BỘ THU QUANG (4)

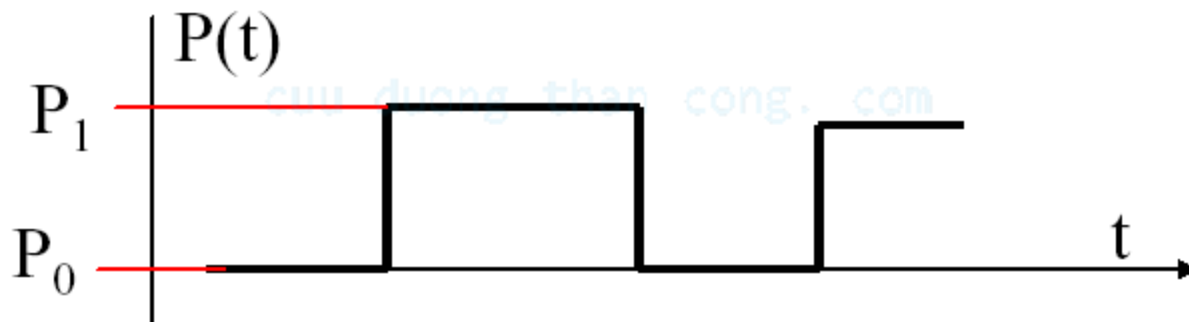
❖ Công suất thu tối thiểu:

. Xét trường hợp đơn giản:

- Bit 0 không mang công suất quang $P_0 \approx 0 \Rightarrow I_0 = 0$

- Bit 1 mang công suất $P_1 \Rightarrow I_1 = MRP_1 = 2MR \bar{P}_r$ (4.32)

trong đó: $\bar{P} = \frac{P_1 + P_0}{2} = \frac{P_1}{2}$ (4.90) công suất quang thu trung bình



4.7 CÁC THAM SỐ BỘ THU QUANG (5)

❖ Công suất thu tối thiểu:

. Đối với bộ thu PIN: giới hạn bởi nhiễu nhiệt

$$\bar{P}|_{pin} \approx \frac{Q\sigma_i}{R} \sim \sqrt{B} \quad (4.33)$$

. Đối với bộ thu APD: tối ưu M \Rightarrow P nhỏ nhất

$$M_{opt} = k_A^{-1/2} \left(\frac{\sigma_T}{Qq\Delta f} + k_A - 1 \right)^{1/2} \approx \left(\frac{\sigma_T}{k_A Qq\Delta f} \right)^{1/2} \quad (4.34)$$

$$\Rightarrow (\bar{P}_{rec})_{APD} = (2q\Delta f/R)Q^2(k_A M_{opt} + 1 - k_A) \quad (4.35)$$

. Đối với bộ thu lý tưởng: $\sigma_i = 0$

$$\bar{P}|_{pin} = \frac{Q^2}{R} q B_n \quad (4.36)$$

4.7 CÁC THAM SỐ BỘ THU QUANG (6)

❖ Giới hạn lượng tử:

. Bộ thu lý tưởng: không nhiễu nhiệt, không dòng tối, $\eta = 1$, không nhiễu nền đối với bit 0, chỉ cần 1 photon cho bit 1.

. Nhiễu nền tuân theo thống kê Poisson, không phải Gauss.

. Đối với bit 0: $N_p = 0$, $P(1/0) = 0$

. Đối với bit 1: $P(0/1) = ?$ Lỗi xảy ra khi không có cặp hạt tải nào sinh ra ($n = 0$) $\Rightarrow P(0/1) = \exp(-N_p)$

$$\Rightarrow BER = \frac{1}{2} \exp(-N_p) \quad (4.37) \quad \Rightarrow \bar{P} = \bar{N}_p h \nu B \quad (4.38)$$

Các bộ thu thực tế thường hoạt động xa giới hạn lượng tử > 20 dB