





# **Kỹ thuật thông tin quang**

## **Optical Communications**

Bộ môn Tín hiệu và Hệ thống

Học kì II, 2021- 2022

1



# **Chương 4**

## **Bộ thu quang**

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

2



## Giới thiệu môn học

### Chương 4: Bộ thu quang

- ✦ Các khái niệm cơ bản
  - ✗ Nguyên tắc thu quang
  - ✗ Các tham số cơ bản của phần tử thu quang
- ✦ Các loại nguồn thu quang
  - ✗ PN
  - ✗ PIN
  - ✗ APD
- ✦ Nhiễu trong bộ thu
- ✦ Tham số đánh giá chất lượng bộ thu
- ✦ Một số yếu tố gây suy giảm chất lượng bộ thu

11/05/2022  
Cao Hồng

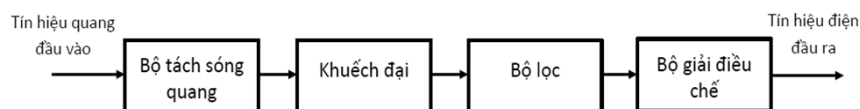
3



## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

- ✓ Nhiệm vụ của bộ thu: biến đổi tín hiệu AS thành tín hiệu điện có dạng như ở đầu vào thiết bị phát.
- ✓ Sơ đồ khối của bộ thu quang:



#### Phạm vi nghiên cứu:

Hệ thống IM - DD (Intensity Modulation - Direct Detection)

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

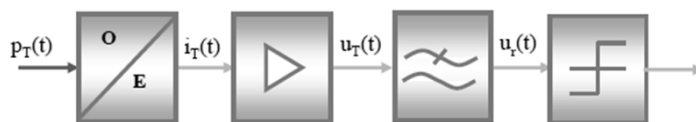
### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ SDK bộ thu tách sóng trực tiếp (DD-Direct Detection)

Đặc điểm: Bộ tách sóng quang (O/E) biến đổi trực tiếp công suất quang thu được thành dòng điện (dòng photo)



Sơ đồ khối bộ thu quang analog



Sơ đồ khối bộ thu quang digital

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

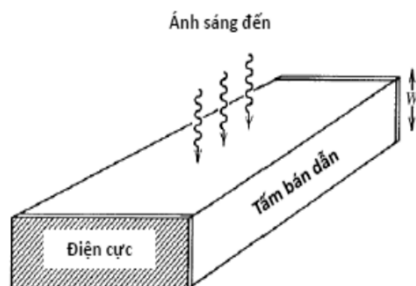


## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ Nguyên tắc thu quang:

- Dựa trên hiện tượng hấp thụ AS của vật liệu bán dẫn
- Điều kiện:  $E_{ph} \geq E_g \Rightarrow$  hình thành các cặp e-h tự do
- $E_{ng} \Rightarrow$  các e, h bị quét ra mạch ngoài tạo thành dòng điện



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ Đáp ứng của bộ thu quang (R):

$$R[A/W] = \frac{I_p}{P_{in}} \quad (4.1)$$

R: đặc trưng cho dòng photon tạo ra trên 1 đơn vị công suất quang

➤ Hiệu suất lượng tử ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{\text{Số cặp } e-h \text{ được tạo ra}}{\text{Số các photon tới bộ thu}} = \frac{I_p/q}{P_{in}/h\nu} = \frac{h\nu}{q} R \quad (\eta < 1) \quad (4.2)$$

$$(h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \text{ eV.s}; q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C})$$

$$(4.1), (4.2) \rightarrow R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta \lambda}{1,24} \quad \text{với } \lambda \text{ có đơn vị } [\mu m] \quad (4.3)$$

R tăng theo  $\lambda$  (tăng có giới hạn)



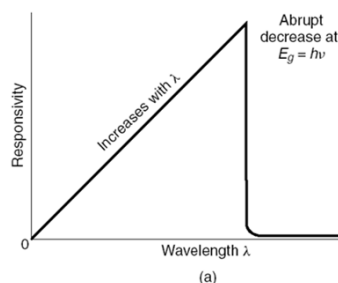
## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ Điều kiện năng lượng:

$$E_p \geq E_g \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \text{tồn tại } \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (4.4)$$

Khi  $\lambda > \lambda_c \Rightarrow E_p < E_g \rightarrow \eta$  giảm về 0





## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ Sự hấp thụ AS của vật liệu bán dẫn:

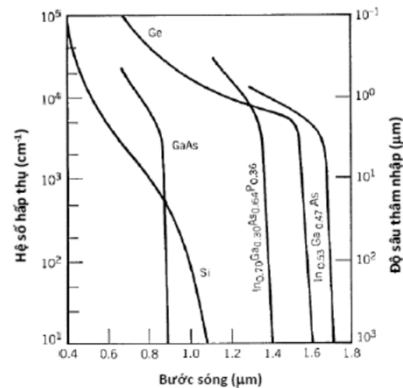
$\eta$  phụ thuộc chủ yếu vào  $\alpha$  (hệ số hấp thụ của vật liệu)

Hầu hết các vật liệu bán dẫn có  $\alpha$  lớn  $\rightarrow \eta$  cao với độ dày miền hấp thụ ( $W$ ) từ vài  $\mu\text{m}$  - vài chục  $\mu\text{m}$ .

$$\eta = \frac{P_{abs}}{P_{in}} = 1 - \exp(-\alpha W) \quad (4.5)$$

$\Rightarrow \eta = 0$  khi  $\alpha = 0$ ,

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



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ Độ rộng băng tần bộ thu quang:

- Độ rộng băng tần của bộ thu được xác định bởi tốc độ tại đó PD đáp ứng với sự thay đổi công suất quang đầu vào.
- Băng tần: liên quan đến thời gian đáp ứng của bộ thu
- (T) đáp ứng của bộ thu (PD+mạch điện đầu ra) phụ thuộc:
  - + Thời gian chuyển tiếp ( $t$ ) dịch chuyển trong vùng trôi và ( $t$ ) khuếch tán các hạt mang điện bên ngoài vùng trôi:  $\tau_{tr}$
  - + Hằng số thời gian RC của PD và các mạch điện có liên quan trong bộ thu:  $\tau_{RC}$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

➤ Độ rộng băng tần bộ thu quang:

- Thời gian đáp ứng PD: được mô tả bằng (t) lên,  $T_r$  và xuống,  $T_f$  của t/h tại đầu ra bộ tách sóng khi nhận một xung t/h quang có dạng nhảy bậc đầu vào.

- Thời gian lên của bộ thu quang:

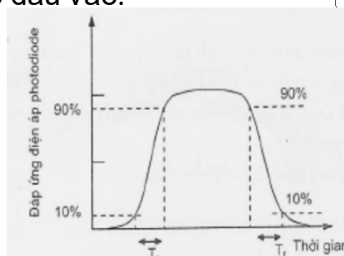
$$T_r = (\lg 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC}) \quad (4.6)$$

- Băng tần của bộ thu quang:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})} \quad (4.7)$$

- Giá trị của  $\tau_{tr}$ ,  $\tau_{RC}$  phụ thuộc cấu trúc của PD:

$\tau_{tr} \downarrow$  khi  $w \downarrow$  và  $\eta \downarrow$  khi  $w \downarrow$  quá 1 giới hạn (chọn  $1/\alpha < w \leq 2/\alpha$ )



## Bộ thu quang

### 4.1 Các khái niệm cơ bản

Bài tập:

**4.1.** GaAs có năng lượng dải cấm là 1,43 eV. Xác định bước sóng mà khi bước sóng của tín hiệu quang đến lớn hơn bước sóng này thì photodiode chế tạo từ vật liệu đó ngừng hoạt động.

**4.2.** Một photodiode có hiệu suất lượng tử là 65% khi photon có năng lượng là  $1,5 \times 10^{-19} \text{ J}$  đi đến nó.

- Xác định bước sóng hoạt động của photodiode
- Tính toán công suất quang đến yêu cầu để đạt được dòng photo là  $2,5 \mu\text{A}$  với photodiode trên



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### Yêu cầu chung:

- Thời gian đáp ứng nhanh
- Độ nhạy và hiệu suất biến đổi quang điện cao
- Nhiễu thấp
- Chất lượng ổn định, độ cạy cao
- Kích thước nhỏ
- Điện áp phân cực thấp
- Giá thành rẻ

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

13

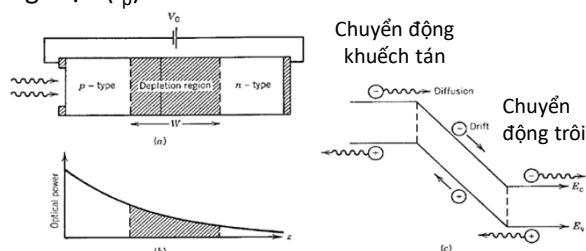


## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang p-n

- Cấu trúc: tiếp giáp **p-n được phân cực ngược**
- Nguyên lý hoạt động:
  - + Khi không có AS chiếu vào → không có dòng
  - + Khi có AS chiếu vào (đk:  $E_{ph} \geq E_g$ ) → hình thành e-h.
  - + e-h dưới tác động của  $E_{ng}$ ,  $e \rightarrow n$ ,  $h \rightarrow p$ : hình thành dòng quang điện ( $I_p$ )



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

14



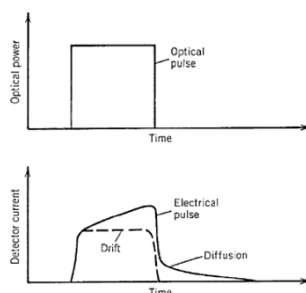
## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang p-n

- Quá trình khuếch tán: chậm (mất vài ns hoặc > để khuếch tán được  $1\ \mu\text{m}$ ) → giới hạn băng tần của ⇒ **Phải giảm quá trình khuếch tán:**

→ Giảm độ rộng vùng n và p, tăng độ rộng vùng nghèo



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

15



## Bộ thu quang

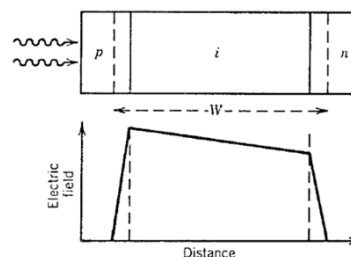
### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang PIN

- 3 lớp p-i-n, được định thiên ngược.
- i: bán dẫn thuần (hoặc loại n pha tạp ít)
- p, n được pha tạp nhiều.

⇒ **tạo được miền nghèo rộng.**

**Độ rộng miền nghèo được thay đổi theo w.**



Cấu trúc của PD PIN và phân bố trường bên trong PIN khi có điện áp phân cực ngược đặt vào

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

16

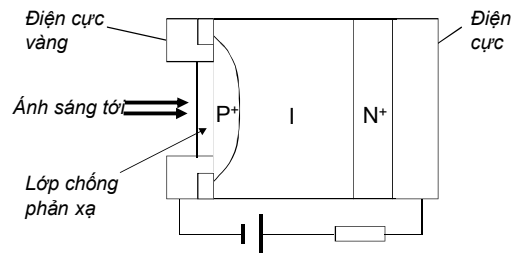




## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang PIN



**Ưu điểm của PIN:** thành phần trôi của dòng photo chiếm ưu thế so với thành phần khuếch tán

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

17



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang PIN

Để loại bỏ hoàn toàn thành phần khuếch tán: sử dụng **PIN** cấu trúc dị thể kép.

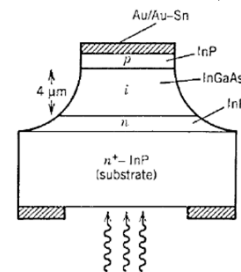
- $E_{g(i)} < E_{ph} < E_{g(p,n)}$  (dùng InGaAs cho lớp i và InP cho lớp p, n)

$$E_{g(\text{InP})} = 1,35\text{eV}$$

$$E_{g(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As})} = 0,75\text{eV} \text{ (với } x=0,47\text{)}$$

⇒ lớp InGaAs ở giữa sẽ hấp thụ mạnh AS có  $\lambda$  1,3 – 1,6  $\mu\text{m}$ .

- Mặt trước của PD thường được phủ 1 lớp điện môi phù hợp để giảm thiểu sự phản xạ



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

18



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang PIN

Đặc tính kỹ thuật của một số loại photodiode p-i-n

Parameter	Symbol	Unit	Si	Ge	InGaAs
Wavelength	$\lambda$	$\mu\text{m}$	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	$\eta$	%	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	$\Delta f$	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Bias voltage	$V_b$	V	50–100	6–10	5–6

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

19



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

Bài tập:

**4.3.** Một photodiode PIN, trung bình cứ 3 photon đến tại bước sóng 0,8  $\mu\text{m}$  thì tạo ra 1 cặp điện tử-lỗ trống. Giả thiết rằng, tất cả các điện tử này đều được đi ra đến mạch ngoài. Tính:

- Hiệu suất lượng tử của thiết bị
- Năng lượng dải cấm lớn nhất có thể của vật liệu bán dẫn chế tạo photodiode
- Giá trị dòng photo trung bình tạo ra khi công suất quang thu được là  $10^{-7}\text{W}$
- Số photon tương ứng đến bộ thu tại bước sóng đó



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### Bài tập:

**4.4.** Một photodiode PIN, có hiệu suất lượng tử là 50% tại bước sóng 0,9  $\mu\text{m}$ . Tính:

- Đáp ứng tại bước sóng 0,9  $\mu\text{m}$
- Công suất quang thu được nếu dòng photo trung bình thu được là  $10^{-6}\text{A}$
- Số photon tương ứng đến bộ thu tại bước sóng đó



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

Hạn chế của PIN

$$I_p = P_{in} \cdot R$$

$$R_{max} = \eta q / h\nu$$



- Mong muốn tăng R để  $\downarrow P_{in\ min} \rightarrow$  Sử dụng APD
- APD sử dụng cơ chế khuếch đại nội thông qua quá trình ion hóa do va chạm  $\rightarrow$  APD đã khuếch đại dòng photo tín hiệu ban đầu trước khi đi vào mạch đầu vào của mạch KĐ điện.



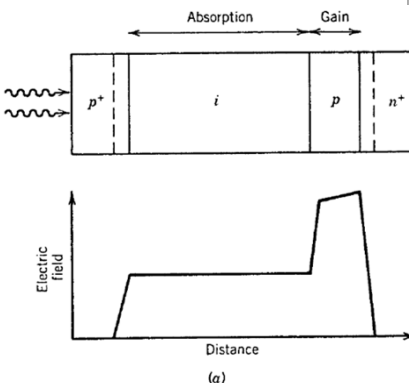
## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

##### Cấu tạo và nguyên lý hoạt động:

- Bổ sung thêm 1 lớp p có điện trở suất cao giữa i và n<sup>+</sup>
- Điện trường cao ở vùng tiếp giáp pn<sup>+</sup> ( $\sim 3 \cdot 10^5$  V/cm) → vùng nhân
- Điện trường thấp ở vùng i (vùng hấp thụ)
- Quá trình nhân được thực hiện trong vùng điện trường cao bằng hiện tượng ion hóa do va chạm



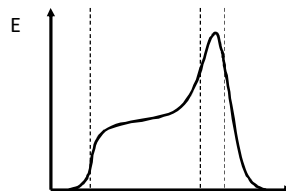
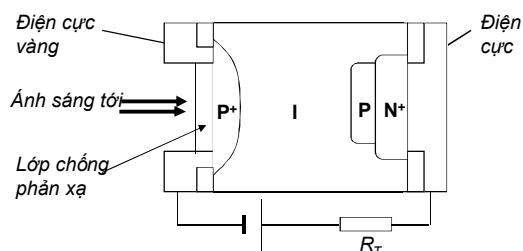
11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

24



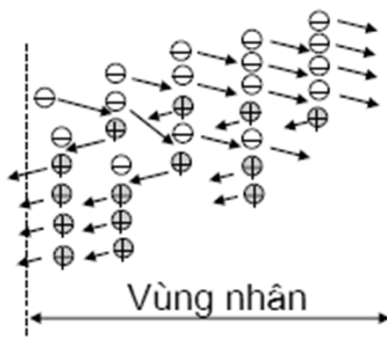
## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

Quá trình ion hóa do va chạm:

- Tốc độ sinh các hạt tải mới được đặc trưng bởi các hệ số ion hóa do va chạm  $\alpha_e, \alpha_h$
- Giá trị của  $\alpha_e, \alpha_h$  phụ thuộc vào loại vật liệu bán dẫn và cường độ điện trường tăng tốc.



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

25



## Bộ thu quang

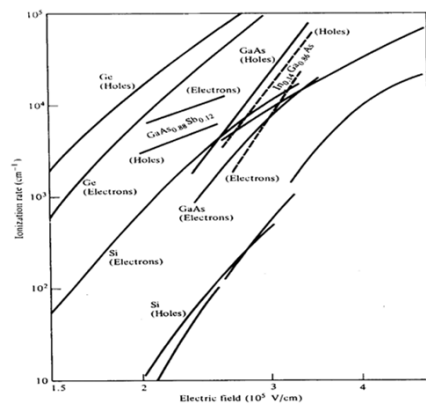
### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

Quá trình ion hóa do va chạm:

Hệ số ion hóa của 1 số loại vật liệu bán dẫn

Hệ số ion hóa được xác định bằng số cặp e-h trung bình được tạo ra trên 1 đơn vị khoảng cách dịch chuyển



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

- Hệ số nhân:  $M = \frac{I_M}{I_p}$  (4.8)

$I_M$ : giá trị trung bình của dòng tổng đầu ra đã được nhân

$I_p$ : giá trị trung bình dòng photo ban đầu

(lưu ý: quá trình nhân là quá trình thống kê → giá trị M: giá trị trung bình)

$$k_A = \alpha_h / \alpha_e \text{ (nếu } \alpha_h < \alpha_e \text{)}$$

$$k_A = \alpha_e / \alpha_h \text{ (nếu } \alpha_e < \alpha_h \text{)}$$

d: bề rộng vùng nhân

$$M = \frac{1 - k_A}{\exp[-(1 - k_A)\alpha_e d] - k_A}, \quad (4.9)$$

trong đó:  $k_A$  - hệ số tỉ lệ ion hóa

$\alpha_e$  - tốc độ ion hóa do điện tử gây ra

$\alpha_h$  - tốc độ ion hóa do lỗ trống gây ra

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

27



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

- Hệ số nhân:

APD có  $\alpha_e \gg \alpha_h$  hoặc  $\alpha_e \gg \alpha_h$  (tức là quá trình nhân do 1 loại hạt mang nào đó sẽ chiếm ưu thế) sẽ có chất lượng tốt hơn.

- Sự tăng ích dòng đối với các bước sóng khác nhau sẽ phụ thuộc vào điện áp phân cực:  $M = f(V)$  với V là điện áp phân cực
- Do có cơ chế khuếch đại dòng nên đáp ứng của APD tăng M lần so với đáp ứng của photodiode p-i-n:

$$R_{APD} = MR = M(\eta q / h\nu) \quad (4.10)$$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

$$T \uparrow \rightarrow k \downarrow \rightarrow M \downarrow$$

28

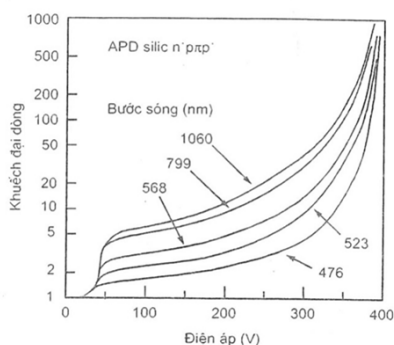


## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

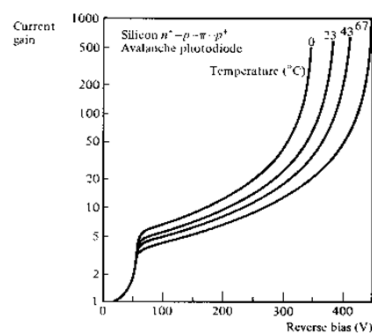
#### ➤ Diode tách quang APD

- Hệ số nhân:



11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

M phụ thuộc V, λ



M phụ thuộc V, T

29



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### ➤ Diode tách quang APD

Các đặc tính của một số photodiode APD phổ biến

Tham số	Đơn vị	Si	Ge	InGaAs
Bước sóng (λ)	μm	0,4-1,1	0,8-1,8	1,0-1,7
Đáp ứng (R <sub>APD</sub> )	A/W	80-130	3-30	5-20
Hệ số nhân (M)	-	100-500	50-200	10-40
Hệ số k (k <sub>A</sub> )	-	0,02-0,05	0,7-1,0	0,5-0,7
Dòng tối I <sub>d</sub>	nA	0,1-1	50-500	1-5
Thời gian lên T <sub>r</sub>	ns	0,1-2	0,5-0,8	0,1-0,5
Băng tần (Δf)	GHz	0,2-1,0	0,4-0,7	1-3
Thiên áp (V <sub>b</sub> )	V	200-250	20-40	20-30

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nguồn thu quang

#### Bài tập:

**4.5.** Một photodiode APD, có hiệu suất lượng tử là 80% tại bước sóng 0,9  $\mu\text{m}$ . Khi có AS đến có công suất là 0,5  $\mu\text{W}$ , nó tạo ra dòng photon 11 $\mu\text{A}$  (sau quá trình nhân). Xác định hệ số nhân của thiết bị.

**4.6.** Một photodiode APD, có hiệu suất lượng tử là 45% tại bước sóng 0,85  $\mu\text{m}$ . Khi có AS đến, nó tạo ra dòng photo 10 $\mu\text{A}$  sau quá trình nhân với hệ số nhân là 250 lần. Tính:

- Công suất quang thu được
- Số photon thu được trong 1s



## Bộ thu quang

### 4.3 Các loại nhiễu trong bộ thu quang

#### Các loại nhiễu

##### Nhiễu nổ

Các hạt mang điện trong dòng photon -  $I_p$  được tạo ra một cách **ngẫu nhiên** theo thời gian  $\rightarrow$  sự thăng giáng về dòng ( $i_s(t)$ ): **Nhiễu nổ**

$$\sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = 2qI_p \Delta f$$

$$\boxed{I_p} \rightarrow \sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = 2q(I_p + I_d) \Delta f$$

(4.6)

##### Nhiễu nhiệt

Chuyển động nhiệt ngẫu nhiên của  $e^-$  trong điện trở tải  $\rightarrow$  sự thăng giáng về dòng ( $i_T(t)$ ): **Nhiễu nhiệt**

$$\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = (4k_B T / R_L) \Delta f$$

$$\boxed{F_n} \rightarrow \sigma_T^2 = (4k_B T / R_L) F_n \Delta f$$

(4.7)





## Bộ thu quang

### 4.3 Các loại nhiễu trong bộ thu quang

$$\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + (4k_B T / R_L) F_n \Delta f. \quad (4.8)$$

**Trong đó:**

$\sigma^2$ : phương sai nhiễu tổng

$\sigma$ : dòng nhiễu tổng hiệu dụng (rms)

$\sigma_s^2$ : phương sai nhiễu nổ

$\sigma_s$ : dòng nhiễu nổ hiệu dụng

$\sigma_T^2$ : phương sai nhiễu nhiệt

$\sigma_T$ : dòng nhiễu nhiệt hiệu dụng

$I(t)$ : Dòng photo được tạo ra ứng với công suất  $P_{in}$

$I_p$ : Dòng photo trung bình

$F_n$ : hệ số nhiễu khuếch đại

$I_d$ : Dòng tối trung bình

$k_B$  hằng số Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

$i_s(t)$ : thăng giáng dòng do nhiễu nổ

$R_L$ : điện trở tải của bộ thu

$i_T(t)$ : thăng giáng dòng do nhiễu nhiệt

$T$ : nhiệt độ tuyệt đối

$\Delta f$ : băng tần nhiễu hiệu dụng của bộ thu

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

33



## Bộ thu quang

### 4.3 Các loại nhiễu trong bộ thu quang

#### ➤ Nhiễu trong PIN

$$\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + (4k_B T / R_L) F_n \Delta f. \quad (4.9)$$

#### ➤ Nhiễu trong APD

- Nhiễu nổ bị ảnh hưởng bởi quá trình nhân:

$$\sigma_s^2 = 2qM^2 F_A (R P_{in} + I_d) \Delta f. \quad (4.10)$$

$F_A$ : hệ số nhiễu trội của APD

$$F_A(M) = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M) \approx M^x$$

$0 \leq x \leq 1$	
$x = 0,3$	Si
$x = 0,7$	InGaAs
$x = 1$	Ge

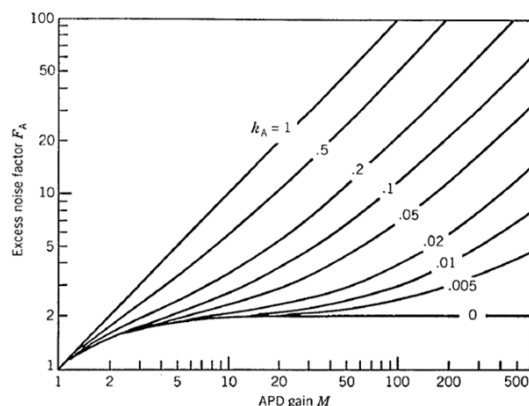
- Nhiễu nhiệt không bị ảnh hưởng bởi quá trình nhân

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

34



### 3. CÁC LOẠI NHIỄU TRONG BỘ THU QUANG



Sự phụ thuộc của  $F_A$  vào  $M$  với các hệ số  $k$  khác nhau

$k_A$  (hệ số ion hóa) càng nhỏ  $\rightarrow$  chất lượng bộ thu APD càng tốt  
(vì đạt được nhiễu nhỏ với  $M$  cao)

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn



### BÀI TẬP

**4.7-** Bộ thu quang sử dụng photodiode p-i-n Si có hiệu suất lượng tử 65% khi hoạt động tại bước sóng  $0,85 \mu\text{m}$ . Dòng tối của thiết bị tại điểm làm việc là  $2 \text{ nA}$  và điện trở tải là  $4 \text{ k}\Omega$ . Công suất quang đến tại bước sóng này là  $180 \text{ nW}$  và băng tần nhiễu hiệu dụng của bộ thu là  $5 \text{ MHz}$ .

a. Xác định dòng nhiễu nơ và nhiễu nhiệt. So sánh nhiễu nơ tạo ra trong photodiode với nhiễu nhiệt ở điện trở tải tại nhiệt độ  $20^\circ\text{C}$ .

b. Tính SNR tại đầu ra của bộ thu với hệ số nhiễu khuếch đại ( $F_n$ ) là  $3 \text{ dB}$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG  
Posts & Telecommunications Institute of Technology

36



## Bộ thu quang

### 4.2 Các loại nhiễu trong bộ thu quang

HD Bài tập 4.7:

a) Công suất quang thu:

+ B1: Xác định giá trị trung bình dòng photo ban đầu:

$$M = \frac{I_M}{I_p} \implies I_p = \frac{I_M}{M}$$

+ B2: Xác định công suất quang thu: với  $\lambda$  có đơn vị  $[\mu m]$

$$I_p = R P_{in} = \frac{\eta \lambda}{1,24} P_{in} \implies P_{in} = \frac{I_p}{R} = \frac{1,24}{\eta \lambda} I_p$$

b) Số photon thu được trong 1s:  $[J]=[W.s]$

$$N = \frac{P_{in}}{h\nu} t = \frac{P_{in} \cdot \lambda}{hc} t \quad \begin{aligned} h &= 6,63 \times 10^{-34} J.s = 4,14 \text{ eV} \\ c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$



## 4. CÁC THAM SỐ ĐÁNH GIÁ TÍN HIỆU TÀI PHÍA THU

- SNR (PIN, APD)
- BER
- Độ nhạy bộ thu quang



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ SNR (signal to noise ratio):

$$\text{SNR} = \frac{\text{average signal power}}{\text{noise power}} = \frac{I_p^2}{\sigma^2}, \quad (4.11)$$



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ SNR (signal to noise ratio): của bộ thu PIN

$$\text{SNR} = \frac{R^2 P_{\text{in}}^2}{2q(RP_{\text{in}} + I_d)\Delta f + 4(k_B T / R_L)F_n \Delta f}, \quad (4.12)$$

- Khi bị giới hạn bởi nhiễu nhiệt ( $\sigma_T^2 \gg \sigma_s^2$ ):

$$\text{SNR} = \frac{R_L R^2 P_{\text{in}}^2}{4k_B T F_n \Delta f}. \quad (4.13)$$

(Thực tế: ảnh hưởng của nhiễu nhiệt thường trội hơn)

- Khi bị giới hạn bởi nhiễu nổi ( $\sigma_T^2 \ll \sigma_s^2$ ): xảy ra khi  $P_{\text{in}}$  lớn

$$\text{SNR} = \frac{RP_{\text{in}}}{2q\Delta f} = \frac{\eta P_{\text{in}}}{2h\nu\Delta f}, \quad (4.14) \quad (I_d \ll I_p)_{40}$$



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ SNR (signal to noise ratio): của bộ thu APD

$$\text{SNR} = \frac{I_p^2}{\sigma_s^2 + \sigma_I^2} = \frac{(MRP_{\text{in}})^2}{2qM^2F_A(RP_{\text{in}} + I_d)\Delta f + 4(k_B T / R_L)F_n \Delta f}, \quad (4.15)$$

- Khi nhiễu nhiệt chiếm ưu thế:

$$\text{SNR} = (R_L R^2 / 4k_B T F_n \Delta f) M^2 P_{\text{in}}^2 \quad (4.16)$$

→  $\text{SNR}_{\text{APD}}$  lớn hơn  $\text{SNR}_{\text{PIN}}$   $M^2$  lần

- Khi nhiễu nơ chiếm ưu thế:

$$\text{SNR} = \frac{RP_{\text{in}}}{2qF_A \Delta f} = \frac{\eta P_{\text{in}}}{2h\nu F_A \Delta f} \quad (4.17)$$

→  $\text{SNR}_{\text{APD}}$  bé hơn  $\text{SNR}_{\text{PIN}}$   $F_A$  lần

$$F_A(M) = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M) \approx M^x$$

$0 \leq x \leq 1$   
 $x=0,3$  - Si  
 $x=0,7$  - InGaAs  
 $x=1$  - Ge

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

41



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ SNR (signal to noise ratio): của bộ thu APD

- Hệ số khuếch đại tối ưu của APD:

$$\text{SNR} = \frac{I_p^2}{\sigma_s^2 + \sigma_I^2} = \frac{(MRP_{\text{in}})^2}{2qM^2F_A(RP_{\text{in}} + I_d)\Delta f + 4(k_B T / R_L)F_n \Delta f}, \quad (4.18)$$

→  $M_{\text{opt}}$  → khi  $\text{SNR}_{\text{APD}}$  max

$$k: 0,01 - 1 \rightarrow M_{\text{opt}} \approx \left[ \frac{4k_B T F_n}{k_A q R_L (RP_{\text{in}} + I_d)} \right]^{1/3} \quad M_{\text{opt}}^{2+x} \approx \frac{4k_B T F_n}{x q R_L (I_p + I_d)} \quad (4.19)$$

$M_{\text{opt}}$  phụ thuộc nhiều vào  $k_A$ :

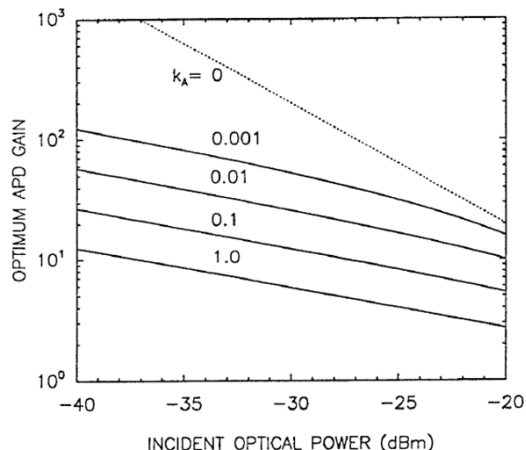
- Với Si APD ( $k_A \ll 1$ ) →  $M_{\text{opt}}$  có thể đạt đến 100
- Với InGaAs APD ( $k_A \approx 0,7$ ) →  $M_{\text{opt}} \sim 10$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

42



## 4.1 TỶ SỐ TÍN HIỆU TRÊN NHIỄU (SNR)



Sự phụ thuộc của  $M_{\text{opt}}$  (APD) vào  $k_A$  và  $P_{\text{in}}$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG  
Posts & Telecommunications Institute of Technology

43



## BÀI TẬP

**4.8-** Bộ thu quang sử dụng APD Si ( $\alpha=0,3$ ) có băng tần nhiễu hiệu dụng là 50MHz, điện trở tải là 600  $\Omega$ . Dòng photo trung bình được tạo ra trước khi khuếch đại (nhân) là  $10^{-7}$  A; nhiệt độ của bộ thu là 18 $^{\circ}$  C. Xác định SNR khi  $M=10$  và khi  $M=M_{\text{opt}}$  (Bỏ qua ảnh hưởng của dòng tối và  $F_n=1$ ).

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG  
Posts & Telecommunications Institute of Technology

44



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Tỷ lệ lỗi bit BER:

- SNR không hoàn toàn có ý nghĩa đối với bộ thu tín hiệu số → BER
- BER: Xác suất nhận dạng bit sai của mạch quyết định trong bộ thu
- BER thông tin quang  $\leq 10^{-9}$

$$\text{BER} = N_e / N_t \quad (4.20)$$

$N_e$ : số bit lỗi

$N_t$ : Tổng số bit được truyền đi trong thời gian  $t$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

45



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Tỷ lệ lỗi bit BER:

T/h vào mạch quyết định có giá trị:

- Dao động xung quanh  $I_1$  (bit 1)
- Dao động xung quanh  $I_0$  (bit 0)

Mạch quyết định so sánh giá trị mẫu với giá trị ngưỡng  $I_D$ :

- $I > I_D \rightarrow \text{bit 1}$
- $I < I_D \rightarrow \text{bit 0}$

Lỗi xảy ra khi  $I < I_D$  với bit 1 và khi  $I > I_D$  với bit 0:

$$\text{BER} = p(1)P(0/1) + p(0)P(1/0), \quad (4.21)$$

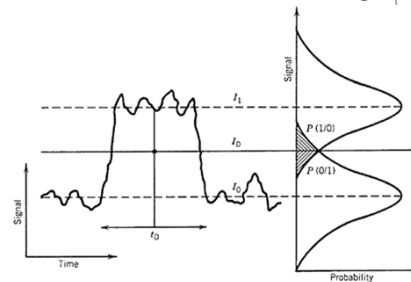
$p(1), p(0)$ : xác suất xuất hiện bit 1, bit 0  $\rightarrow p(1) = p(0) = 1/2$

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

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

$$\text{BER} = \frac{1}{2} [P(0/1) + P(1/0)]. \quad (4.22)$$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn





## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Tỷ lệ lỗi bit BER:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} [P(0/1) + P(1/0)].$$

- $P(0/1)$  và  $P(1/0)$  phụ thuộc vào hàm mật độ xác suất  $p(I)$
- Dạng  $p(I)$ : phụ thuộc vào tính thống kê của các nguồn nhiễu:
  - Nhiễu nhiệt có tính thống kê Gauss
  - Nhiễu nổ cũng có thể gần đúng là biến ngẫu nhiên Gauss

→  $I$  có hàm mật độ xs Gauss với phương sai

$$p(I)dI = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{I^2}{2\sigma^2}\right) dI$$

$$\begin{aligned} P(0/1) &= \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}}\right) \\ P(1/0) &= \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) dI = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \end{aligned}$$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

47



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Tỷ lệ lỗi bit BER:

- Tính: erfc là hàm bù lỗi

$$\Rightarrow \text{BER} = \frac{1}{4} \left[ \text{erfc}\left(\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}}\right) + \text{erfc}\left(\frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \right] \quad (4.22)$$

$I_1$ : dòng trung bình của bit 1

$I_0$ : dòng trung bình của bit 0

$\sigma_0^2$ : phương sai nhiễu tương ứng với bit 0 →  $\sigma_0$ : dòng nhiễu bình "0"

$\sigma_1^2$ : phương sai nhiễu tương ứng với bit 1 →  $\sigma_1$ : dòng nhiễu bình "1"

→ BER phụ thuộc vào ngưỡng quyết định  $I_D$  → **thực tế, chọn  $I_D$  tối ưu để BER min**

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

48



**Bộ thu quang**

#### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

➤ **Tỉ lệ lỗi bit BER:**

**Xác định  $I_D$  tối ưu:**

- $I_D$  tối ưu khi thỏa mãn:  $\frac{(I_D - I_0)^2}{2\sigma_0^2} = \frac{(I_1 - I_D)^2}{2\sigma_1^2} + \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)$
- Gần đúng:  $Q = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1} = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0} \longrightarrow I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$  (\*)
- Khi nhiễu nhiệt chiếm ưu thế (thường xảy ra với PIN)  $\rightarrow$   
 $\sigma_1 = \sigma_0, I_D = (I_1 + I_0)/2$

$\rightarrow$  với PIN, thường chọn ngưỡng quyết định ở giữa **BER=10<sup>-9</sup> khi Q ≈ 6**

- Với bộ thu APD, phải chọn  $I_D$  tối ưu theo (\*)

11/ Khi  $I_D$  opt  $\rightarrow$  BER =  $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$  với  $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$  49

**Bộ thu quang**

#### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

➤ **Tỉ lệ lỗi bit BER:**

**Xác định  $I_D$  tối ưu:**

- $I_D$  tối ưu khi thỏa mãn:  $I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$  (4.23)
- Khi nhiễu nhiệt chiếm ưu thế (thường xảy ra với PIN)  $\rightarrow$   
 $\sigma_1 = \sigma_0, I_D = (I_1 + I_0)/2$  (4.24)

$\rightarrow$  với PIN, thường chọn ngưỡng quyết định ở giữa

- Với bộ thu APD, phải chọn  $I_D$  tối ưu theo (4.23):

Khi  $I_D$  opt  $\rightarrow$  BER =  $\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$  (4.25)

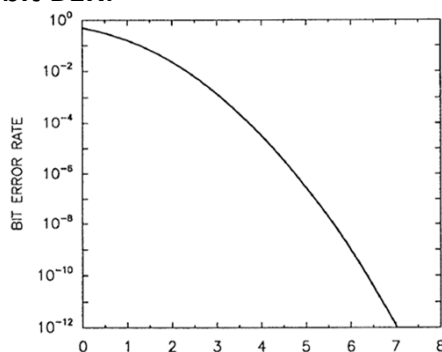
với  $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$  **BER=10<sup>-9</sup> khi Q ≈ 6** 50



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Tỷ lệ lỗi bit BER:



#### Quan hệ giữa BER và Q

Q tăng → BER giảm. BER < 10<sup>-12</sup> khi Q > 7  
Gần đúng đạt độ chính xác cao khi Q > 3

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

51



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Công suất thu tối thiểu:

- Độ nhạy thu (Receiver Sensitivity) là công suất thu tối thiểu để đạt được giá trị BER theo yêu cầu.

#### Xác định công suất thu tối thiểu:

- Xác định công suất thu tối thiểu theo công thức:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$$

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

$$\bar{P}_{\text{rec}} = (P_1 + P_0)/2 \quad (4.26)$$

- Để đơn giản: bit 0 có  $P_0 = 0 \rightarrow I_0 = 0$ ; bit 1 có  $P_1 \rightarrow I_1$

$$I_1 = MRP_1 = 2MR\bar{P}_{\text{rec}} \quad (4.27)$$

- Dòng nhiễu hiệu dụng  $\sigma_1$  và  $\sigma_0$  được tính toán khi có nhiễu nơ và nhiễu nhiệt như sau:

$$\sigma_1 = (\sigma_s^2 + \sigma_T^2)^{1/2}$$

$$\sigma_0 = \sigma_T$$

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

52



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Công suất thu tối thiểu:

- Bỏ qua ảnh hưởng dòng tối:

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 &= 2qM^2F_A R(2\bar{P}_{\text{rec}})\Delta f \\ \sigma_T^2 &= (4k_B T / R_L) F_n \Delta f. \end{aligned}$$

Ta có:  $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \longrightarrow Q = \frac{I_1}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{2MR\bar{P}_{\text{rec}}}{(\sigma_s^2 + \sigma_T^2)^{1/2} + \sigma_T}$

Tính gần đúng:  $\longrightarrow \bar{P}_{\text{rec}} = \frac{Q}{R} \left( qF_A Q \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right) \quad (4.28)$

- Với PIN (nhiều nhiệt chiếm ưu thế và  $M=1$ )

$$\longrightarrow (\bar{P}_{\text{rec}})_{\text{pin}} \approx Q\sigma_T / R. \quad (4.29)$$

Vì  $\sigma_T$  phụ thuộc  $\Delta f$ , ( $\Delta f \approx B$ )  $\rightarrow$  khi nhiễu nhiệt chiếm ưu thế:  $P_{\text{rec}}$  tăng theo  $\sqrt{B} \rightarrow$  Tốc độ càng tăng, độ nhạy thu càng giảm.

11/05/  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Công suất thu tối thiểu:

- Trong trường hợp APD:

Từ phương trình:

$$\bar{P}_{\text{rec}} = \frac{Q}{R} \left( qF_A Q \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right) \quad (*)$$

$\rightarrow$  Khi nhiễu nhiệt chiếm ưu thế,  $P_{\text{rec}}$  giảm  $M$  lần so với PIN

Tuy nhiên, trong APD, nhiễu nổ cũng đáng kể  $\rightarrow$  phải tính  $P_{\text{rec}}$  theo công thức (\*)

Tối ưu hóa  $P_{\text{rec}}$  bằng cách chọn  $M$  thích hợp:  $M_{\text{opt}}$

$$(\bar{P}_{\text{rec}})_{\text{APD}} = (2q\Delta f / R) Q^2 (k_A M_{\text{opt}} + 1 - k_A). \quad (4.30)$$

$\rightarrow$  với APD,  $P_{\text{rec}}$  tăng tuyến tính với  $B$

11/05/  
Cao Hồng Sơn



## Bộ thu quang

### 4.4 Các tham số đánh giá tín hiệu tại bộ thu quang

#### ➤ Công suất thu tối thiểu:

- Đánh giá sự cải thiện  $P_{rec}$  khi sử dụng APD:

$$\bar{P}_{rec} = \frac{Q}{R} \left( qF_A Q \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right) \quad (4.31)$$

Bằng cách so sánh  $P_{rec}$  PIN và APD tính theo các công thức:

$$(\bar{P}_{rec})_{pin} \approx Q \sigma_T / R. \quad (4.32)$$

$$(\bar{P}_{rec})_{APD} = (2q\Delta f / R) Q^2 (k_A M_{opt} + 1 - k_A). \quad (4.33)$$

**Nhận xét:** Sự cải thiện phụ thuộc vào  $k_A$ .  $k_A$  càng nhỏ, sự cải thiện càng lớn. Với InGaAs APD, độ nhạy thu cải thiện được 6-8 dB.

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

55



## BÀI TẬP

**4.9.** Xét một nguồn thu  $1,31\mu\text{m}$  PIN InGaAs có độ rộng băng tần 20MHz, hiệu suất lượng tử 70%, dòng tối 4nA, điện trở tải là  $1k\Omega$ . Công suất quang chiếu vào là 300nW.

- Hãy xác định các dòng tín hiệu và dòng nhiễu rms vì nhiễu nổ, nhiễu nhiệt, nhiễu dòng tối. Tính SNR.
- Giả thiết rằng SNR tối thiểu của bộ thu quang là 20dB. Hãy xác định độ nhạy thu của photodiode trong điều kiện giới hạn i) nhiễu nhiệt và ii) nhiễu nổ. Xác định công suất nhiễu tương đương trong hai trường hợp.

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG  
Posts & Telecommunications Institute of Technology

56



## BÀI TẬP

**4.10-** Một bộ thu quang sử dụng APD Si có các tham số sau: độ rộng băng tần 60 MHz, hiệu suất lượng tử 75%, hệ số khuếch đại là 100, hệ số nhiễu trội  $x = 0,3$ , dòng tối 0,2 nA, điện dung tiếp giáp 6 pF được sử dụng để thu tín hiệu quang có công suất đi vào là 10 nW ở bước sóng 0,83  $\mu\text{m}$ .

- Độ đáp ứng của APD là bao nhiêu ?
- Điện trở tải tương ứng với APD là bao nhiêu ?
- Công suất tín hiệu điện, công suất nhiễu nơ, công suất nhiễu nhiệt là bao nhiêu tại 20°C ?
- Tỉ số SNR là bao nhiêu ?
- Tỉ số SNR là bao nhiêu trong giới hạn lượng tử và nhiễu nhiệt ?
- Công suất thu tối thiểu để đạt được  $\text{BER} = 10 \exp(-12)$
- Khi độ rộng băng tần của bộ thu giảm xuống còn 5 MHz và điện trở tải được nâng lên theo tương ứng thì SNR thay đổi như thế nào?

11/05/2022  
Cao Hồng Sơn

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG  
Posts & Telecommunications Institute of Technology

57