

# ~ Công thức Quang ~ Trăn Duy Anh ~

## Chương 1: Tổng quan về thông tin quang

-  $v = \frac{c}{n}$ ;  $c = \lambda f$ ;  $E = h \cdot f$  ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,14 \text{ eV} \cdot \text{s}$ )

-  $P(\text{dBm}) = 10 \log_{10} P(\text{mW})$

-  $P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P_m(\text{mW})}{1(\text{mW})}$

-  $P(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_m(\text{mW})}{P_{\text{ref}}(\text{mW})}$

## Chương 2: Sợi quang

- NA (khẩu độ số) =  $\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$   $\left\{ \begin{array}{l} n_1: \text{chiết suất lõi} \\ n_2: \text{chiết suất vỏ} \end{array} \right.$

- Độ lệch chiết suất:  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

- Tần số chuẩn hóa:  $v = \left( \frac{n_1}{u^2 + w^2} \right)^{1/2} = k \cdot a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}$   
 Trong đó:  $a$  là bt sợi  
 $\lambda$ : bs làm việc

- Số lượng mode lan truyền trong sợi:

Sợi SI-MM:  $N \approx \frac{v^2}{2} = \left( \frac{2\pi a n_1}{\lambda} \right)^2 \Delta$

Sợi GI-MM:  $N = \frac{g}{g+2} \cdot \left( \frac{4\pi^2 n_1^2 a^2 \Delta}{\lambda^2} \right)$

- Bước sóng cắt:  $\lambda_c = \pi \frac{2a}{v_c} \cdot NA = \pi \cdot \frac{2a}{2,405} \cdot NA$

- Diện tích hiệu dụng:  $A_{\text{eff}} = \pi \cdot w_0^2$

- Tỷ lệ công suất trung bình:  $\left( \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{total}}} \right) = \frac{4}{3} \cdot M^{-1/2}$  ( $M$  là số mode trong sợi)

- Suy hao trong sợi quang:  $P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \cdot e^{-\alpha L}$   $\left\{ \begin{array}{l} \alpha: \text{hệ số suy hao} \\ L: \text{khoảng cách (km)} \end{array} \right.$   
 $\alpha(\text{dB/km}) = \left| \frac{P_{\text{out}}(\text{dBm}) - P_{\text{in}}(\text{dBm})}{L(\text{km})} \right|$

• Tần sắc mode:

- Tần sắc mode:  $\Delta T_{\text{mode (SI)}} = T_{\text{max}} - T_{\text{min}} = L \cdot \Delta T_{\text{mode (SI)}} \approx \frac{L n_1 \Delta}{c} \approx \frac{L (NA)^2}{2c \cdot n_1}$

- Hệ số tần sắc mode:  $P_{\text{mode (SI)}} = \frac{n_1 \Delta}{c} \approx \frac{(NA)^2}{2c n_1} = \frac{\Delta T_{\text{mode}}}{L} \text{ (ps/km)}$

- giới hạn truyền dẫn:  $B \Delta T_{\text{mode}} < 1$  ( $B$  là tốc độ bit)

- Độ lệch tương truyền (MM-SI):  $\Delta T_{\text{mode (GI)}} = \frac{L n_1 \Delta^2}{8c}$

• Tần số vận tốc nhóm (GVĐ):

- Hệ số tán sắc  $D_{GVĐ}$  [ps/nm.km]

- Tần số GVĐ:  $\Delta T_{GVĐ} = D_{GVĐ} \cdot L \cdot \Delta \lambda$

- Độ mở rộng xung:  $\Delta T = L \cdot D \cdot \Delta \lambda$

• Các giới hạn truyền dẫn gây ra bởi tán sắc:

-  $T_{FWHM} \approx 1,655 T_0$ ;  $\sigma_0 = \frac{T_0}{\sqrt{2}}$

- Hệ số dẫn xung:  $\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{\left(1 + \frac{C \beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2}$

- Độ dài tán sắc:  $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$

- Độ rộng xung được nén:  $z_{min} = \frac{|C|}{(1+C^2)^{1/2}} L_D$  (C: hệ số chirp  
 $\beta_2$ : ω bậc 2 cho)

• Ảnh hưởng tán sắc tới tốc độ bit:

Xét trong trường hợp xung gauss không chirp (C=0):

+ Chỉ xét ở  $\beta_2$  ( $\beta_3=0$ ):  $\lambda = 1550$  nm

+ Chỉ xét  $\beta_3$  ( $\beta_2=0$ ):  $\lambda = \frac{1300}{1310}$  nm

TH1: C=0;  $\omega \gg 1$ ;  $\lambda = 1550$  nm:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_D^2 \quad \left( \begin{array}{l} \sigma_\lambda: \text{độ rộng phổ} \\ \sigma_D: \text{độ dẫn xung do tsắc} \end{array} \right)$$

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D$$

$$\sigma_\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \sigma_\lambda$$

$$\text{Yêu cầu: } 4B \cdot \sigma \leq 1 \Rightarrow B \cdot L \cdot |D| \cdot \sigma_\lambda \leq \frac{1}{4}$$

TH2: C=0,  $\omega \gg 1$ ;  $\lambda = 1300$  nm:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{1}{2} (\beta_3 L \sigma_\omega^2)^2 = \sigma_0^2 + \frac{1}{2} (SL \cdot \sigma_\lambda^2)^2$$

$$\sigma_D = |S| \cdot L \cdot \frac{\sigma_\lambda^2}{\sqrt{2}} \quad - \text{Độ dẫn xung do tsắc gây ra}$$

$$\text{Yêu cầu: } B \cdot L \cdot |S| \cdot \sigma_\lambda^2 \leq \frac{1}{\sqrt{8}}$$



$\Gamma_{H3}: C=0; \nu_w \ll 1$  (hay xuất hiện trong đề thi)

\*  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ :

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_2 L / 2\sigma_0)^2 = \sigma_0^2 + \sigma_D^2$$

$$\sigma_{\min} = (\beta_2 L)^{1/2} \Rightarrow \sigma_0 = \sigma_D = (\beta_2 L \cdot \frac{L}{2})^{1/2}$$

$$\text{Yêu cầu: } B \sqrt{|\beta_2| L} \geq \frac{1}{4}$$

\*  $\lambda = 1300 \text{ - } 1310 \text{ nm}$ :

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_3 L / 4\sigma_0^2)^2 = \sigma_0^2 + \sigma_D^2$$

$$\text{Yêu cầu: } B \cdot (\beta_3 L)^{1/3} \geq 0,324$$

### Chương 3: Bộ phát quang:

- Quá trình hấp thụ:

$$\text{Đkien: } E_{ph} = E_g = E_2 - E_1$$

$$E_{ph} = E = \frac{hc}{\lambda} \quad \lambda(\mu\text{m}) = \frac{1,24}{E_g(\text{eV})}$$

- Các vật liệu bán dẫn:  $E_g = 1,1 \text{ eV (Si)}$ ;  $E_g = 0,67 \text{ eV (Ge)}$

+) Hợp chất 3 thành phần:  $Al_x Ga_{1-x} As$ ;  $E_g(x) = 1,424 + 1,247x (0 \leq x \leq 0,45)$

+) Hợp chất 4 thành phần:  $In_x Ga_x As_y P_{1-y}$ ;  $E_g(y) = 1,35 - 0,72y + 0,12y^2 (0 \leq y \leq 1)$   
 $\frac{x}{y} = 0,45$

• Quá trình tái hợp:

- Hiệu suất lượng tử nội:  $\eta_{int} = \frac{R_{nn}}{R_{nn} + R_{nr}}$   $\left\{ \begin{array}{l} R_{nn}: \text{tốc độ tái hợp} \\ R_{nr}: \text{tốc độ không tái hợp} \end{array} \right.$

$$\text{Cđ: } \tau = \frac{N}{R} \Rightarrow \eta_{int} = \frac{\tau_{nn}}{\tau_{nn} + \tau_{nr}} \quad (N: \text{nồng độ hạt mang})$$

$$R_{nn} = \frac{N}{\tau_{nn}}; R_{nr} = \frac{N}{\tau_{nr}}$$

- Thời gian sống của hạt mang:  $\tau_c = \frac{N}{R_{nn} + R_{sp}}$

## LED:

- Tham số công suất phát quang:  $P_{ph} = \eta_{ext} \cdot P_{int} = \frac{P_{int}}{n(n+1)^2}$ 
  - $\eta_{ext}$ : hiệu suất lg tử ngoài
  - $P_{int}$ : cs phát quang (1)
- Hiệu suất lượng tử tổng:  $\eta_{tot} = \frac{P_{ph}}{P_e} \approx \eta_{ext} \cdot \eta_{int} = \frac{n_{ph}}{n_e}$ 
  - $P_{ph}$ : cs quang pxa
  - $n_{ph}$ : số photon
- + Hiệu suất lượng tử nội:  $\eta_{int} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{nr} + \tau_m}$
- + Hiệu suất lg tử ngoài:  $\eta_{ext} = \frac{1}{n(n+1)^2}$
- Cs phát quang bên trong:  $P_{int} = \eta_{int} \cdot \frac{I}{q} \cdot h\nu = \eta_{int} \cdot \frac{h \cdot c \cdot I}{q \cdot \lambda}$  ( $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ )
- Độ rộng băng tần điều chế 3dB:  $\Delta f_{3dB} = \sqrt{3} (2\pi \tau_c)^{-1}$

## LASER DIODES (LD):

- Hiệu suất lượng tử vi sai:  $\eta_d = \frac{\eta_{int} \cdot \alpha_{min}}{\alpha_{min} + \alpha_{int}}$
- Hiệu suất lượng tử ngoài:  $\eta_{ext} = \frac{\text{tốc độ pxa photon}}{\text{tốc độ bơm}} = \frac{2 \cdot P_{ph} \cdot h\nu}{I \cdot h\nu} = \frac{2q}{h\nu} \cdot \frac{P_{ph}}{I}$ 

$$\eta_{ext} = \eta_d \left(1 - \frac{I_{th}}{I}\right)$$
- Hiệu suất lượng tử tổng:  $\eta_{tot} = \frac{2P_{ph}}{I \cdot v_0} = \frac{h\nu}{q \cdot v_0} \cdot \eta_{ext} \approx \frac{E_g}{q \cdot v_0} \cdot \eta_{ext}$

## Chương 4: Bộ thu quang (thì vào nhiều)

\* Điều kiện năng lượng:

$$E_p \gg E_g \Leftrightarrow \frac{hc}{\lambda} \gg E_g \Rightarrow \text{tồn tại } \lambda_c = \frac{hc}{E_g}$$

$$\lambda [\mu m] = \frac{1.24}{E_g (eV)}$$

\* Hệ số khuếch đại:

- với PIN:  $R = \frac{\eta \cdot \lambda}{1.24}$

- với APD:  $R = M \cdot \frac{\eta \cdot \lambda}{1.24}$  (M là hệ số khuếch đại)

- Nhiễu nơ:  $\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d) \cdot \Delta f = 2q \cdot (R \cdot P_{in} + I_d) \cdot \Delta f$

- Nhiễu nhiệt:  $\sigma_T^2 = \left(\frac{4k_B \cdot T}{R_L}\right) F_n \cdot \Delta f$  ( $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ ;  $T(^{\circ}K)$ )

$I_p$ : dòng vào  
 $P_{in}$ : cs vào  
 $I_d$ : dòng tối  
 $F_n$ : hệ số nhiễu



- Nhiễu trong PIN:  $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d) \cdot \Delta f + (4k_B \cdot T \cdot R_L) \cdot F_n \cdot \Delta f$

- Nhiễu trong APD:  $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q \cdot M^2 \cdot F_A (R \cdot P_{in} + I_d) \cdot \Delta f + \left( \frac{4k_B \cdot T}{R_L} \right) \cdot F_n \cdot \Delta f$

1)  $F_A$  là hệ số nhiễu nội  $F_A \approx M^x$   $\begin{cases} x = 0,3 - \text{Si} \\ x = 0,7 - \text{InGaAs} \\ x = 1 - \text{Ge} \end{cases}$

- Tỷ số tín hiệu trên nhiễu:  $SNR = \frac{I_p^2}{\sigma^2}$

• SNR của bộ thu PIN:

$$\rightarrow SNR = \frac{I_p^2}{\sigma^2} = \frac{(R P_{in})^2}{2q(I_p + I_d) \cdot \Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} \cdot F_n \cdot \Delta f} \Rightarrow \begin{cases} SNR_{\sigma_s}^{(n\sigma)} = \frac{(R P_{in})^2}{2q(I_p + I_d) \cdot \Delta f} \\ SNR_{\sigma_T}^{(nhiệt)} = \frac{(R P_{in})^2}{4k_B \cdot T \cdot R_L \cdot F_n \cdot \Delta f} \end{cases}$$

• SNR của bộ thu APD:

$$1) SNR = \frac{I_p^2}{\sigma^2} = \frac{(M R P_{in})^2}{2q \cdot M^2 F_A (R P_{in} + I_d) \cdot \Delta f + \frac{4k_B T}{R_L} \cdot F_n \cdot \Delta f}$$

$$1) SNR_{\sigma_T}^{(nhiệt)} = \frac{(M R P_{in})^2}{\frac{4k_B \cdot T \cdot F_n \cdot \Delta f}{R_L}}$$

$$1) SNR_{\sigma_s}^{(n\sigma)} = \frac{\frac{R_L}{(M R P_{in})^2}}{2q \cdot F_A \cdot M^2 (R P_{in} + I_d) \cdot \Delta f}$$

- BER (Tỷ số lỗi bit):  $BER = \frac{N_e}{N_t} \left( \frac{\text{số bit lỗi}}{\text{số bit truyền}} \right)$

$$BER = 10^{-9} \Leftrightarrow Q \approx 6$$

$$BER = 10^{-12} \Leftrightarrow Q \approx 7$$

- Hệ số nhân tối ưu:

$$M_{opt} \approx \left[ \frac{4k_B \cdot T \cdot F_n}{k_A \cdot q \cdot R_L (R P_{in} + I_d)} \right]^{1/3}$$

$$M_{opt}^{24x} \approx \frac{4k_B \cdot T \cdot F_n}{x q \cdot R_L (I_p + I_d)} \quad (\text{hay dùng})$$

- Công suất thu tối thiểu:

$$\rightarrow \text{PIN: } \bar{P}_{rec} = \frac{Q \cdot \sigma_T}{R} \quad ; \quad \rightarrow \text{APD: } \bar{P}_{rec} = \frac{Q}{R} \left( q \cdot F_A \cdot \Delta f + \frac{\sigma_T}{M} \right)$$

Trong đó:  $Q$  là hệ số phẩm chất;  $\sigma_T$  dòng nhiễu nhiệt;  $F_A = M^x$