



# Kỹ thuật thông tin quang

## Optical Communications

### (TEL1406)

Bộ môn Tín hiệu và Hệ thống

29/01/2023

1



## Chương 2

# Sợi quang

29/01/2023

2



## Nội dung chương 2

- 2.1. Cấu tạo và phân loại sợi quang
- 2.2. Truyền sóng ánh sáng trong sợi quang
- 2.3. Suy hao trong sợi quang
- 2.4. Tán sắc trong sợi quang
- 2.5. Các giới hạn truyền dẫn gây ra bởi tán sắc
- 2.6. Các hiệu ứng quang phi tuyến

29/01/2023

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

3



## 1- Cấu tạo và phân loại sợi quang

- Cấu tạo sợi quang:



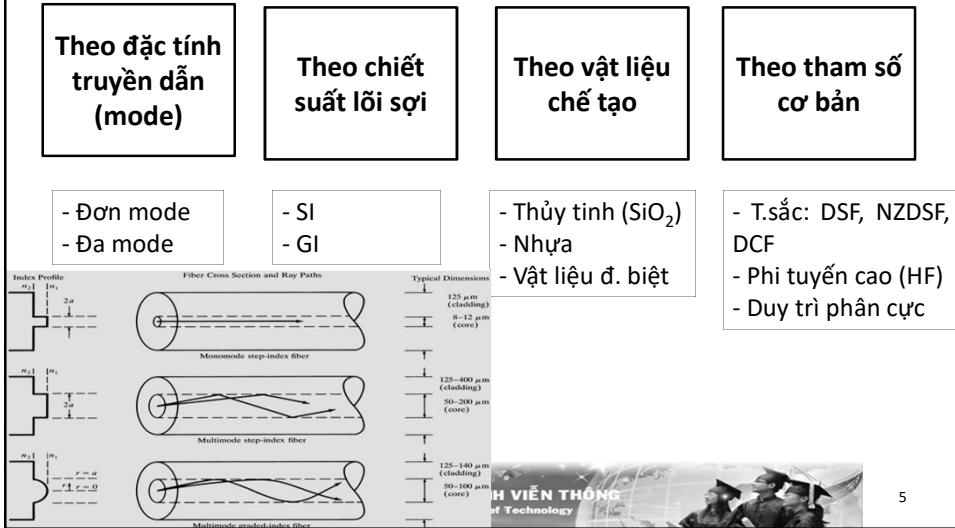
- Ông dẫn sóng điện môi hình trụ tròn đóng vai trò kênh truyền dẫn
- Bao gồm:
  - . Lõi ( $n_1$ ) và vỏ ( $n_2$ ;  $d = 125 \mu\text{m}$ ), chế tạo từ vật liệu trong suốt.
  - . Lớp phủ bảo vệ (vỏ bọc sơ cấp)  $d = 250 \mu\text{m}$
  - . Vật liệu chế tạo sợi: SiO<sub>2</sub> (lõi SiO<sub>2</sub> pha Ge, vỏ SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> pha P)
- Nguyên lý truyền tín hiệu quang: phản xạ nội toàn phần  $\rightarrow n_1 > n_2$
- **Tham số truyền dẫn đặc trưng:**
  - . Suy hao giới hạn khoảng cách truyền dẫn
  - . Tán sắc giới hạn dung lượng truyền dẫn
  - . Các hiệu ứng phi tuyến làm méo tín hiệu và giới hạn hiệu năng hệ thống

29/01/2023



# 1- Cấu tạo và phân loại sợi quang

- Phân loại:



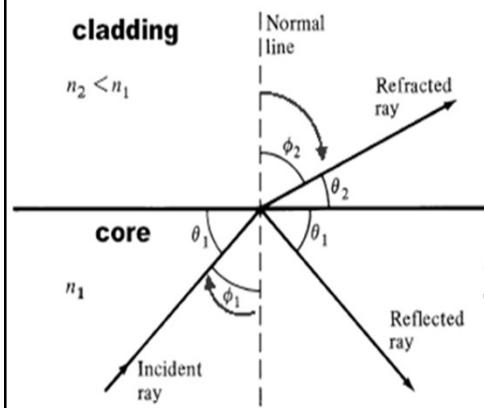
# 2-Truyền sóng ánh sáng

- Cơ sở truyền sóng:

- Trong môi trường đồng nhất, ánh sáng truyền thẳng
- Khi gặp bề mặt phân cách giữa hai môi trường: một phần phản xạ, còn một phần khúc xạ.

- Chiết suất:  $n(\lambda) = c/v$   
- Quan hệ góc tới & góc khúc xạ (Snell law)):

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.1)$$



- Cơ sở truyền á.sáng trong sợi: Phản xạ toàn phần ( $\phi_1 > \phi_c$ )

$$\phi_2 = \pi/2$$

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

$\phi_c$  critical angle

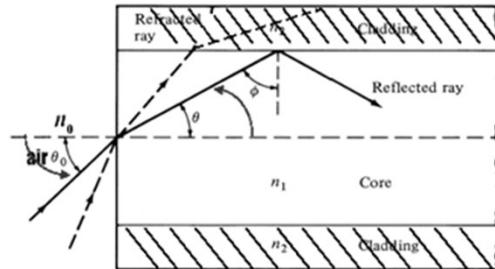


## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Khầu độ số NA:** Xác định góc tiếp nhận ánh sáng cực đại của sợi quang (khả năng ghép AS giữa nguồn và sợi quang)

$$NA = \sin\theta_{0,\max} = ?$$



Theo định luật Snell:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta = n_1 \cos \phi$$

Khi tăng:  $\theta_0 \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow \phi \downarrow$

$$\Rightarrow \max \theta_0 \rightarrow \min \phi$$

$$n_0 \sin \theta_{0,\max} = n_1 \cos \phi_{\min}$$

$$NA = n_0 \sin \theta_{0,\max} = \sin \theta_{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$

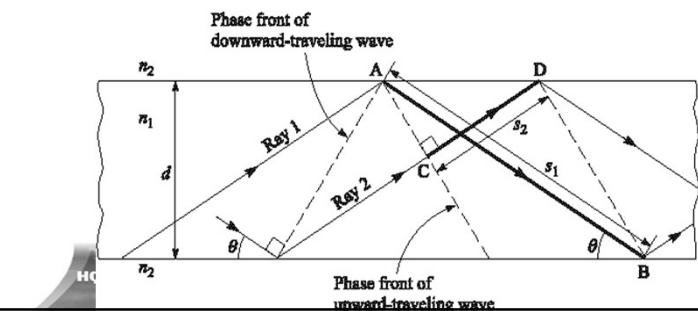


## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Mode truyền:**

- Mỗi mode là một họ tia sáng ứng với một góc lan truyền cho phép xác định (Theo lý thuyết tia)
- Mỗi mode là một nghiệm của phương trình sóng (xác định từ phương trình Maxwell) xác định kiểu phân bố trường điện tử lan truyền trong sợi quang (Theo lý thuyết truyền sóng)



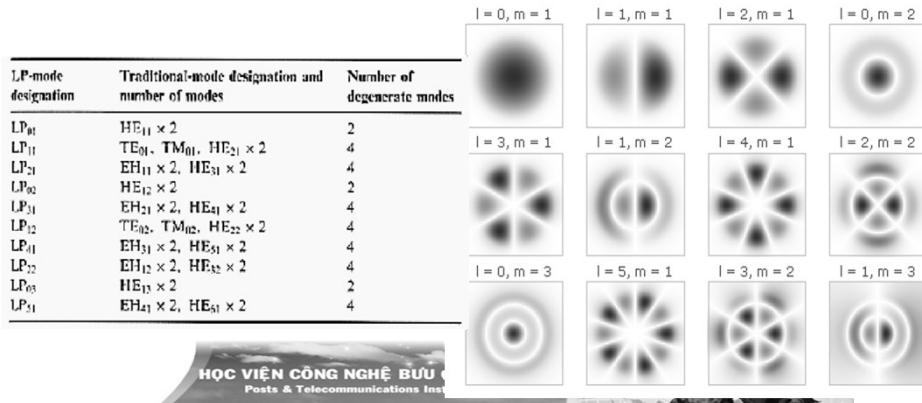


## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Mode phân cực truyền tính  $LP_{lm}$ :**

- Do độ lệch chiết suất rất nhỏ → các mode TM, TE và các mode lai ghép bị suy biến thành mode phân cực truyền tính LP.



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Tham số V: Tần số chuẩn hóa** → Xác định số lượng mode và mức độ giữ năng lượng trong lõi sợi (đặc tính truyền dẫn của sợi quang)

$$(2.4) \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \left\{ \begin{array}{l} V \text{ là hợp 3 tham số thiết kế:} \\ a; \lambda \text{ và } \Delta. \end{array} \right.$$

- Quan hệ với hằng số lan truyền chuẩn hóa, b:

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \approx \frac{(\beta/k) - n_2}{n_1 - n_2} \quad (2.5)$$

Với:  $\beta$  - hằng số lan truyền của mode tương ứng,  $k = 2\pi/\lambda$

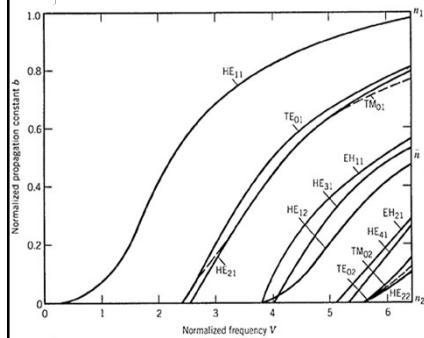
- Mỗi mode được đặc trưng bởi một hằng số lan truyền b xác định
- b là một hàm của V, mỗi mode có một giá trị V cắt xác định.



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Đối với các mode LP: hằng số b được xác định cho các mode khác nhau bởi công thức sau



$$LP_{01}: b_{01} = 1 - \left[ \frac{1 + \sqrt{2}}{1 + (4 + V^4)^{\frac{1}{4}}} \right]^2 \quad (2.6)$$

$$LP_{\ell m}: b_{\ell m} = 1 - \frac{U_c^2}{V^2} \cdot \exp \left[ \frac{2}{S} \left( \arcsin \left( \frac{S}{U_c} \right) - \arcsin \left( \frac{S}{V} \right) \right) \right] \quad (2.7)$$

$$S = \sqrt{U_c^2 - \ell^2 - 1}$$

$$U_c = A - \frac{B - 1}{8A} - \frac{4(B - 1)(7B - 31)}{3(8A)^3}$$

$$A = \pi \cdot \left[ m + \frac{1}{2}(\ell - 1) - \frac{1}{4} \right]; B = 4(\ell - 1)^2.$$

- Bước sóng mà tại đó  $b = 0$  được gọi là bước sóng cắt và được tính:

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi}{V_{cutoff}} a n_1 \sqrt{2} \Delta \quad (2.8)$$

11



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Trong sợi quang, công suất không bằng 0 tại tiếp giáp giữa lõi và vỏ.
- Đối với mỗi mode, một phần công suất được mang trong lõi, phần còn lại ngoài vỏ

$$\frac{P_{clad}}{P} = 1 - \frac{P_{core}}{P} \quad (2.9)$$

- Khi  $V$  càng gần với giá trị cắt của mode nào, tại mode đó càng nhiều công suất ở ngoài vỏ
- Tổng công suất trung bình** (truyền ở vỏ) gần đúng:

$$\left( \frac{P_{clad}}{P} \right)_{total} = \frac{4}{3} M^{-1/2} \quad (2.10)$$

Trong đó:  $M$  – số lượng mode truyền trong sợi

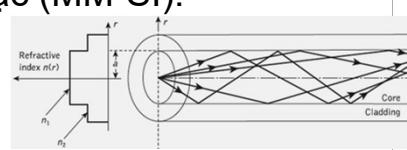


## 2-Truyền sóng ánh sáng

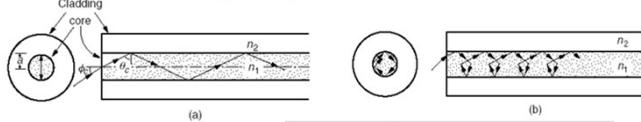
- Sợi đa mode chiết suất bậc (MM-SI):

- Mặt cắt chiết suất:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases} \quad (\text{core}) \quad (\text{cladding}) \quad (2.11)$$



- Sợi truyền nhiều mode (hoặc tia sáng)
- Quỹ đạo các tia lan truyền có dạng zigzag, gồm 2 loại tia: tia kinh tuyến và tia nghiêng hoặc tia xoắn



- Số lượng mode truyền:  $N \approx \frac{V^2}{2}$  (for  $V \gg 2.405$ )  
 $\approx (kan_1)^2 \Delta = \left(\frac{2\pi an_1}{\lambda}\right)^2 \Delta \quad (2.12)$

- Tán sắc mode lớn → giới hạn băng tần truyền dẫn của sợi

13

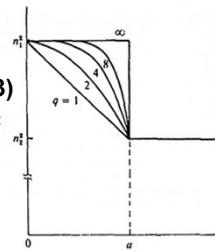


## 2-Truyền sóng ánh sáng

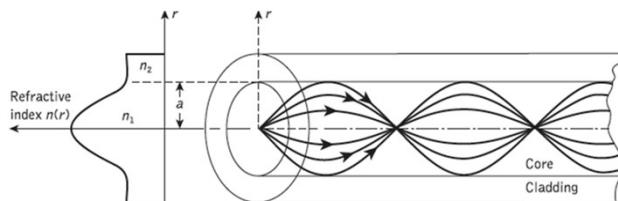
- Sợi đa mode chiết biến đổi (MM-GI):

- Mặt cắt chiết suất:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} & \text{for } r < a \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} \approx n_1(1 - \Delta) = n_2 & \text{for } r > a \end{cases} \quad (2.13)$$



$g$  – hệ số mặt cắt chiết suất, thường  $g \approx 2$



- Quỹ đạo các tia lan truyền có dạng đường cong hình sin do bị đổi hướng liên tục,

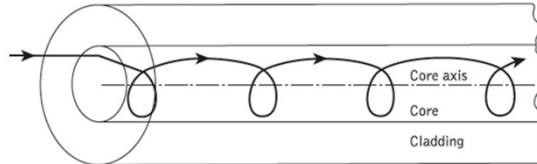
14



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Sợi đa mode chiết biến đổi (MM-GI):

- Sợi truyền nhiều mode (hoặc tia sáng), cũng gồm 2 loại tia: tia kinh tuyến và tia nghiêng hoặc tia xoắn



- Khẩu độ số:  $NA(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} = NA_{\max} \sqrt{1 - (r/a)^g}$  (2.14)

Với:  $NA_{\max} = NA_{MM-SI} = n_1 \sqrt{2\Delta}$

- Số lượng mode truyền:

$$N \approx \left( \frac{g}{g+2} \right) \left( \frac{4a^2\pi^2n_1^2\Delta}{\lambda^2} \right) \approx \left( \frac{g}{g+2} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \quad (2.15)$$

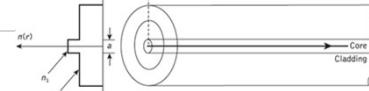
- Tán sắc mode nhỏ hơn → tăng băng tần truyền dẫn của sợi <sup>15</sup>



## 2-Truyền sóng ánh sáng

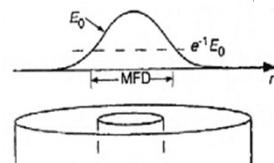
- Sợi đơn mode (SM):

- Chỉ truyền một mode duy nhất, mode LP01
- Điều kiện đơn mode:  $V < 2,405$  (All fibers:  $2 < V < 2,405$ )
- Phân bố trường: gần đúng dạng Gauss
- Đường kính trường mode (MFD): xác định phạm vi mặt cắt của trường mode cơ bản, thường lớn hơn đường kính lõi sợi
- Diện tích hiệu dụng:  $A_{eff} = \pi w_0^2$  (2.16)



- Hệ số giam hãm:

$$\Gamma = \frac{P_{core}}{P_{total}} = \frac{\int_0^a |E_x|^2 r dr}{\int_0^\infty |E_x|^2 r dr} = 1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{w_0^2}\right) \quad (2.17)$$



- Không có tán sắc mode → băng tần truyền dẫn lớn

<sup>16</sup>



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Bài tập

2.1- Cho sợi quang đa mode chiết suất bậc (MM-SI) có đường kính lõi  $50 \mu\text{m}$  và hoạt động tại bước sóng  $900 \text{ nm}$ . Biết số lượng mode truyền trong sợi là khoảng  $900$  mode, hãy xác định khẩu độ số (NA) của sợi quang này. Nếu biết độ lệch chiết suất của sợi là  $1,5\%$ , hãy xác định chiết suất của lõi sợi.

2.2- Cho sợi quang có đường kính lõi  $50 \mu\text{m}$  và hoạt động tại bước sóng  $850 \text{ nm}$ . Biết sợi có độ lệch chiết suất là  $2\%$  với chiết suất lớp vỏ  $n_2 = 1,45$ . Hãy xác định số lượng mode mà sợi có thể hỗ trợ khi:

- a/ Sợi có mặt cắt chiết suất bậc.
- b/ Sợi có mặt cắt chiết suất biến đổi với hệ số mặt cắt chiết suất  $g = 2$ .
- c/ Sợi có mặt cắt chiết suất biến đổi với hệ số mặt cắt chiết suất  $g = 2,5$ .

17



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Bài tập:

2.3- Cho sợi quang với các tham số sau:

- + Bán kính lõi:  $a = 4,5 \mu\text{m}$
- + Chiết suất lõi:  $n_1 = 1,46$
- + Độ lệch chiết suất tương đối:  $\Delta = 0,25\%$

Tính  $\lambda_c$  của sợi quang.

18



## 2-Truyền sóng ánh sáng

- Bài tập:

2.4- Xác định tần số chuẩn hóa tại bước sóng  $0,85 \mu\text{m}$  của sợi quang SI có bán kính lõi  $25 \mu\text{m}$ , chiết suất lõi là  $1,48$ ; chiết suất vỏ là  $1,46$ . Hỏi tại bước sóng  $1,3 \mu\text{m}$  có bao nhiêu mode truyền trong sợi quang. Tính tỷ lệ phần trăm công suất ánh sáng truyền trong vỏ trong từng trường hợp.

19



## 3-Suy hao trong sợi quang

- Khái niệm: Sự suy giảm công suất quang trung bình khi AS lan truyền trong sợi

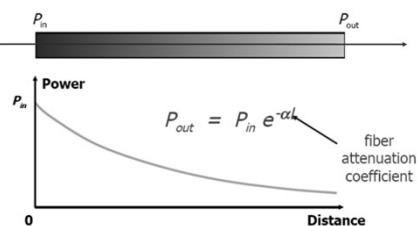
- Biểu thức tính:

→ Tuân theo định luật Beer:

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P$$

$\alpha$  - hệ số suy hao

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L}$$



- Đơn vị: (Hệ số suy hao)

- Đơn vị tuyến tính [ $\text{m}^{-1}$  hoặc  $\text{km}^{-1}$ ]:  $\alpha = \frac{1}{L} \ln \left[ \frac{P(0)}{P(L)} \right]$  (1/km or 1/m)

- Đơn vị logarit:

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{10}{L} \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

$$\alpha_{dB} = \frac{|P_{out}(\text{dBm}) - P_{in}(\text{dBm})|}{L(\text{km})} (\text{dB/km}) \quad (2.18)$$

$$\alpha_{dB} = (10 \log_{10} e) \alpha \approx 4.343 \alpha$$



## 3-Suy hao trong sợi quang

- Bài tập:

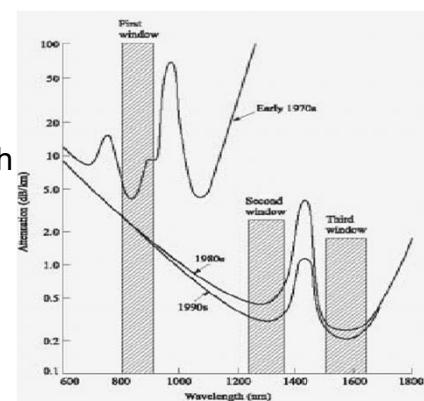
2.5- Công suất quang từ nguồn phát ghép vào đầu vào của sợi là 10mW và công suất thu được tại đầu thu là 0,1 mW. Biết sợi có suy hao là 0,2 dB/km. Tính chiều dài tuyến truyền dẫn (bỏ qua suy hao hàn nối)



## 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

- Suy hao do hấp thụ
- Suy hao do tán xạ tia lumen tĩnh
- Suy hao do uốn cong
- Một số nguyên nhân khác





### 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

➤ Suy hao do hấp thụ: gồm 2 loại chính

#### Tự hấp thụ (do chính thủy tinh):

- Nguyên tử vật liệu chê tạo sợi phản ứng với ánh sáng theo đặc tính chọn lọc bước sóng
- Hấp thụ cực tím và hấp thụ hồng ngoại

Suy hao tự hấp thụ trong vùng 1,3-1,6 $\mu\text{m}$ : ( $<0,03\text{dB/km}$ )

#### Hấp thụ ngoài (có mặt của tạp chất):

- Do ion kim loại
  - Cu, Mn, Fe, Ni, Cr...
  - Hấp thụ mạnh: 0,6 - 1,6 $\mu\text{m}$
  - Nồng độ  $<1\text{ppb}(10^{-9}) \rightarrow \alpha < 1\text{dB/km}$
- Do ion OH:
  - Đỉnh hấp thụ chính: 2,7 $\mu\text{m}$
  - Các đỉnh hấp thụ khác: 0,75; 0,95; 1,24; 1,39 $\mu\text{m}$
  - Nồng độ  $<10^{-8} \rightarrow \alpha < 1\text{dB/km}$   
(đạt được  $<1\text{ppb}$  : sợi khô);  
Nồng độ  $10^{-6} \rightarrow \alpha \sim 40\text{ dB/km}$

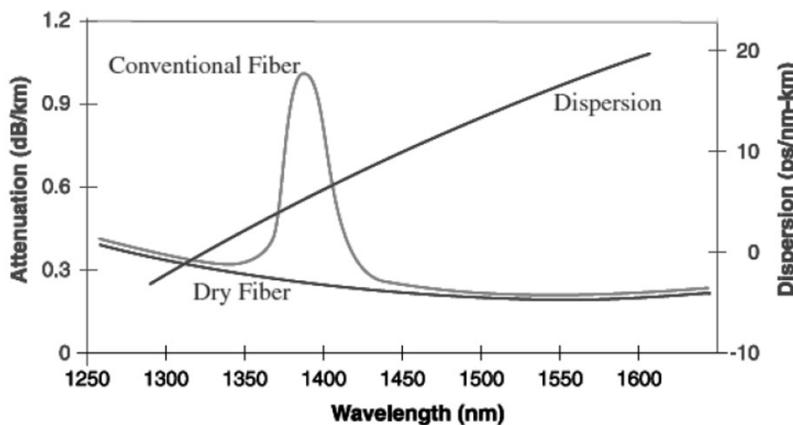


### 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

➤ Suy hao do hấp thụ:

Phổ suy hao và đặc tính tán sắc của sợi khô





### 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

➢ Suy hao do tán xạ tuyền tính:

Do sự không đồng đều rất nhỏ trong lõi sợi (về vật liệu, cấu trúc) → suy hao công suất do năng lượng AS bị chuyển sang mode rò hoặc mode bức xạ.

**Tán xạ Mie:**

- Xảy ra do sự không đồng nhất kích thước cỡ bước sóng.
- Có thể giảm đến mức không đáng kể nhờ kiểm soát chặt chẽ quá trình chế tạo sợi-cáp, tăng độ lệch chiết suất tương đối, loại bỏ tạp chất → suy hao do Mie <0,03 dB/km

**Tán xạ Rayleigh:**

- Là cơ chế tổn hao nội tại mạnh nhất trong vùng bước sóng làm việc của sợi quang.
- Xảy ra do sự không đồng nhất có kích thước nhỏ so với bước sóng.



### 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

➢ Suy hao do tán xạ tuyền tính:

**Tán xạ Rayleigh:**

- Hệ số tán xạ Rayleigh:

$$(2.19) \quad \gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 \beta_c K T_F$$

n: chiết suất môi trường  
 p: hệ số quang đàn hồi trung bình  
 $\beta_c (m^2/N)$ : độ nén đẳng nhiệt tại nhiệt độ  $T_F$  (K)  
 K: hằng số Boltzman =  $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$   
 $\lambda(m)$ : bước sóng làm việc  
 $\gamma_R (m^{-1})$ : Hệ số tán xạ Rayleigh

- Hệ số suy hao do tán xạ Rayleigh gây ra (dB/km):

$$\alpha_R = 10 \lg(1/\exp(-\gamma_R \cdot L)) \quad (2.20)$$

Tính  $\alpha_R$  với  $\beta_c = 7 \times 10^{-11} (m^2/N)$ ,  $T_F = 1400K$ ,  $n = 1,46$ ,  $p = 0,286$  và  $L = 1000 \text{ km}$  tại  $\lambda = 850 \text{ nm}$ ;  $1310 \text{ nm}$  và  $1550 \text{ nm}$



### 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

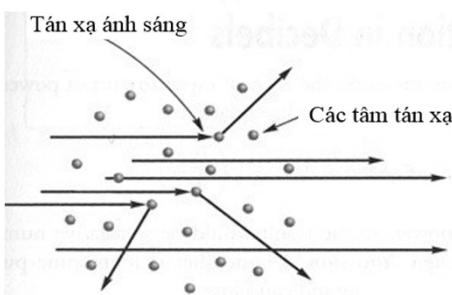
➢ Suy hao do tán xạ tuyến tính:

**Tán xạ Rayleigh:**

- Hệ số suy hao do tán xạ Rayleigh gây ra (dB/km):

$$\alpha_R = C/\lambda^4 \text{ (dB/km)} \quad (2.21)$$

$C=0,7\text{-}0,9 \text{ (dB/km).}\mu\text{m}^{-4} \Rightarrow \alpha_R=0,12\text{-}0,16 \text{ dB/km tại } \lambda=1,55\mu\text{m}$



### 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

➢ Suy hao do uốn cong:

**Uốn cong vi mô:**

Sợi bị uốn cong nhỏ 1 cách ngẫu nhiên (thường xảy ra khi sợi được chế tạo hoặc khi bọc thành cáp)

**Uốn cong vĩ mô:**

Là uốn cong có bán kính uốn cong lớn hơn đường kính của sợi

Sợi càng bị uốn cong → Suy hao càng tăng → Bán kính uốn cong cho phép ( $R_c$ ) →  $R \geq R_c$

**Sợi đa mode:**

$$R_c = \frac{3n_2\lambda}{4\pi(NA)^3} \quad (2.22)$$

**Sợi đơn mode:**

$$R_c = \frac{20\lambda}{(NA)^3} \left( 2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad (2.23)$$

**PT&T**

## 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:
  - Suy hao do uốn cong:

**Uốn cong vi mô:**

Mất mát công suất từ các mode bậc cao

Ghép cặp công suất thành các mode bậc cao

**Uốn cong vĩ mô:**

$\theta < \theta_c$

$\theta > \theta_c$

$\theta_c$

$R$

Phản công suất bị mất do bức xạ

Phản bồi trường

Sợi bị uốn cong

✓ Để giảm suy hao do vi uốn cong: bọc đệm sợi quang và chọn tham số V phù hợp (2 – 2.4)

**PT&T**

## 3-Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:
  - Các suy hao khác:
    - Suy hao do sự không hoàn hảo cấu trúc sợi quang
    - Suy hao do hàn nối
    - Suy hao trong môi trường chiếu xạ

Transmission loss (dB/km)

Wavelength ( $\mu\text{m}$ )

Initial  
② 19 days at 30°C  
③ 32 hours at 150°C  
after ②  
④ 2023 hours at 150°C  
after ②

Fiber-B  
 $P_{\text{H}_2} = 1 \text{ atm}$   
150°  
500m

Induced loss (dB/km)

Time (min)

$10^6 \text{ rads/h}$

Under irradiation  
After irradiation

GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> core

Pure SiO<sub>2</sub> core

NH VIỆN THÔNG  
Posts & Telecommunications Institute of Technology

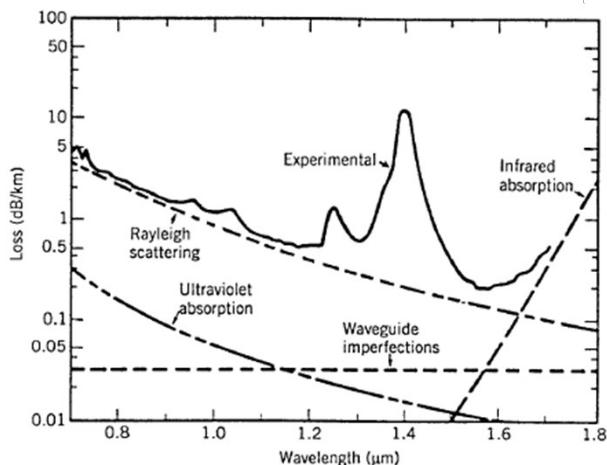
30



### 3-Suy hao trong sợi quang

- Phổ suy hao sợi quang:

- Suy hao tự hấp thụ của vật liệu thủy tinh khi  $\lambda \in (0,8-1,6) \mu\text{m}$  là  $<0,15\text{dB/km}$ . Và  $<0,03\text{dB/km}$  khi  $\lambda \in (1,3-1,6\mu\text{m})$
- $\alpha_R = 0,12-0,16\text{dB/km}$  tại  $\lambda=1,55\mu\text{m}$
- $\alpha_R < 0,01\text{dB/km}$  tại  $\lambda>3\mu\text{m}$



Phổ suy hao của sợi quang và một số cơ chế suy hao cơ bản

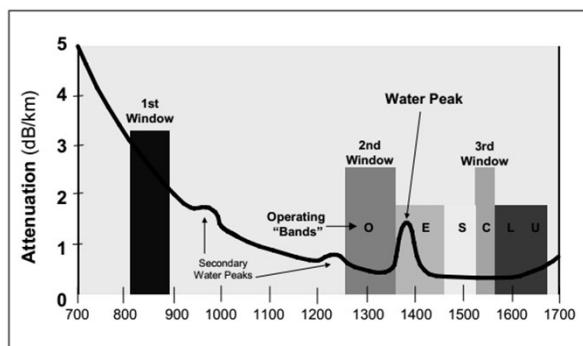


### 3-Suy hao trong sợi quang

- Phổ suy hao sợi quang:

➤ Cửa sổ truyền dẫn:

- 850 nm: 2-3 dB/km
- 1300 nm: 0.5 dB/km
- 1550 nm: 0.2 dB/km

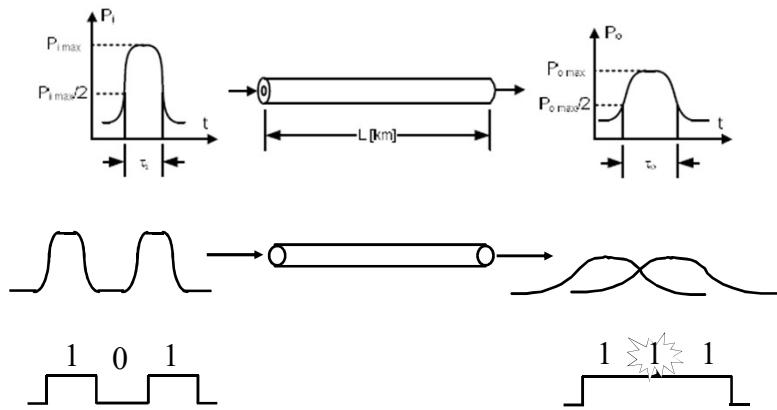




## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Khái niệm:

Là hiện tượng các thành phần tín hiệu quang (mode, bước sóng, trạng thái phân cực) có vận tốc lan truyền khác nhau  
 $\rightarrow$  Xung quang bị dãn rộng về thời gian khi lan truyền  $\rightarrow$  ISI



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Phân loại: Sợi đa mode

Tán sắc mode ( $D_{mode}$ )  
 (Intermodal Dispersion)

Tán sắc nội mode  
 (Intramodal Dispersion)

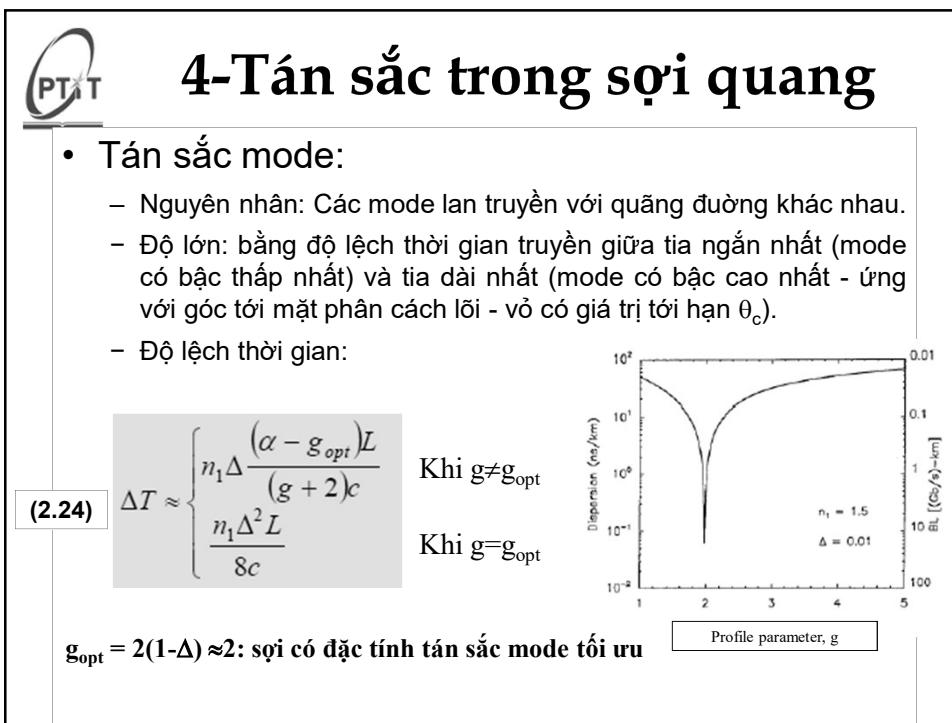
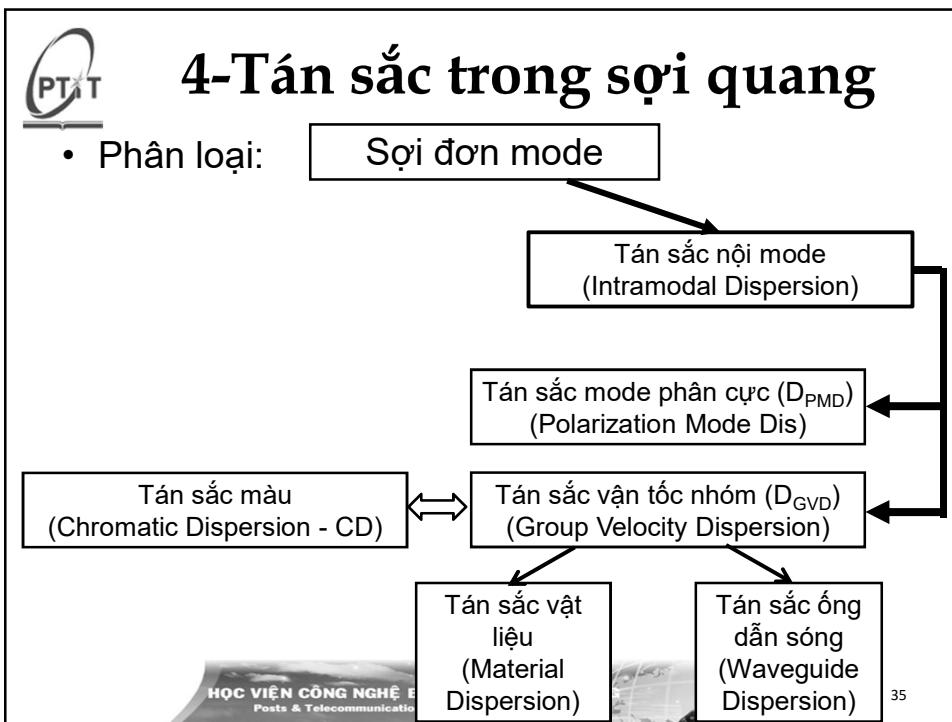
Tán sắc mode phân cực ( $D_{PMD}$ )  
 (Polarization Mode Dis)

Tán sắc màu (sắc thể)  
 (Chromatic Dispersion - CD)

Tán sắc vận tốc nhóm ( $D_{GVD}$ )  
 (Group Velocity Dispersion)

Tán sắc vật  
 liệu  
 (Material  
 Dispersion)

Tán sắc ống  
 dẫn sóng  
 (Waveguide  
 Dispersion)



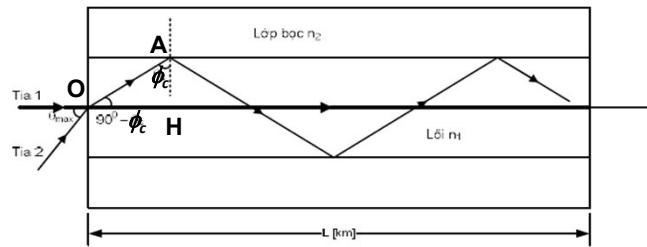


## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode:

➢ Đối với sợi MM-SI:

- Tia ngắn nhất: tia 1 và tia dài nhất: tia 2



- Tán sắc mode:  $\Delta T_{mode(SI)} = T_{max} - T_{min}$  =? (2.25)

- Hệ số tán sắc mode: ( $D_{mode}$ ):  $D_{mode} = \Delta T_{mode}/L$  (ps/km) (2.26)

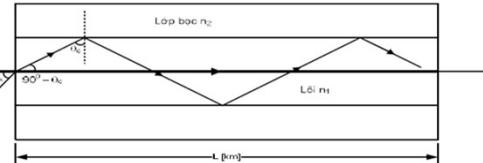


## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode:

➢ Đối với sợi MM-SI:

- Biểu thức tính:



$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \left( \frac{L}{\sin \phi_c} - L \right) = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta. \quad \text{span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">(2.27)}$$

$$\Delta T_{mode(SI)} = L \cdot D_{mode(SI)} \approx \frac{L n_1 \Delta}{c} \approx \frac{L (NA)^2}{2 c n_1} \quad (\text{Khi } \Delta \ll 1) \quad \text{span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">(2.27)}$$

$$D_{mode(SI)} \approx \frac{n_1 \Delta}{c} \approx \frac{(NA)^2}{2 c n_1} \quad \text{span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">(2.28)}$$

**Giới hạn truyền dẫn:  $B \cdot \Delta T_{mode} < 1$**

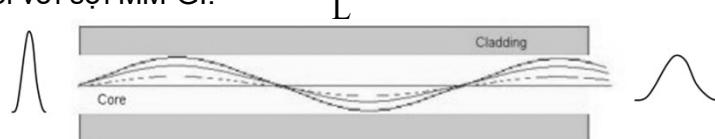
(2.29)



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode:

➤ Đối với sợi MM-GI:



- Các tia có quãng đường ngắn hơn lan truyền với vận tốc nhỏ hơn và ngược lại
- Sợi GI có mặt cắt chiết suất tối ưu có độ trễ thời gian nhỏ nhất

- Độ lệch thời gian truyền:

$$\Delta T_{mode GI} = \frac{Ln_1\Delta^2}{8c}$$

(2.30)

**Giới hạn truyền dẫn:  $B.\Delta T_{mode} < 1$**



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode:

➤ Bài tập:

2.6- Một tuyến thông tin quang dài 6 km, sử dụng sợi đa mode chiết suất bậc. Chiết suất lõi sợi là 1,5 và độ chênh lệch chiết suất tỷ đối là 1%.

a) Tính thời gian trễ giữa mode bậc cao nhất và mode bậc thấp nhất tại đầu ra của sợi

b) Tính thời gian trễ giữa mode bậc cao nhất và mode bậc thấp nhất tại đầu ra của sợi trong trường hợp sợi chiết suất GI.

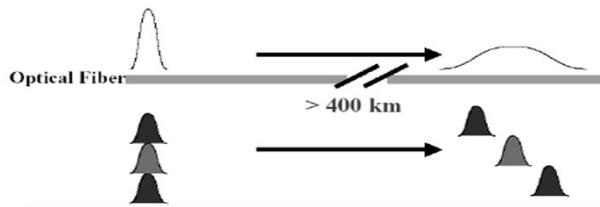


## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

Còn gọi là tán sắc màu (*Chromatic Dispersion*) hoặc gọi tắt là tán sắc ( $D_{Ch}$ ).

- Nguyên nhân:** Các thành phần phổ của xung lan truyền với vận tốc (chính xác hơn là vận tốc nhóm) khác nhau  
→ trễ thời gian giữa các thành phần → mở rộng xung.



- Đơn vị hệ số tán sắc GVD ( $D_{GVD}$ ): [ps/nm.km]
- Tán sắc GVD:  $\Delta T_{GVD} = D_{GVD} \cdot L \cdot \Delta \lambda$  (2.31)
- Gồm 2 loại: t/sắc vật liệu ( $D_M$ ) và t/sắc ống dẫn sóng ( $D_W$ )

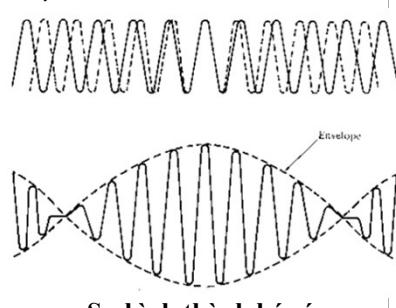


## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

➤ **Vận tốc nhóm:**

- Một nhóm sóng có tần số gần giống nhau sẽ lan truyền sao cho để cuối cùng tạo nên một bó sóng.
- Bó sóng không lan truyền với vận tốc pha của từng sóng riêng biệt mà lan truyền với một vận tốc chung: **vận tốc nhóm ( $v_g$ )**



Sự hình thành bó sóng

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \text{ với: } \beta = \bar{n}k = \frac{\bar{n}\omega}{c} \rightarrow v_g = c/\bar{n}_g$$
(2.32)

với: - C.suất hiệu dụng:  $\bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$

- C.suất nhóm :  $\bar{n}_g = \bar{n} + \omega(d\bar{n}/d\omega)$



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Xét sợi quang đơn mode có chiều dài L → thành phần phẳng có tần số ω sẽ đến đầu ra của sợi quang sau 1 khoảng thời gian T=L/v<sub>g</sub>.
- Δω là độ rộng phẳng của xung → độ mở rộng xung ΔT sau khoảng cách L:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega,$$

Vì:  $\omega = 2\pi c/\lambda \rightarrow \Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2) \Delta\lambda.$

$$\rightarrow \Delta T = -L \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\lambda = LD\Delta\lambda \quad (2.33)$$

$$\frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \beta_2$$

$\beta_2$  là tham số tán sắc vận tốc nhóm (GVD)

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

$D_{GVD}$  là hệ số tán sắc của sợi quang ( $\text{ps}/(\text{nm}.\text{km})$ )



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Tán sắc vật liệu:

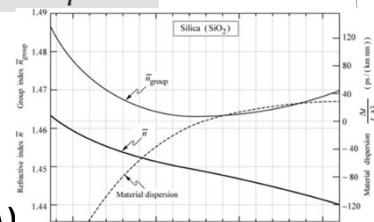
- Nguyên nhân: Do chiết suất vật liệu (sợi) thay đổi theo tần số (bước sóng),  $n=n(\lambda)$ .
- Phương trình Sellmeier:  $n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^M \frac{B_i \omega_i^2}{\omega_i^2 - \lambda^2}$  (2.34)

$\omega_j$  là tần số cộng hưởng và  $B_j$  là cường độ dao động tại đó vật liệu hấp thụ bức xạ điện từ. Đối với sợi thủy tinh tinh khiết  $M = 3$ , các hệ số  $B_1 = 0,6961663$ ,  $B_2 = 0,4079426$ ,  $B_3 = 0,8974794$  và  $\lambda_1 = 0,0684043 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0,1162414 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3 = 0,9896161 \mu\text{m}$ .

- Vận tốc ánh sáng lan truyền:  $v=c/n(\lambda)$

→ các bước sóng khác nhau, truyền với vận tốc khác nhau → dãn xung.

- Hệ số tán sắc vật liệu:  $D_M = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \approx 122 \left( 1 - \frac{\lambda_{ZD}}{\lambda} \right)$  (2.35)



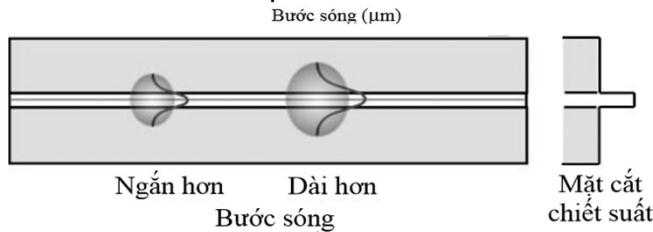


## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

➢ Tán sắc ống dẫn sóng:

- Nguyên nhân: Do công suất tại mỗi thành phần phẳng truyền ra ngoài vỏ khác nhau → tốc độ nhóm khác nhau.



- Chênh lệch chiết suất lõi - vỏ rất nhỏ → 1 phần nồng lượng AS truyền trong vỏ
- $kn_2 < \beta < kn_1$  (giá trị chính xác của  $\beta$  phụ thuộc vào tỷ lệ công suất lõi - vỏ)
- Tỷ lệ công suất AS truyền trong lõi và vỏ phụ thuộc vào bước sóng →  $\beta_{\text{mode}} = \beta(\lambda)$



## 4-Tán sắc trong sợi quang

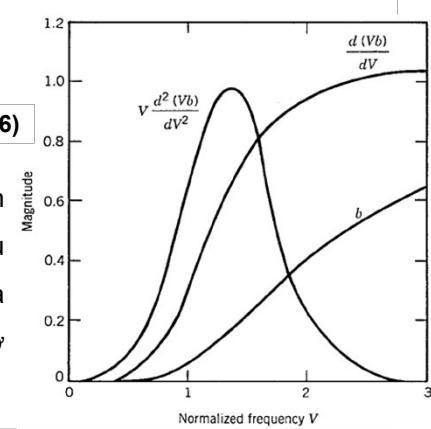
- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

➢ Tán sắc ống dẫn sóng:

- Hệ số tán sắc ống dẫn sóng:

$$D_w = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{V}{\lambda} \frac{d\tau}{dV} \approx -\frac{n_1 \Delta}{c \lambda} \left( V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right) \quad (2.36)$$

Tán sắc ống dẫn sóng phụ thuộc vào tham số  $Vd^2(Vb)/dV^2$ . Hình vẽ cho thấy sự phụ thuộc  $b$ , các tham số đạo hàm  $d(Vb)/dV$  và  $Vd^2(Vb)/dV^2$  vào tham số  $V$  của mode cơ bản.

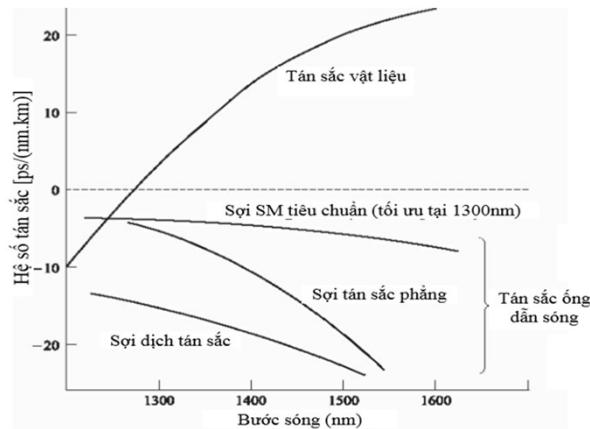




## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

➤ Tán sắc tổng:  $D_{GVD}$  (hoặc  $D_{CH}$ ) =  $D_M + D_W$



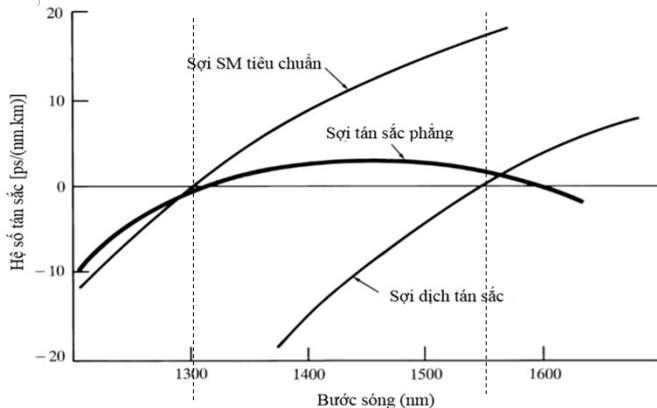
Đường cong tán sắc vật liệu và các đường cong tán sắc ống dẫn sóng của một số sợi quang: sợi đơn mode chuẩn, sợi dịch tán sắc và sợi tán sắc phẳng



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

➤ Tán sắc tổng:  $D_{GVD}$  (hoặc  $D_{CH}$ ) =  $D_M + D_W$



Lưu ý:

- $D < 0$  (normal dispersion): thành phần tần số cao di chuyển chậm hơn thành phần tần số thấp → chirp dương
- $D > 0$  (anomalous dispersion): thành phần tần số cao di chuyển nhanh hơn thành phần tần số thấp → chirp âm

Đường cong tán sắc tổng  $D = D_M + D_W$  của một số sợi quang

Giới hạn truyền dẫn:  $B \cdot \Delta T_{GVD} < 1 \rightarrow B \cdot |D| L(\Delta \lambda) < 1$

(2.37)



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc bậc cao:

- Hiệu ứng tán sắc không triệt tiêu hoàn toàn tại  $\lambda = \lambda_{ZD}$
- Các xung quang vẫn trải qua sự dãn rộng xung do tán sắc bậc cao
- Nguyên nhân: do D cũng là một hàm của bước sóng  
→ các thành phần phổ có D khác nhau
- Đặc trưng bởi độ dốc tán sắc:  $S = dD/d\lambda$

$$S = (2\pi c/\lambda^2)^2 \beta_3 + (4\pi c/\lambda^3) \beta_2, \quad (2.38)$$

trong đó:  $\beta_3 = d\beta_2/d\omega \equiv d^3\beta/d\omega^3$

Giới hạn truyền dẫn (khi hệ thống hoạt động tại vùng  $\lambda_{ZD}$ ):  
 $BL|S|(\Delta\lambda)^2 < 1$



## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Đặc tính tán sắc của một số sợi quang thương mại:

Fiber Type and Trade Name	$A_{eff}$ ( $\mu m^2$ )	$\lambda_{ZD}$ (nm)	$D$ (C band) [ps/(km-nm)]	Slope $S$ [ps/(km-nm $^2$ )]
Corning SMF-28	80	1302–1322	16 to 19	0.090
Lucent AllWave	80	1300–1322	17 to 20	0.088
Alcatel ColorLock	80	1300–1320	16 to 19	0.090
Corning Vascade	101	1300–1310	18 to 20	0.060
Lucent TrueWave-RS	50	1470–1490	2.6 to 6	0.050
Corning LEAF	72	1490–1500	2 to 6	0.060
Lucent TrueWave-XL	72	1570–1580	–1.4 to –4.6	0.112
Alcatel TeraLight	65	1440–1450	5.5 to 10	0.058

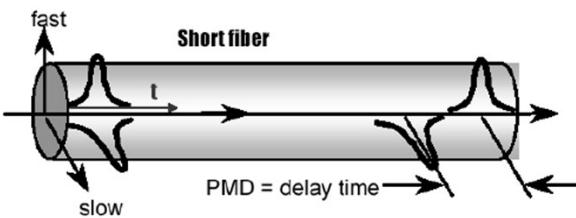


## 4-Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode phân cực (PMD):

- Sợi đơn mode có 2 mode phân cực trực giao
  - Sợi thực tế không hoàn hảo → mỗi mode có chiết suất mode khác nhau (birefringence)  $\beta_x \neq \beta_y$
  - Độ lệch chiết suất mode phân cực:
- $$B_m = |\bar{n}_x - \bar{n}_y| = |\beta_x - \beta_y| / k_0 \quad (2.39)$$
- Xung quang trong sợi: một phần công suất mang bởi một trạng thái phân cực (trục nhanh), một phần mang bởi trạng thái khác (trục chậm)

→ PMD



## 4-Tán sắc trong sợi quang

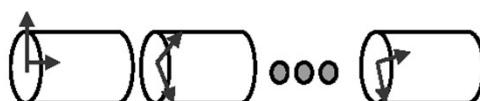
- Tán sắc mode phân cực (PMD):

- Độ trễ thời gian giữa 2 mode phân cực:

$$\Delta\tau_{PMD} = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \quad \text{Time delay} \quad \text{ps/km} \quad (2.40)$$

**For short fiber (no coupling or no rotation)**

- Đối với sợi quang dài: có sự ghép cặp mode => cân bằng thời gian truyền → giảm PMD



- Nhiều ghép cặp mode tương ứng với một giá trị PMD hiệu dụng  
→ Độ trễ nhóm vi sai (DGD)



## Suy hao, tán sắc trong sợi quang

- Bài tập:**

2.7- Cho hệ thống truyền dẫn sợi quang tại 1,55 μm có mức công suất phát quang là 1 mW, được truyền qua tuyến sợi quang dài 80 km với suy hao trung bình là 0,22 dB/km.

- Hãy xác định mức công suất quang đi vào bộ thu quang.
- Nếu biết hệ thống yêu cầu mức công suất thu nhỏ nhất tại bộ thu là -19,8 dBm, hãy xác định khoảng cách tối đa của tuyến truyền dẫn sợi quang.

2.8- Sợi đa mode chiết suất bậc có đường kính lõi 50 μm được thiết kế để giới hạn tán sắc mode chỉ 10 ns/km. Biết chiết suất lõi sợi là 1,45.

- Hãy xác định khẩu độ số của sợi quang.
- Xác định giới hạn tốc độ truyền dẫn trên 1 km tại bước sóng 850 nm khi giả sử độ dãn xung không được vượt quá một chu kì bit.

53



## Các giới hạn truyền dẫn

- Phương trình truyền dẫn cơ bản của sợi quang**

- Dãn xung sinh ra sự phụ thuộc của  $\beta$  vào tần số
  - Trong trường hợp các xung có  $\Delta\omega \ll \omega_0$ ,
- Khai triển  $\beta(\omega)$  thành chuỗi Taylor:

$$\beta(\omega) = \bar{n}(\omega) \frac{\omega}{c} \approx \beta_0 + \beta_1 \Delta\omega + \frac{\beta_2}{2} (\Delta\omega)^2 + \frac{\beta_3}{6} (\Delta\omega)^3 \quad (2.41)$$

$$\beta_1 = \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{v_g}$$

$$\beta_2 = \left. \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad \text{2nd order dispersion or GVD}$$

$$\beta_3 = \left. \frac{d^3\beta}{d\omega^3} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\lambda^2}{(2\pi c)^2} [\lambda^2 S + 2\lambda D] \quad \text{3rd order dispersion or GVD}$$

54



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

Phạm vi : sợi đơn mode → xem xét ảnh hưởng của tán sắc CD

- Phương trình truyền dẫn cơ bản của sợi quang (khi xét ảnh hưởng của tán sắc CD) cho thành phần biên độ xung biến đổi chậm ( $A$ ):

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = 0. \quad (2.42)$$

- Khai triển thành một khung thời gian tham chiếu dịch chuyển theo xung và đưa vào các tọa độ mới (Chuẩn hóa theo tốc độ lan truyền của xung):

$$t' = t - \beta_1 z \quad \text{and} \quad z' = z,$$

$$\frac{\partial A}{\partial z'} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t'^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t'^3} = 0. \quad (2.43)$$

- Phương trình (2.43) được sử dụng để mô tả quá trình truyền xung quang và dấu ' ở  $z'$  và  $t'$  có thể bỏ đi cho đơn giản.



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 1- Ảnh hưởng của tán sắc khi truyền xung Gauss có chirp

- Xung Gauss ban đầu:

$$A(0, t) = A_0 \exp \left[ -\frac{1+iC}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^2 \right], \quad (2.44)$$

với:  $A_0$  – biên độ đỉnh xung;  $A(0,t)$ - biên độ xung tại  $z=0$

C- hệ số chirp, chirp (dịch t/số sóng mang theo (t)) được xác định:

$$\delta\omega(t) = -\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{C}{T_0^2} t,$$

$T_0$  – đặc trưng cho 1/2 độ rộng xung tại điểm cường độ 1/e & l/hệ với  $T_{FWHM}$ :

$$T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 \approx 1.665 T_0.$$

Nửa độ rộng phẳng (tại 1/e) được xác định:  $\Delta\omega_0 = (1+C^2)^{1/2} T_0^{-1}$

( $C=0$ : không có chirp, xung có phẳng nhỏ nhất: (gọi là **bị giới hạn triển khai**)

- Xung Gauss đầu ra: xác định bằng việc giải phương trình truyền dẫn 2.48:

$$A(z, t) = \frac{A_0}{\sqrt{Q(z)}} \exp \left[ -\frac{(1+iC)t^2}{2T_0^2 Q(z)} \right], \quad (2.45) \quad \text{với: } Q(z) = 1 + (C-i)\beta_2 z / T_0^2.$$



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

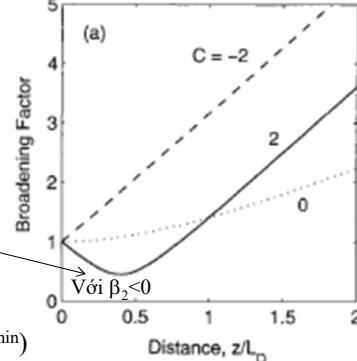
### 1- Ảnh hưởng của tán sắc khi truyền xung Gauss có chirp

- Hệ số dãn xung (khi bỏ qua ảnh hưởng của  $\beta_3$ ):

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2} \quad (2.46)$$

$$\delta\omega(t) = -\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{C}{T_0^2}t,$$

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad \text{Dispersion length}$$



Độ rộng xung được nén:

$$z_{\min} = [|C|/(1+C^2)] L_D.$$

$$T_1^{\min} = T_0/(1+C^2)^{1/2}.$$

$z_{\min}$  là z tại đó xung bị nén nhỏ nhất ( $T_1^{\min}$ )

Laser điều chế trực tiếp thường có  $C = -6 \div -2$



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 1- Ảnh hưởng của tán sắc khi truyền xung Gauss có chirp

- Hệ số dãn xung (khi xét cả ảnh hưởng của  $\beta_3$ ):

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1+C^2)^2 \left(\frac{\beta_3 L}{4\sqrt{2}\sigma_0^3}\right)^2 \quad (2.47)$$

$\sigma = [\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2]^{1/2}$  - Độ rộng xung hiệu dụng (rms)

$\sigma_0$ : độ rộng rms của xung tại đầu vào ( $\sigma_0 = T_0/\sqrt{2}$ )

#### Lưu ý:

- Khi xét đến  $\beta_3$ , xung không còn là dạng Gauss nữa mà hình thành đuôi.
  - Các kết quả ở trên có được với giả thiết độ rộng phổ của nguồn phát rất nhỏ.
- Tổng quát, khi phổ nguồn phát tương đối lớn, ta có:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1+V_\omega^2) \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1+C^2+V_\omega^2)^2 \left(\frac{\beta_3 L}{4\sqrt{2}\sigma_0^3}\right)^2 \quad (2.48)$$

Với  $V_\omega = 2\sigma_\omega\sigma_0$ ,  $\sigma_\omega$  là độ rộng phổ rms của nguồn Gauss



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 2- Ảnh hưởng của tán sắc đến tốc độ bit (giới hạn)

- Phương trình cơ bản:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1 + V_\omega^2) \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1 + C^2 + V_\omega^2)^2 \left(\frac{\beta_3 L}{4\sqrt{2}\sigma_0^3}\right)^2 \quad (2.49)$$

Với  $V_\omega = 2\sigma_\omega\sigma_0$ ,  $\sigma_\omega$  là độ rộng phổ rms của nguồn Gauss

$$T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 \approx 1.665 T_0. \quad (\sigma_0 = T_0 / \sqrt{2})$$

- Các trường hợp nghiên cứu:

1. Xung Gauss không chirp ( $C=0$ )

. Khi nguồn quang có độ rộng phổ rộng ( $V_\omega >> 1$ ):

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

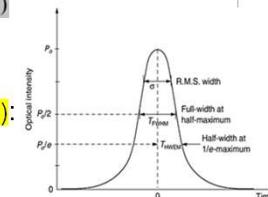
+ Chỉ xét  $\beta_3$  ( $\beta_2=0$ ): 1300/1310nm

. Khi nguồn quang có độ rộng phổ hẹp ( $V_\omega << 1$ ):

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

+ Chỉ xét  $\beta_3$  ( $\beta_2=0$ ): 1300/1310nm

1. Khi xung Gauss có chirp ( $C \neq 0$ )



Điều kiện giới hạn:

$$4B\sigma \leq 1$$

(2.50)



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 2. Ảnh hưởng của tán sắc đến tốc độ bit

2.1 Khi bỏ qua ảnh hưởng của chirp ( $C=0$ ) (xung Gauss không chirp)

2.1.1 Trường hợp nguồn quang có độ rộng phổ rộng ( $V_\omega >> 1$ ):

a. Khi hệ thống làm việc cách xa bước sóng có tán sắc = 0 → bỏ qua ảnh hưởng của  $\beta_3$  ( $\beta_3=0$ ) →

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_2 L \sigma_\omega)^2 \equiv \sigma_0^2 + (DL\sigma_\lambda)^2, \rightarrow \sigma = (\sigma_0^2 + \sigma_D^2)^{1/2} \quad (2.51)$$

Với  $\sigma_\lambda$  là độ rộng phổ rms tính theo bước sóng

$\sigma_D \equiv |D|L\sigma_\lambda$  - là độ dãn xung do tán sắc gây ra

Yêu cầu:  $\sigma \leq T_B/4$  với  $T_B = 1/B$ , →  $4B\sigma \leq 1$

$$\text{Ở giới hạn, } \sigma_D \gg \sigma_0, \rightarrow \sigma \approx \sigma_D = |D|L\sigma_\lambda \rightarrow BL|D|\sigma_\lambda \leq \frac{1}{4}. \quad (2.52)$$



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 2. Ảnh hưởng của tán sắc đến tốc độ bit

2.1 Khi bỏ qua ảnh hưởng của chirp ( $C=0$ ) (xung Gauss không chirp)

2.1.1 Trường hợp nguồn quang có độ rộng phô rộng rộng ( $V_\omega >> 1$ ):

b. Khi hệ thống làm việc tại bước sóng có tán sắc = 0  $\rightarrow \beta_2=0$  nhưng không bỏ qua được ảnh hưởng của  $\beta_3 \rightarrow$

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{1}{2}(\beta_3 L \sigma_\omega^2)^2 \equiv \sigma_0^2 + \frac{1}{2}(SL\sigma_\lambda^2)^2 \rightarrow \sigma = (\sigma_0^2 + \sigma_D^2)^{1/2} \quad (2.53)$$

$\sigma_D \equiv |S|L\sigma_\lambda^2/\sqrt{2}$  - là độ dãn xung do tán sắc gây ra

Yêu cầu:  $\sigma \leq T_B/4$  với  $T_B = 1/B$ ,  $\rightarrow 4B\sigma \leq 1$

$$\text{Ở giới hạn, } \sigma_D \gg \sigma_0, \rightarrow BL|S|\sigma_\lambda^2 \leq 1/\sqrt{8} \quad (2.54)$$



61



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 2. Ảnh hưởng của tán sắc đến tốc độ bit

2.1 Khi bỏ qua ảnh hưởng của chirp ( $C=0$ )

2.1.2 Trường hợp nguồn quang có độ rộng phô hẹp ( $V_\omega << 1$ ):

a. Khi hệ thống làm việc cách xa bước sóng có tán sắc = 0  $\rightarrow$  bỏ qua ảnh hưởng của  $\beta_3 \rightarrow$

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_2 L/2\sigma_0)^2 \equiv \sigma_0^2 + \sigma_D^2 \quad (2.55)$$

$\rightarrow \sigma_D$  phụ thuộc vào độ rộng xung ban đầu  $\sigma_0$

$\sigma$  min khi:  $\sigma_0 = \sigma_D = (|\beta_2|L/2)^{1/2} \rightarrow \sigma = (|\beta_2|L)^{1/2}$

Yêu cầu:  $\sigma \leq T_B/4$  với  $T_B = 1/B$ ,  $\rightarrow 4B\sigma \leq 1$

$$\rightarrow B\sqrt{|\beta_2|L} \leq \frac{1}{4}. \quad (2.56)$$



62



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 2. Ảnh hưởng của tán sắc đến tốc độ bit

2.1 Khi bỏ qua ảnh hưởng của chirp ( $C=0$ )

2.1.2 Trường hợp nguồn quang có độ rộng phổ hẹp ( $V_{\omega} \ll 1$ ):

a. Khi hệ thống làm việc tại vùng bước sóng có tán sắc =0 ( $\beta_2 \approx 0$ ) → không bỏ qua được ảnh hưởng của  $\beta_3$  →

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_3 L / 4\sigma_0^2)^2 / 2 \equiv \sigma_0^2 + \sigma_D^2. \quad (2.57)$$

$$\sigma \text{ min khi: } \sigma_0 = (|\beta_3|L/4)^{1/3} \rightarrow \sigma = (\frac{3}{2})^{1/2}(|\beta_3|L/4)^{1/3}$$

Yêu cầu:  $\sigma \leq T_B/4$  với  $T_B = 1/B$ ,

$$\rightarrow B(|\beta_3|L)^{1/3} \leq 0.324. \quad (2.58)$$



63



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

### 2. Ảnh hưởng của tán sắc đến tốc độ bit

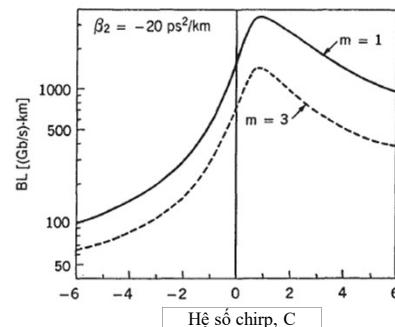
2.2 Khi xét đến ảnh hưởng của chirp ( $C \neq 0$ )

- Thực tế: thường xung không phải là Gauss và có chirp

- Sử dụng mô hình xung super-Gauss để khảo sát với tín hiệu NRZ

$$A(0, T) = A_0 \exp \left[ -\frac{1+iC}{2} \left( \frac{t}{T_0} \right)^{2m} \right]$$

- Với  $m=1$ : xung Gauss có chirp
- Với các giá trị  $m$  lớn, xung có dạng gần với xung chữ nhật



Tích BL giới hạn bởi tán sắc như là hàm của hệ số chirp đối với các xung đầu vào dạng Gauss (đường liền) và siêu Gauss (nét đứt)



## 5-Các giới hạn truyền dẫn gây bởi tán sắc

- Bài tập:(Ảnh hưởng của tán sắc khi truyền xung)

**2.9-** Biết quan hệ giữa độ rộng xung rms đầu vào và đầu ra của xung Gauss khi truyền qua sợi quang đơn mode chuẩn tuân theo phương trình dưới đây:

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \left(1 + \frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1 + V_\omega^2) \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1 + C^2 + V_\omega^2)^2 \left(\frac{\beta_3 L}{4\sqrt{2}\sigma_0^3}\right)^2$$

Sợi quang có các tham số tán sắc như sau:

- Tại bước sóng 1,55 μm:  $\beta_2 = -20\text{ps}^2/\text{km}$ ,  $\beta_3 = 0$
- Tại bước sóng 1,3 μm:  $\beta_2 = 0$ ,  $\beta_3 = 0,1 \text{ ps}^3/\text{km}$

Giả sử các xung đầu vào bị giới hạn khai triển và có độ rộng FWHM là 90 ps. Độ rộng phổ nguồn phát rất nhỏ, có thể bỏ qua. Hãy xác định:

- Độ rộng xung đầu ra khi tuyến truyền dẫn có chiều dài 50 km trong các trường hợp hệ thống làm việc tại cửa sổ bước sóng 1,3 và 1,55μm
- Với cự ly truyền dẫn là 50 km. Xác định tốc độ bit giới hạn trong hai trường hợp trên. Nhận xét kết quả thu được.

65



## 5- Các giới hạn truyền dẫn

### • Độ rộng băng tần

- Sợi quang được xem như một hệ thống tuyến tính:

$$P_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-t') P_{\text{in}}(t') dt'. \quad (2.59)$$

$h(t)$  – đáp ứng xung và khai triển Fourier

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(2\pi i f t) dt, \quad (2.60)$$

- Đối với phổ Gauss, hàm truyền đạt của sợi:

$$H(f) = \left(1 + \frac{if}{f_2}\right)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(f/f_1)^2}{2(1+if/f_2)}\right], \quad (2.61)$$

$$f_1 = (2\pi\beta_2 L \sigma_\omega)^{-1} = (2\pi|D|L\sigma_\lambda)^{-1},$$

$$f_2 = (2\pi\beta_3 L \sigma_\omega^2)^{-1} = [2\pi(S + 2|D|/\lambda)L\sigma_\lambda^2]^{-1},$$



66



## 6-Hiệu ứng phi tuyến

- Khái niệm:

- Khi công suất tín hiệu trong sợi quang nhỏ → môi trường tuyến tính:

$$P = \chi E \quad (2.62)$$

- Khi công suất tín hiệu trong sợi quang lớn → môi trường phi tuyến:

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE + \chi^{(3)}EEE \quad (2.63)$$

Với sợi quang  $\chi^{(2)} = 0$

- Hiệu ứng quang được gọi là phi tuyến nếu các tham số của nó phụ thuộc vào cường độ ánh sáng



## 6-Hiệu ứng phi tuyến

- Các hiệu ứng phi tuyến chính:

- Stimulated Raman Scattering (SRS)
- Stimulated Brillouin Scattering (SBS)
- Self-Phase Modulation (SPM)
- Cross-Phase Modulation (XPM)
- Four-Wave Mixing (FWM)

- Nguồn gốc của hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang

- Độ cảm phi tuyến bậc 3 ( $\chi^3$ )
- Phần thực của  $\chi^3$  gây ra SPM, XPM và FWM (hiệu ứng Kerr)
- Phần ảo của  $\chi^3$  gây ra SBS và SRS



## 6-Hiệu ứng phi tuyế̂n

- Phương trình Schrodinger phi tuyế̂n (NSE):

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma |A|^2 A \quad (2.64)$$

- Phương trình NSE là mở rộng từ phtr truyền dã̂n.
- Hệ số phi tuyế̂n  $\gamma = (2\pi/\lambda)(n_2/A_{eff})$ ;  $n_2$  - chiết suất phi tuyế̂n.
- Sợi quang có  $A_{eff}$  lớn (LEAF – large effective-area fiber) sẽ giúp giảm hệ số phi tuyế̂n.
- Hiệu ứng phi tuyế̂n dã̂n đến sự hình thành của các soliton quang.

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

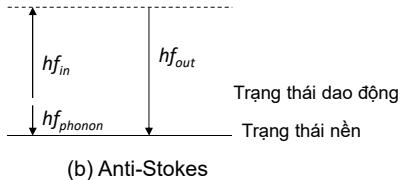
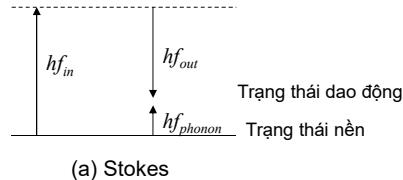
69



## 6-Hiệu ứng phi tuyế̂n

- Tán xạ kích thích:

- Tần số ánh sáng bị tán xạ khác với tần số ánh sáng tới



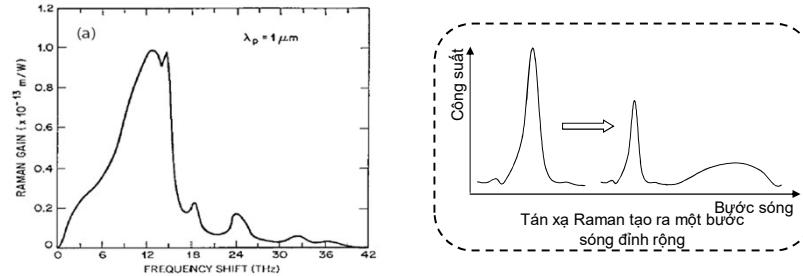
Bảo toàn năng lượng:  $hf_{in} = hf_{out} + hf_{phonon}$  (2.65)

Đặc điểm	SRS	SBS
Tần số phonon	Tần số quang	Tần số âm
Hướng tán xạ	Hai chiều	Ngược chiều lan truyền
Độ dịch tần	13 THz	10 GHz
Phổ khuếch đại	10 – 30 THz	< 100 MHz



## 6-Hiệu ứng phi tuyển

- Tán xạ Raman kích thích:



- Dịch tần Raman:  $f_R = f_p - f_s$  (2.66)
- Tán xạ Stokes thường chiếm ưu thế so với phát xạ phản Stokes
- Khi công suất trong sợi > P ngưỡng → SRS

$$P_{th} \approx 16A_{eff}/(g_R \cdot L_{eff}) \approx 16(\pi w^2)\alpha/g_R \quad (2.67)$$

$$\text{Độ dài hiệu dụng} \rightarrow L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha \approx 1/\alpha \quad (2.68)$$

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

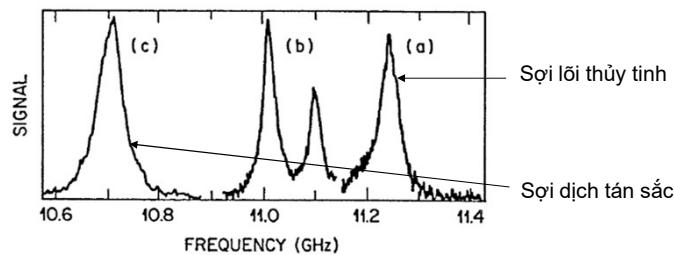
71



## 6-Hiệu ứng phi tuyển

- Tán xạ kích thích:

- Tán xạ Brillouin kích thích:



$$\bullet \text{ Phổ khuyếch đại Brillouin giống với dạng Lorentz: } g_B(\Omega) = \frac{g_B(\Omega_B)}{1 + (\Omega - \Omega_B)^2 T_B^2}. \quad (2.69)$$

$$\bullet \text{ Ngưỡng SBS: } P_{th} \approx 21A_{eff}/(g_B \cdot L_{eff}) \quad (2.70)$$

- Ánh sáng điều biến có ngưỡng SBS cao hơn nhiều

Tốc độ bít  $\uparrow$  → Ngưỡng SBS  $\uparrow$

72



## 6-Hiệu ứng phi tuyến

- Điều chế pha phi tuyến:

- Chiết suất n phụ thuộc vào cường độ EM trong sợi quang:

Cường độ EM  $\Rightarrow$  Chiết suất  $\Rightarrow$  Hiệu ứng Kerr

- Nguồn gốc: Đáp ứng không điều hòa của các điện tử đối với cường độ trường quang

$$\hat{n}_i = n_i + \hat{n}_2 I \quad n_i \text{ i=1,2 core or cladding}$$

$\hat{n}_2$  Kerr constant, nonlinear index coefficient

$$\hat{n}_2 = 2.6 \times 10^{-20} m^2/W \quad \text{for silica fiber}$$

- Xảy ra khi công suất trường quang lớn  $\rightarrow$  xảy ra chủ yếu trong vùng chiều dài hiệu dụng của sợi

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (2.71)$$

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

73



## 6-Hiệu ứng phi tuyến

- Tự điều chế pha (SPM)

- Hệ số truyền dẫn phụ thuộc vào công suất:

$$\hat{\beta} = \beta + k_0 \hat{n}_2 \frac{P}{A_{eff}} = \beta + \gamma P \quad \text{Power dependent}$$

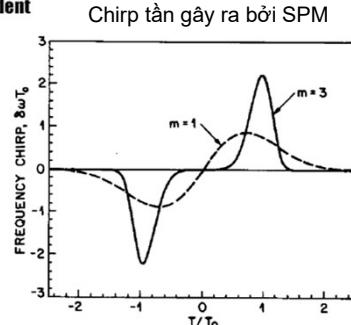
$$\gamma = \frac{2\pi \hat{n}_2}{A_{eff} \lambda} = 1 \sim 5 \frac{1}{(km \cdot W)}$$

$$P = |A(z, t)|^2 \quad \text{Time dependent.}$$

- Cường độ xung quang điều chế pha của chính xung quang đó

- Độ dịch pha phi tuyến:

$$\phi_{NL} = \int_0^L (\hat{\beta} - \beta) dz = \int_0^L \gamma |A(z, t)|^2 dz = \gamma P_m L_{eff} \quad (2.72)$$



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

74



## 6-Hiệu ứng phi tuyến

- Điều chế pha phi tuyến

  - Điều chế pha chéo (XPM):

    - Khi hai hoặc nhiều kênh quang được phát đồng thời trong sợi quang
    - Độ dịch pha phi tuyến của một kênh:

$$\phi_j^{\text{NL}} = \gamma L_{\text{eff}} \left( P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right), \quad (2.73)$$

    - Khó đánh giá tác động của XPM lên hệ thống vì còn phụ thuộc vào tán sắc.
    - Độ dịch pha phi tuyến gây ra bởi XPM chỉ xảy ra khi hai xung xếp chồng ở cùng thời điểm

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

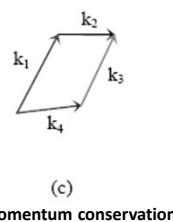
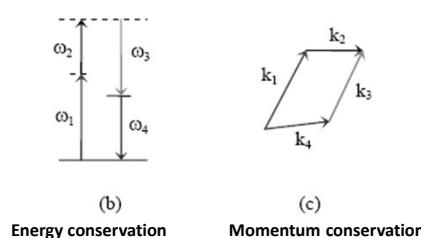
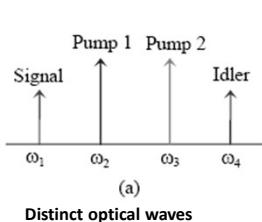
75



## 6-Hiệu ứng phi tuyến

- Trộn bốn sóng (FWM)

  - Khi ba trường quang ở các tần số  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  truyền đồng thời trong sợi quang tạo ra trường quang mới  $\omega_4$



$$\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 \quad \text{all combinations} \quad (2.74)$$

  - Điều kiện phối hợp pha:

$$(2.75) \quad \Delta\beta = \left( -\frac{D_c \lambda^2}{2\pi c} \right) (2\pi\Delta\nu)^2$$

với  $\Delta\nu(\text{Hz})$  là khoảng cách giữa các kênh  
 $D_c$  là hệ số tán sắc của sợi

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

76



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

### 1- Cho tham số sợi chiết suất bậc gồm

- Đường kính lõi:  $50\mu\text{m}$ ; bước sóng hoạt động  $\lambda=1310\text{nm}$
- Chiết suất lõi  $n_1=1.5$ ; chiết suất vỏ  $n_2=1.49$

- **Hãy xác định:**

- Tính số lượng mode truyền trong sợi
- Điều kiện đơn mode của sợi theo bước sóng
- Điều kiện đơn mode của sợi theo đường kính lõi sợi
- Điều kiện đơn mode của sợi theo độ lệch chiết suất giữa lõi sợi và vỏ sợi

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

77



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

### 2- Cho tham số sợi gồm

- Đường kính lõi:  $50\mu\text{m}$ ; bước sóng hoạt động  $\lambda=1310\text{nm}$
- Chiết suất tại tâm sợi  $n_1=1.5$ ; chiết suất vỏ  $n_2=1.4$

- **Hãy xác định:**

- Khẩu độ số, số lượng mode truyền, tán sắc mode nếu sợi là sợi chiết suất bậc ( $g=\infty$ )
- Khẩu độ số, số lượng mode truyền, tán sắc mode nếu sợi là sợi chiết suất biến đổi ( $g=2$ )
- Khẩu độ số, số lượng mode truyền, tán sắc mode nếu sợi là sợi chiết suất tam giác ( $g=1$ )

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

78



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

3- Cho biết sợi quang đơn mode có:

- Công suất đưa vào đầu sợi quang là 10mW.
- Độ nhạy thu của bộ thu đặt tại cuối sợi quang là -10dBm.
- Bỏ qua các suy hao mối nối, mối hàn, connecter

• Hãy xác định:

- Khoảng cách truyền dẫn tối đa nếu hệ số suy hao sợi quang là 3 dB/km ( $\lambda=850\text{nm}$ )
- Khoảng cách truyền dẫn tối đa nếu hệ số suy hao sợi quang là 0.5 dB/km ( $\lambda=1310\text{nm}$ )
- Khoảng cách truyền dẫn tối đa nếu hệ số suy hao sợi quang là 0.2 dB/km ( $\lambda=1550\text{nm}$ )

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

79



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

4- Công thức tính độ dãn rộng xung do ảnh hưởng của tán sắc vật liệu:

$$\sigma_{mat} = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n}{d \lambda^2} \sigma_\lambda$$

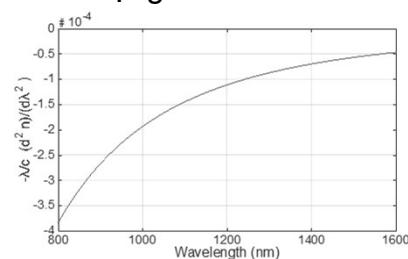
Công thức Sellmeier

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - E^2}$$

tham số cho vật liệu  $\text{SiO}_2$  như sau:  $E=hc/\lambda$  và  $E_0=13,4\text{eV}$  và  $E_d=14,7\text{eV}$

• Hãy tính độ dãn rộng xung do tán sắc vật liệu gây ra khi truyền qua chiều dài 100km nếu sử dụng

- Nguồn quang LED ở  $\lambda=850\text{nm}$  có độ rộng phổ 45nm
- Nguồn quang LD ở  $\lambda=850\text{nm}$  độ rộng phổ 2nm
- Nguồn quang LD ở  $\lambda=1550\text{nm}$  có độ rộng phổ 1nm



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

80



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

5- Công thức tính hệ số tán sắc ống dẫn sóng:

$$D_w = \frac{d\tau}{d\lambda} = -\frac{V}{\lambda} \frac{d\tau}{dV} \approx -\frac{n_1 \Delta}{c \lambda} \left( V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \right)$$



slide 51

- Hãy tính độ dãn rộng xung do tán sắc ống dẫn sóng gây ra khi truyền qua chiều dài 100km nếu sử dụng
  - Nguồn quang LED ở  $\lambda=850\text{nm}$  có đường kính lõi và vỏ lằn lượt là  $9\mu\text{m}$  và  $125\mu\text{m}$ , chiết suất lõi sợi là 1,48 và độ lệch chiết suất  $\Delta = 0.25\%$
  - Nguồn quang LED ở  $\lambda=850\text{nm}$  có đường kính lõi và vỏ lằn lượt là  $9\mu\text{m}$  và  $125\mu\text{m}$ , chiết suất lõi sợi là 1,48 và độ lệch chiết suất  $\Delta = 1\%$
  - Nguồn quang LD ở  $\lambda=1550\text{nm}$  có đường kính lõi và vỏ lằn lượt là  $9\mu\text{m}$  và  $125\mu\text{m}$ , chiết suất lõi sợi là 1,48 và độ lệch chiết suất  $\Delta = 0.25\%$

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

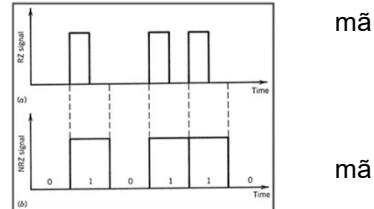
81



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

6- Cho hệ thống TTQ có các tham số sau

- Tốc độ bit 10Gb/s, nguồn phát quang đơn mode ở bước sóng 1550nm, hệ số tán sắc sợi là  $D = 16\text{ps/nm.km}$
- Hãy tính khoảng cách tối đa mà tại đó bắt đầu xảy ra ISI nếu
  - Độ rộng phỗ là 1nm, đường truyền là NRZ
  - Độ rộng phỗ là 1nm, mã đường truyền là RZ 50%
  - Độ rộng phỗ là 2nm, đường truyền là NRZ



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

82



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

### 7- Cho hệ thống TTQ có các tham số sau

- Hoạt động ở bước sóng 1550 nm với tốc độ bit 5Gb/s, sử dụng xung quang Gauss có chirp với độ rộng FWHM là 100ps với  $\beta_2 = -16\text{ps}^2/\text{km}$  và bỏ qua độ rộng nguồn quang

- Hãy tính khoảng cách truyền dẫn tối đa giới hạn bởi tác sắc khi:

a) Hệ số chirp C = -6

b) Xung Gauss không chirp

c) Hệ số chirp C = 6

$$T_{\text{FWHM}} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 \approx 1.665 T_0.$$



$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2}$$



## Câu hỏi/Bài tập chương 2

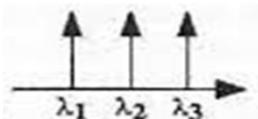
### 8- Tín hiệu chịu độ dịch pha phi tuyến là $180^\circ$ khi truyền đi trên sợi quang có

- Chiều dài truyền dẫn là 40km,  $A_{\text{eff}} = 40\mu\text{m}^2$ ,  $\alpha = 0.2\text{dB/km}$  và chiết suất phi tuyến  $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  tại  $\lambda = 1550\text{nm}$

- Hãy tính công suất quang phát vào sợi nếu

a) Độ dịch pha gây ra bởi SPM trong hệ thống đơn kênh

b) Độ dịch pha gây ra bởi XPM tại từng kênh trong hệ thống gồm 3 kênh bước sóng có công suất trên mỗi kênh bước sóng là đều nhau





## Câu hỏi/Bài tập chương 2

### 9- Hệ thống WDM có các tham số sau

- Sợi quang có hệ số tán sắc  $D_c = 16 \text{ ps/nm.km}$  tại  $\lambda = 1550\text{nm}$  và khoảng cách kênh giữa các bước sóng là  $25\text{GHz}$

- Hãy tính tham số phối hợp pha và tần số các sóng FWM được sinh ra nếu
  - a) Hệ thống WDM gồm 2 kênh bước sóng (FWM suy biến)
  - b) Hệ thống WDM gồm 3 kênh bước sóng
  - c) Hệ thống WDM gồm 4 kênh bước sóng