



Cơ sở kỹ thuật thông tin quang

Fundamentals of Optical Communications

Bộ môn Tín hiệu và Hệ thống

Giới thiệu môn học

- Thời lượng môn học:
 - 3TC/ 4 ĐVHT (32LT + 8BT + 4TNTH + 16TH)
- Mục tiêu:
 - Kiến thức: Môn học cung cấp cho người học những kiến thức cơ sở về thông tin quang:
 - Các thành phần cơ bản trong hệ thống thông tin quang → một số vấn đề trong thiết kế các loại hệ thống thông tin quang.
 - Sau khi học xong môn này, người học nắm được nguyên lý hoạt động của một hệ thống thông tin quang cũng như các nguyên tắc cơ bản trong thiết kế một hệ thống thông tin quang, và làm cơ sở cho các môn học chuyên sâu khác.
 - Kỹ năng: Rèn cho sinh viên có kỹ năng nghiên cứu, phân tích, đánh giá về các thành phần cơ bản và cả hệ thống thông tin quang sợi.

Giới thiệu môn học

- Nội dung:

- Chương 1: **Tổng quan về thông tin quang**
- Chương 2: **Sợi quang**
- Chương 3: **Bộ phát quang**
- Chương 4: **Bộ thu quang**
- Chương 5: **Hệ thống thông tin quang**

Giới thiệu môn học

- Tài liệu tham khảo:

- Bài giảng môn: Cơ sở kỹ thuật thông tin sợi quang, Học viện CNBCVT.
- **G. Keiser**, *Optical Fibre Communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, 2005
- **G. P. Agrawal**, *Fiber-optics Communication Systems*. New York: Academic, 2010.
- **Vũ Văn San**, *Hệ thống thông tin quang*, 2 tập, NXB KHKT.
- **Gerard Lachs**. Fiber Optic Communications – Systems, Analysis, and Enhancements. McGraw-Hill, 1998.

- Đánh giá:

- Chuyên cần: 10 %
- Bài tập/ Thảo luận: 10%
- Thực hành: 10%
- Kiểm tra giữa kì: 10%
- Thi kết thúc học phần: 60%

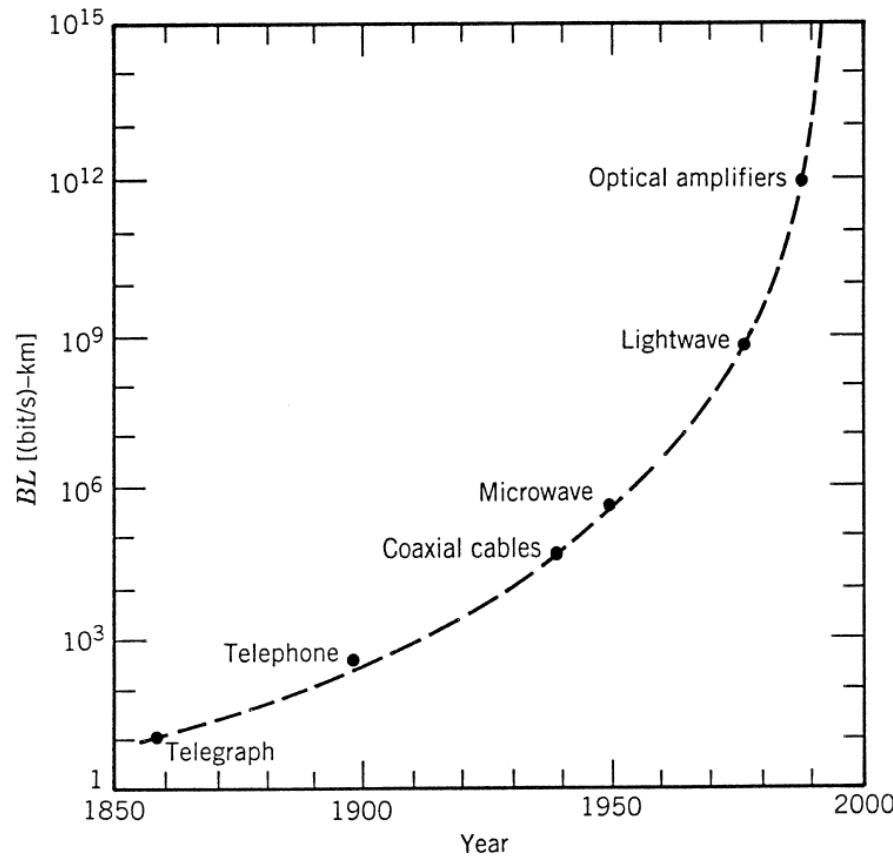


Chương 1

Tổng quan về thông tin quang

Lịch sử phát triển

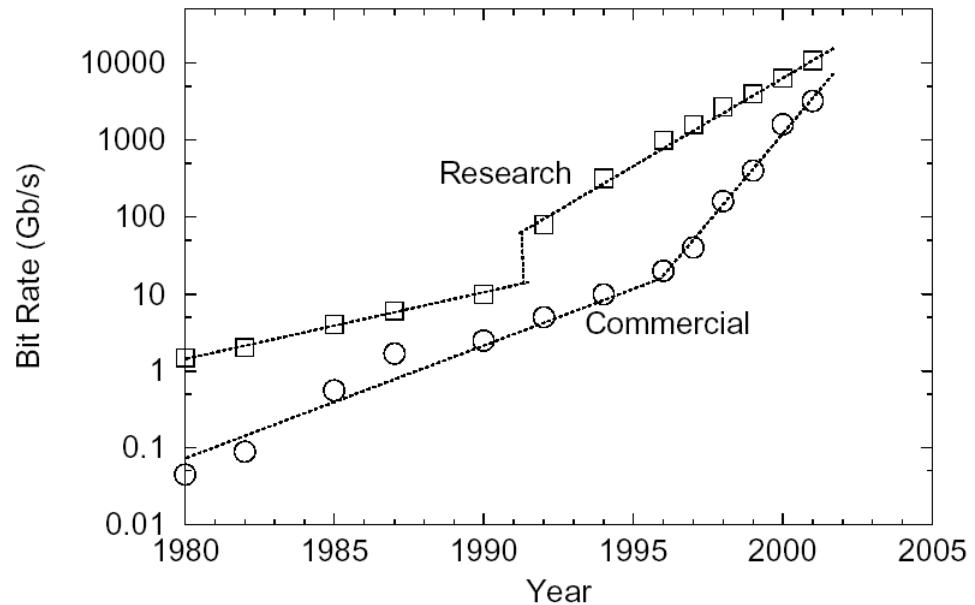
- Quá trình phát triển các hệ thống viễn thông



Lịch sử phát triển

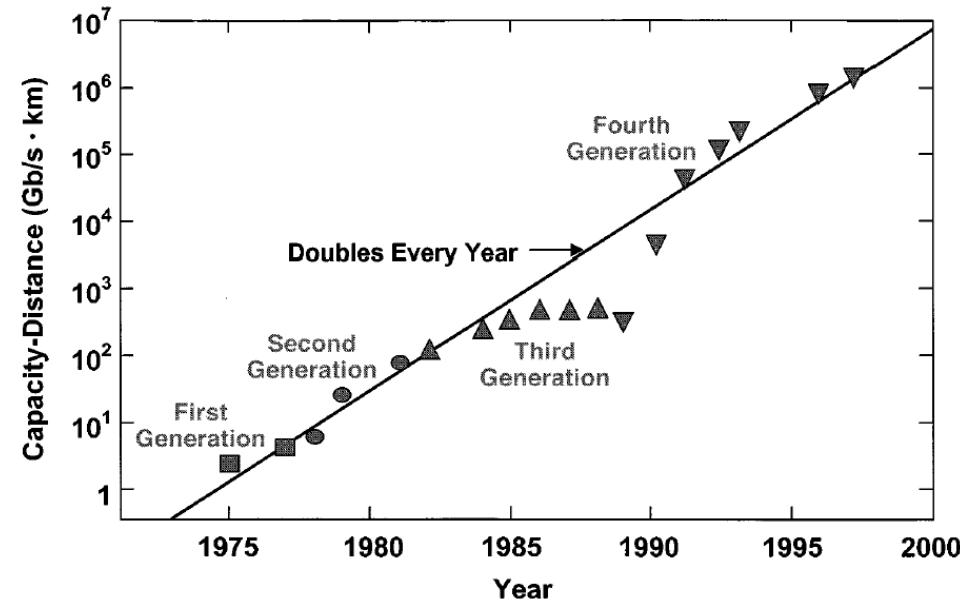
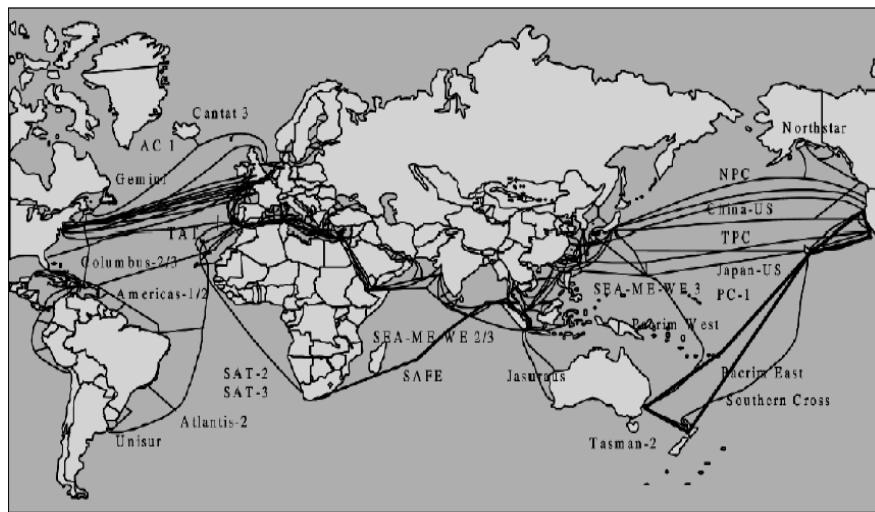
- Một số mốc thời gian quan trọng:

- . 1980: sợi đa mode (850nm, IM/DD) 45-90 Mb/s
- . 1985: sợi đơn mode (1300nm, IM/DD) 140-280 Mb/s
- . 1995: sợi đơn mode (1550nm, coherent) 2,5 Gb/s
- . 2000: sợi đơn mode/DWDM (C-band, IM/DD) 400 Gb/s
- . 2002: sợi đơn mode/DWDM (C&L band, IM/DD) 2400 Gb/s



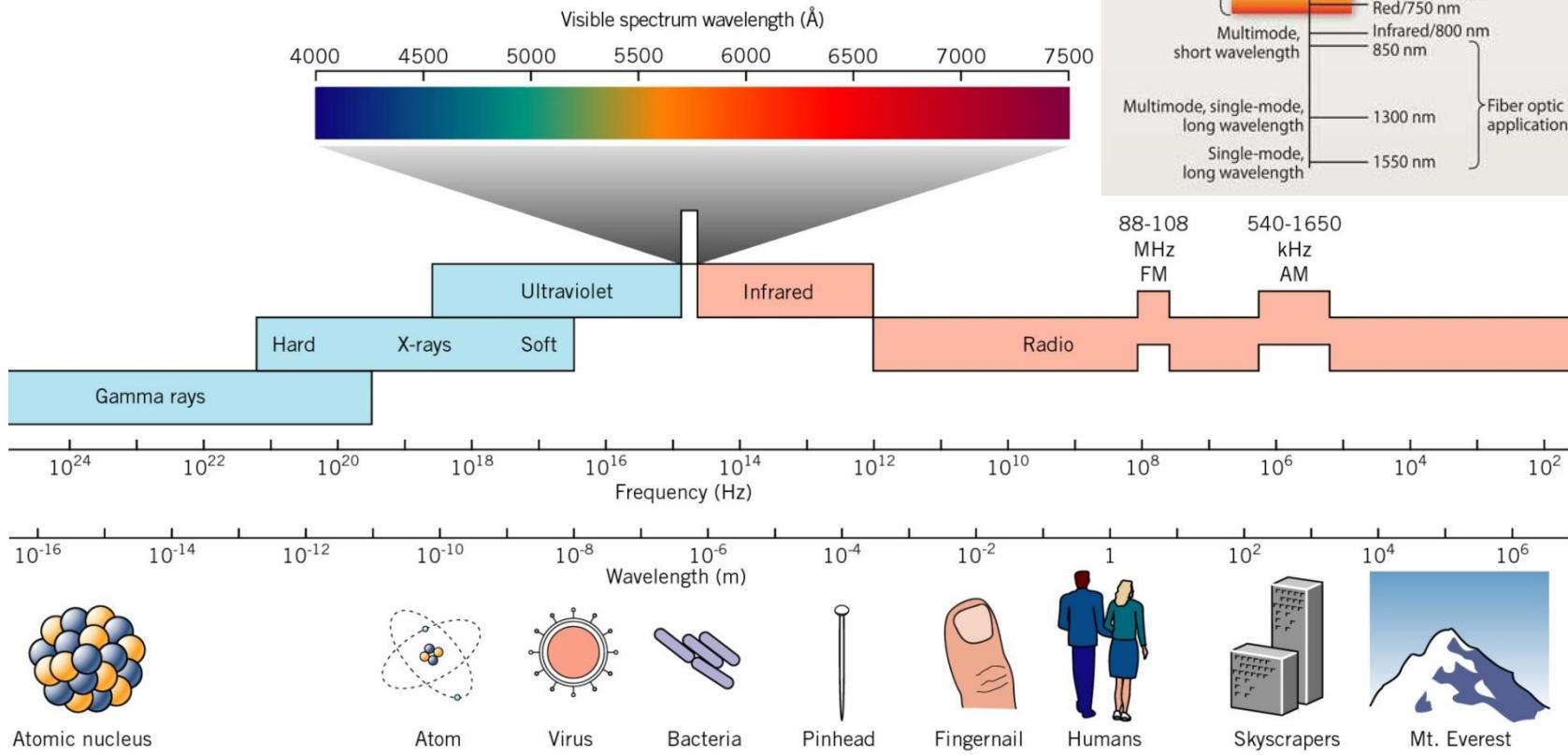
Lịch sử phát triển

- Các thế hệ phát triển hệ thống thông tin sợi quang



Một số khái niệm cơ bản

- Bảng tần phổ quang:

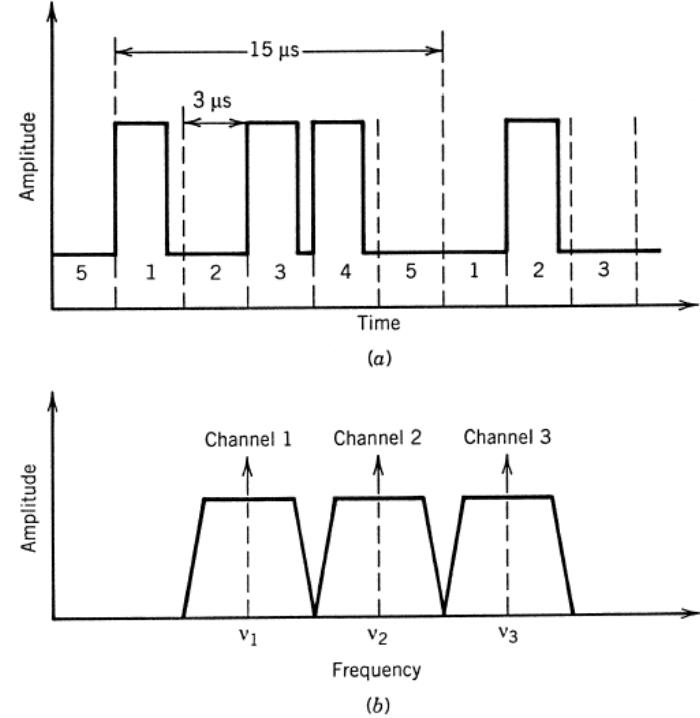


Một số khái niệm cơ bản

- Ghép kênh:
 - TDM
 - FDM

ITU: SDH levels	
STM-1	155.52Mb/s
STM-4	622.08Mb/s
STM-16	2.48832Gb/s
STM-64	9.95328Gb/s
STM-256	39.81312Gb/s
<i>SDH-Synchronous Digital Hierarchy</i>	
<i>STM-Synchronous Transmission Module</i>	

SONET levels	
OC-1	51.84Mb/s
OC-3	155.52Mb/s
OC-12	622.08Mb/s
OC-24	1.24416Gb/s
OC-48	2.48832Gb/s
OC-96	4.97664Gb/s
OC-192	9.95328 Gb/s
OC-768	39.81312Gb/s
<i>SONET: Synchronous optical network</i>	



Một số khái niệm cơ bản

- **Đơn vị công suất:**

- Đơn vị công suất có thể được biểu diễn theo:

- Thang tuyến tính: W, mW
 - Thang logarithm: dBm, dBW

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

- Trong kỹ thuật thường sử dụng thang đo logarithm:

- Biểu diễn công suất trong một dải rộng giá trị
 - Đơn giản hóa việc tính toán mức công suất

- Ví dụ: 1 mW \leftrightarrow 0 dBm

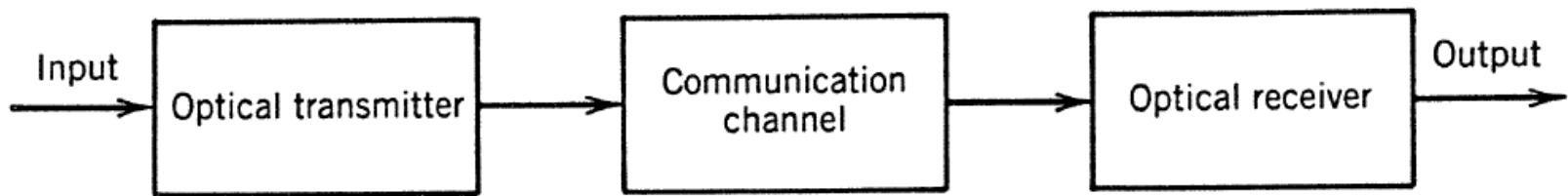
- 2 mW \leftrightarrow 3 dBm

Mô hình tổng quát hệ thống

- Mô hình tổng quát:

- Gồm 2 loại:

- Hữu tuyến: Sợi quang
 - Vô tuyến



Mô hình tổng quát hệ thống

- Mô hình hệ thống truyền dẫn sợi quang:

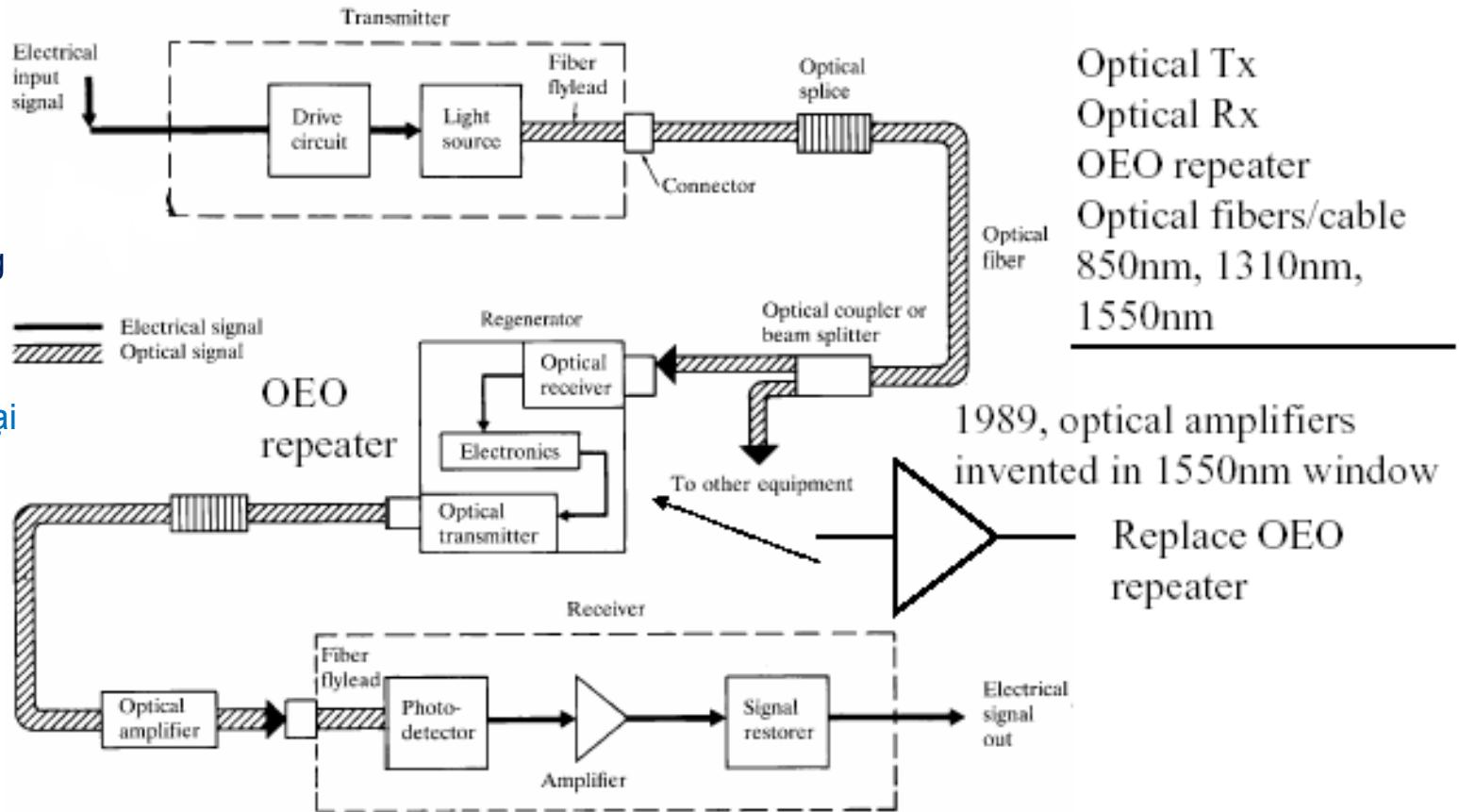
➤ Sợi quang

➤ Bộ phát quang

➤ Bộ thu quang

➤ Bộ khuếch đại quang

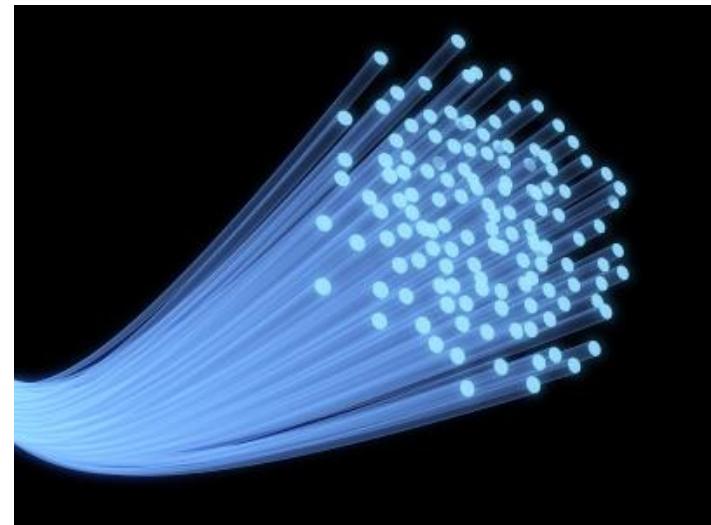
➤ Bộ bù tần số



Mô hình tổng quát hệ thống

- **Ưu điểm:**

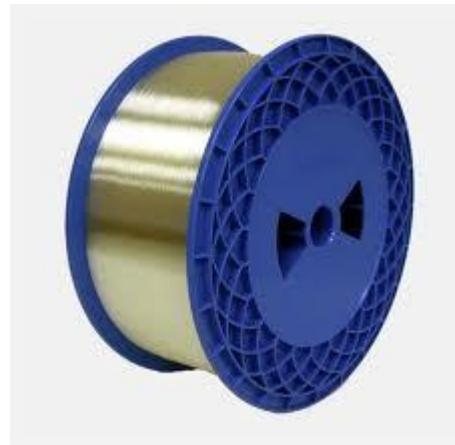
- Suy hao thấp
- Độ rộng băng tần lớn
- Không bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ
- Trọng lượng nhẹ
- Không gây xuyên âm
- Tính bảo mật cao



Mô hình tổng quát hệ thống

- Nhược điểm:

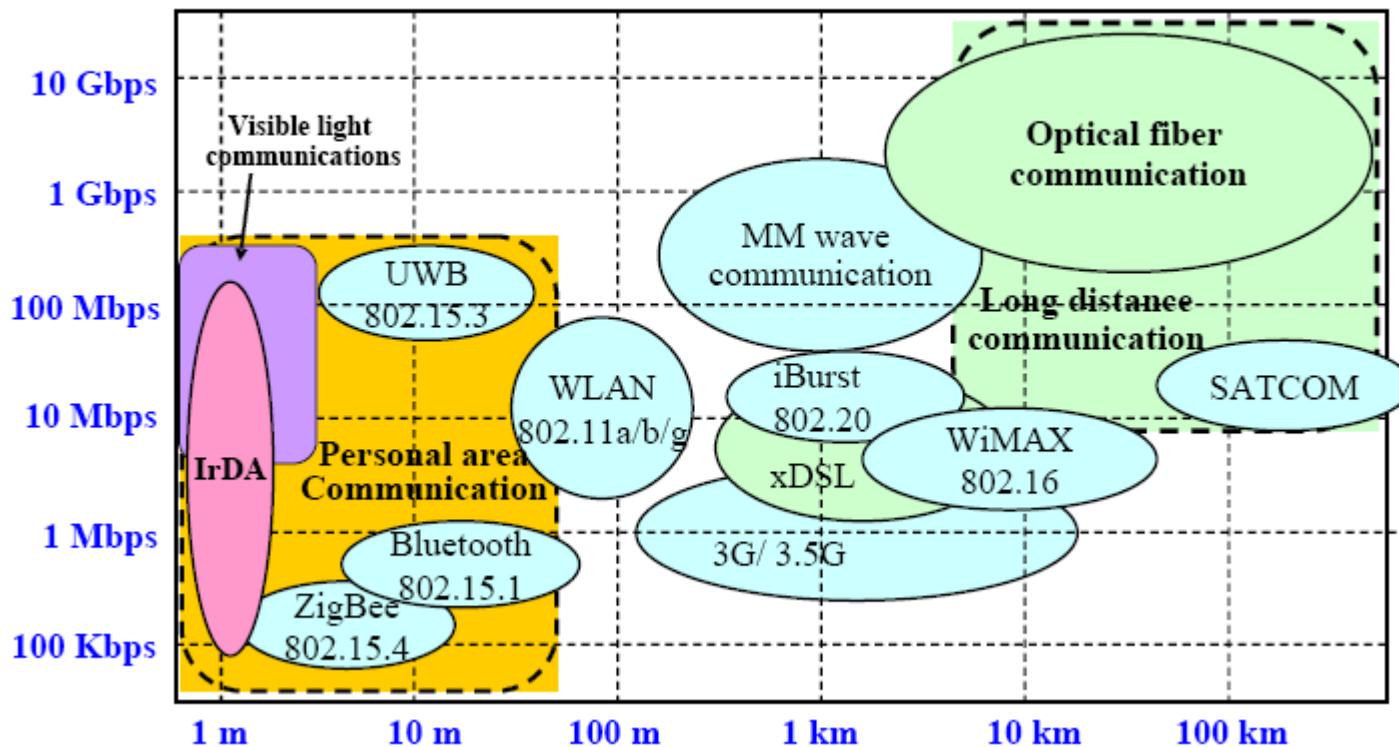
- Hàn nối khó khăn
- Phát triển các cấu kiện quang – điện tử chuyên biệt
- Thiết kế và sản xuất sợi và cáp sợi quang đặc biệt



Mô hình tổng quát hệ thống

- Phạm vi ứng dụng thông tin sợi quang:

Data rate





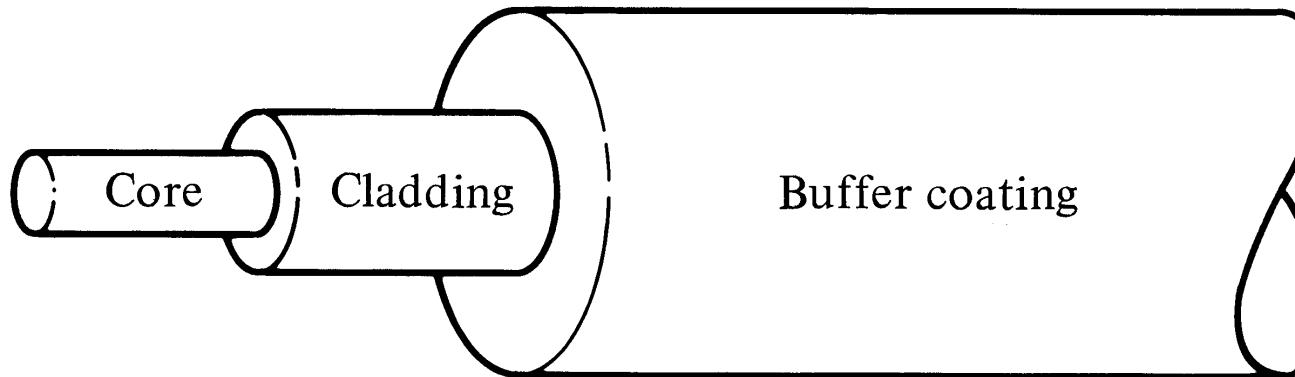
Chương 2

Sợi quang

Cấu tạo và phân loại sợi quang

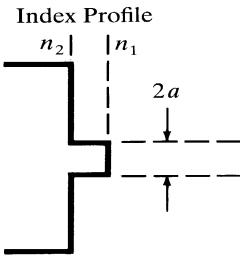
- **Cấu tạo:**

- Cấu tạo: hình trụ gồm lõi và vỏ, được chế tạo từ vật liệu trong suốt
- Nguyên lý truyền tín hiệu quang: phản xạ nội toàn phần $\rightarrow n_1 > n_2$
- Phân loại sợi quang:
 - Phân bố mặt cắt chiết suất: chiết suất bậc (SI), chiết suất biến đổi (GI)
 - Số lượng mode truyền: sợi đa mode (MM) và sợi đơn mode (SM).
 - Vật liệu chế tạo: Sợi thủy tinh, sợi nhựa (plastic)

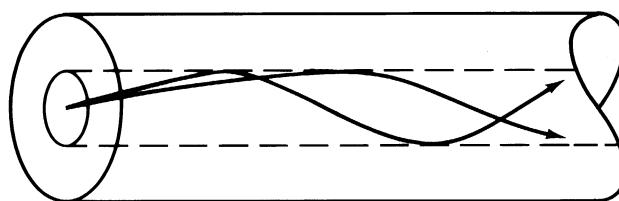
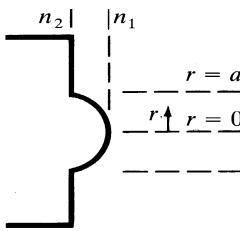
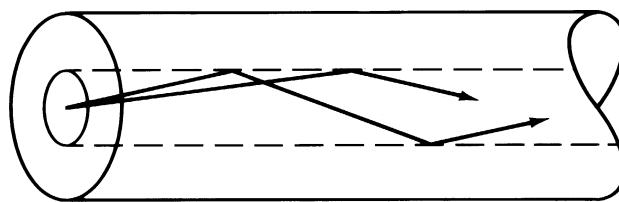
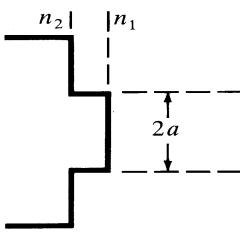
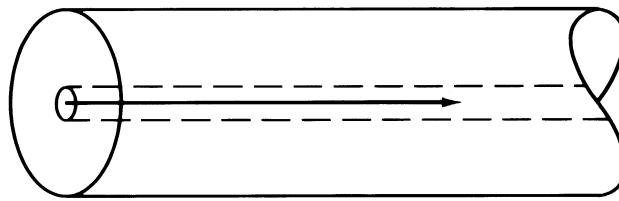


Cấu tạo và phân loại sợi quang

- Phân loại:



Fiber Cross Section and Ray Paths



Typical Dimensions
125 μm (cladding)
8–12 μm (core)

Sợi đơn mode (SM)

125–400 μm (cladding)
50–200 μm (core)

Sợi đa mode chiết suất bậc (MM-SI)

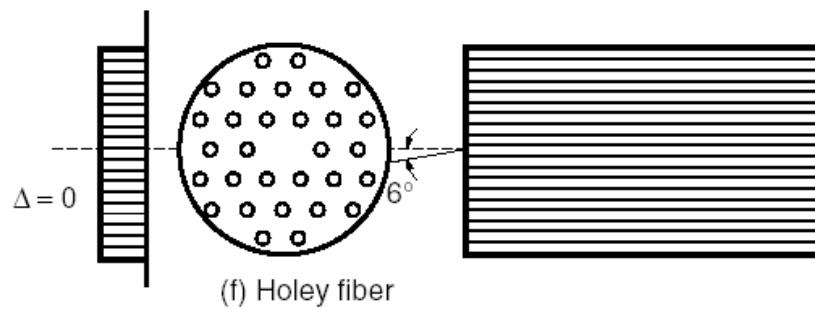
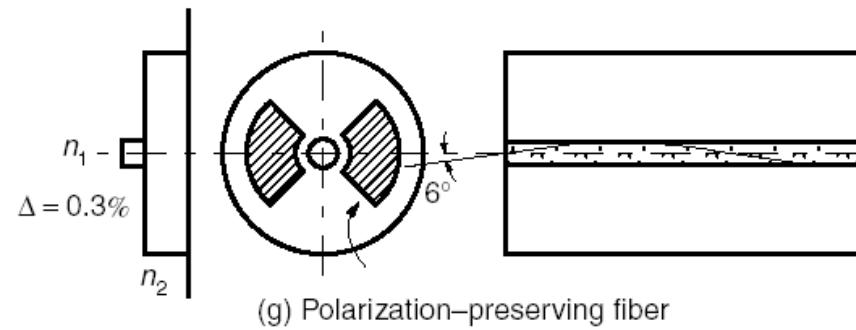
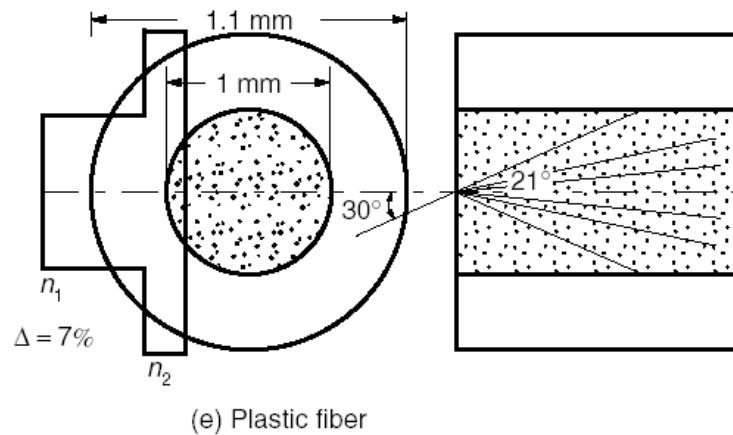
125–140 μm (cladding)
50–100 μm (core)

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



Cấu tạo và phân loại sợi quang

- Một số loại sợi quang khác:

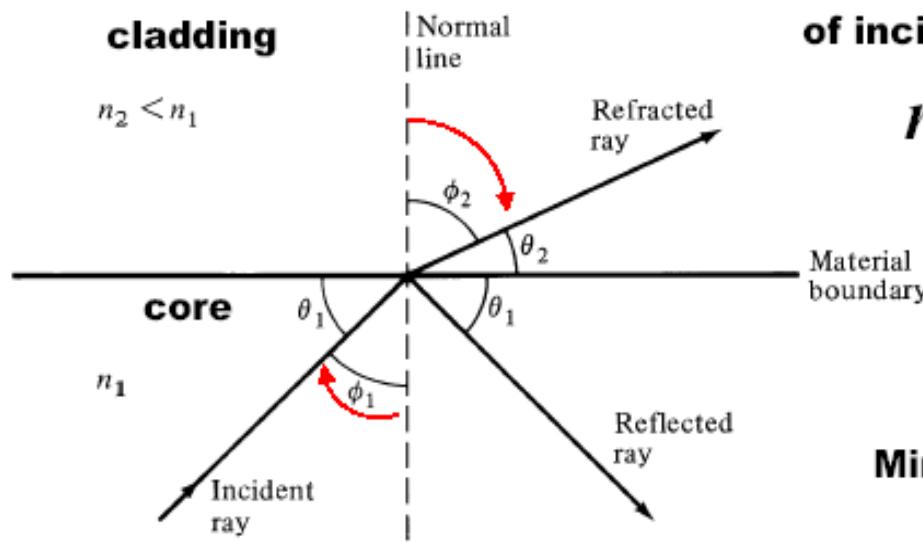


Truyền sóng ánh sáng

- Cơ sở truyền sóng:

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

$$\text{Refractive index } n(\lambda) = \frac{c}{v}$$



Relationship between angles of incidence and transmission:

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

Snell law

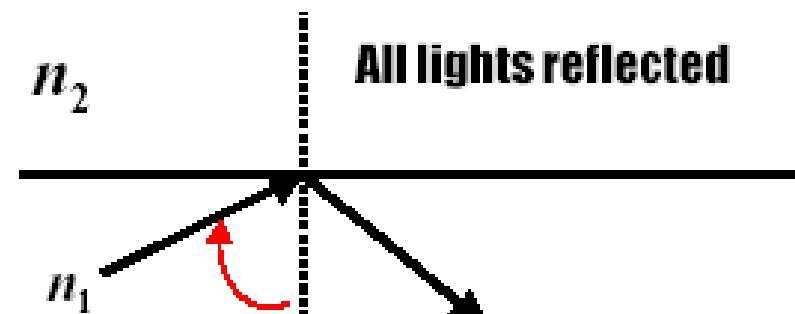
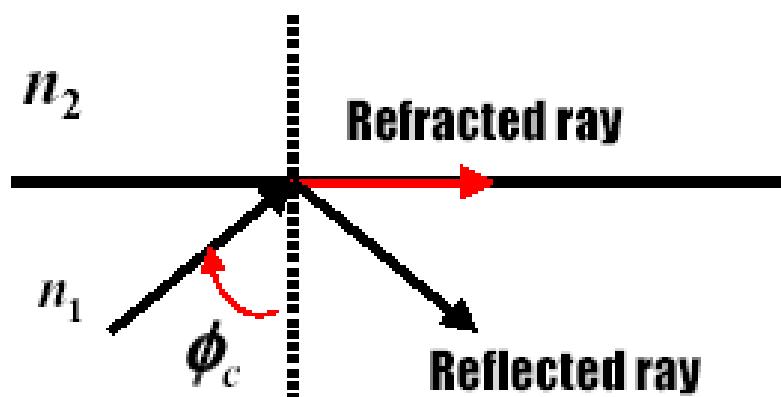
$$\text{let } \phi_2 = \pi/2 \quad \sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Min. angle for total reflection

Truyền sóng ánh sáng

- Cơ sở truyền sóng:

- Phản xạ toàn phần → Cơ sở truyền ánh sáng trong sợi quang



ϕ_c critical angle

Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Khẩu độ số NA: Xác định góc tiếp nhận ánh sáng cực đại của sợi quang

Numerical aperture (NA):

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

For a step-index fiber:

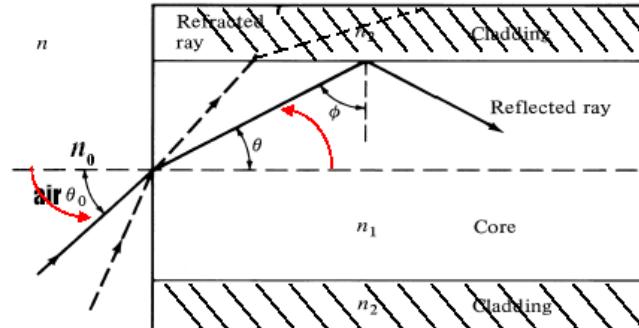
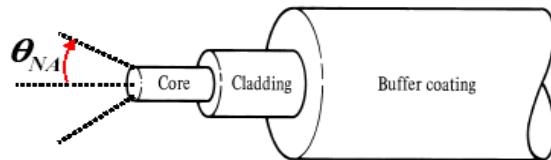
$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad \text{if } n_1 \approx n_2$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Fractional index change

$$\Delta \uparrow \rightarrow NA \uparrow$$

More lights coupled into fiber



By Snell law:

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

$$\text{increase } \theta_0 \rightarrow \theta \uparrow \rightarrow \phi \downarrow$$

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

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

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

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

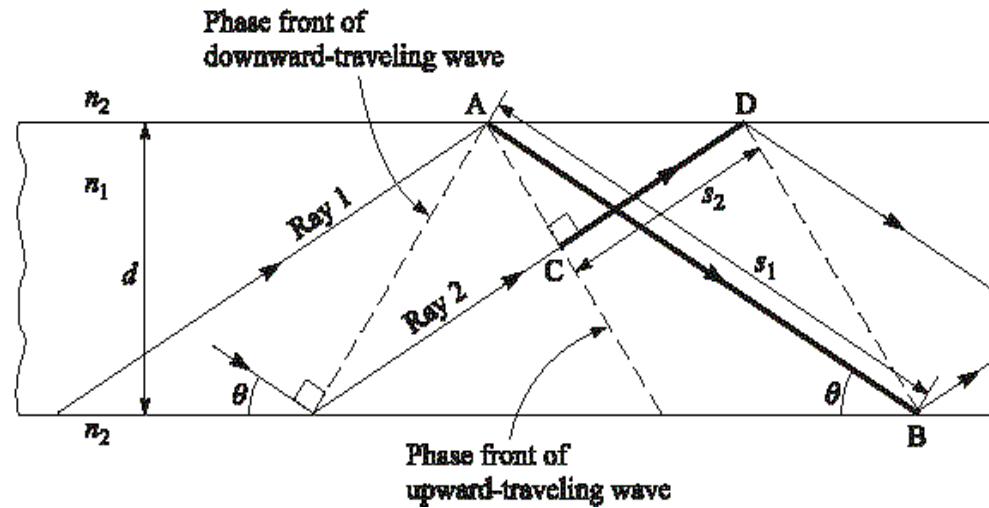


Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:

- Mode truyền:

- Mỗi mode là một họ tia sáng ứng với một góc Ian 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 từ Ian truyền trong sợi quang (Theo lý thuyết truyền sóng)



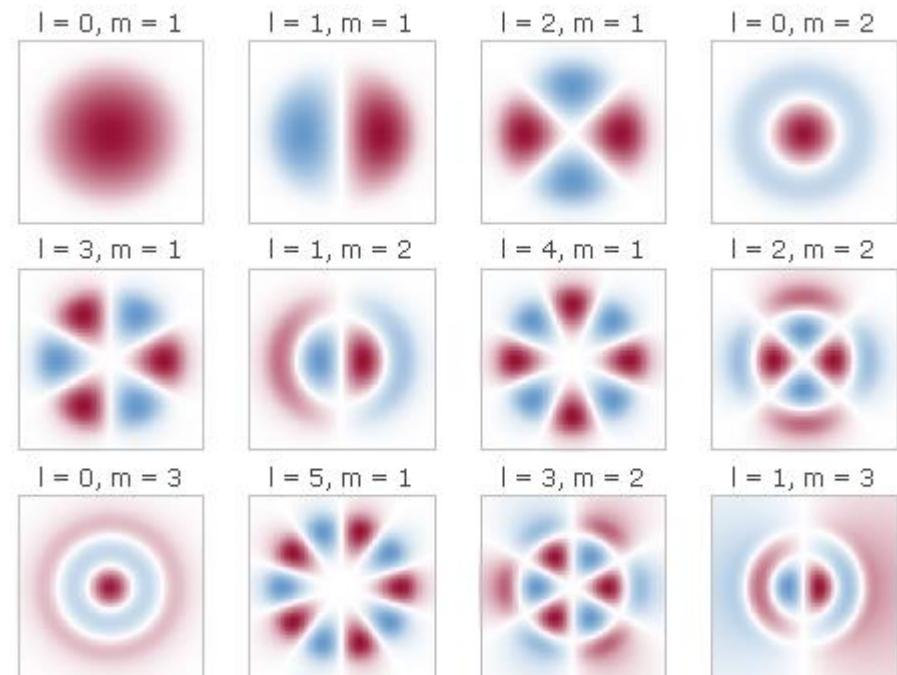
Truyền sóng ánh sáng

- Một số khái niệm cơ bản:**

 - Mode phân cực tuyến 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 tuyến tính LP

LP-mode designation	Traditional-mode designation and number of modes	Number of degenerate modes
LP ₀₁	HE ₁₁ × 2	2
LP ₁₁	TE ₀₁ , TM ₀₁ , HE ₂₁ × 2	4
LP ₂₁	EH ₁₁ × 2, HE ₃₁ × 2	4
LP ₀₂	HE ₁₂ × 2	2
LP ₃₁	EH ₂₁ × 2, HE ₄₁ × 2	4
LP ₁₂	TE ₀₂ , TM ₀₂ , HE ₂₂ × 2	4
LP ₄₁	EH ₃₁ × 2, HE ₅₁ × 2	4
LP ₂₂	EH ₁₂ × 2, HE ₃₂ × 2	4
LP ₀₃	HE ₁₃ × 2	2
LP ₃₁	EH ₄₁ × 2, HE ₆₁ × 2	4



Truyền sóng ánh sáng

- **Một số khái niệm cơ bản:**

- Tham số V: Tần số chuẩn hóa → Xác định số lượng mode và đặc tính truyền dẫn của sợi quang

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}$$

- Quan hệ với hằng số lan truyền chuẩn hóa b

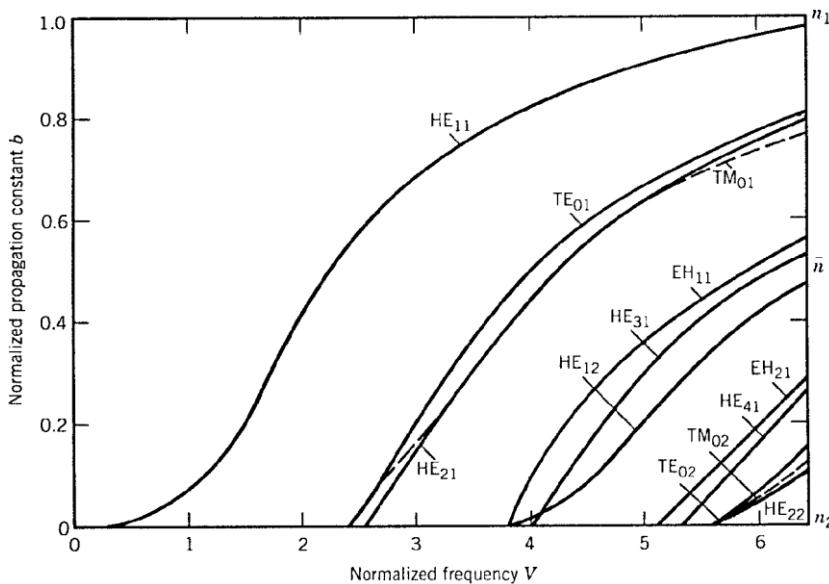
$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \approx \frac{(\beta/k) - n_2}{n_1 - n_2}$$

- β - 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

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



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

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

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

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

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

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

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi}{V_{cutoff}} a n_1 \sqrt{2^{\Delta}}$$



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

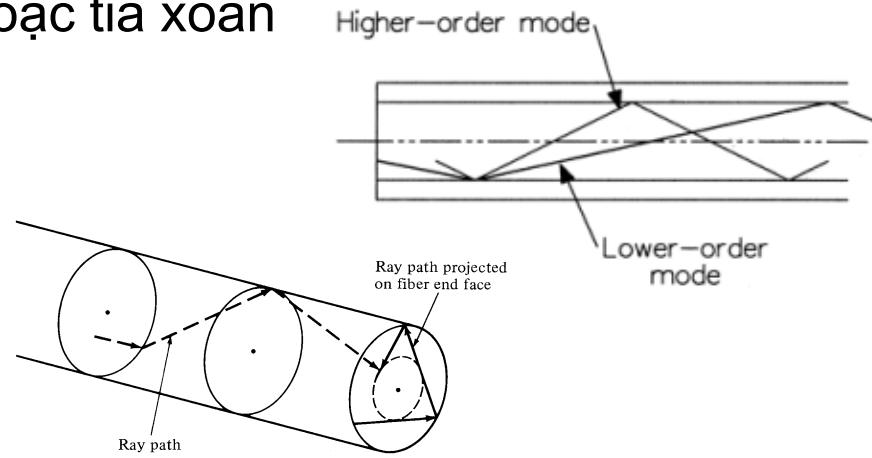
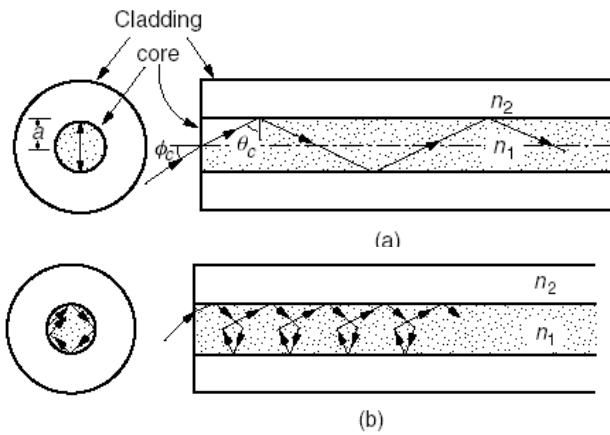
$$\frac{P_{clad}}{P} = 1 - \frac{P_{core}}{P}$$

- 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 gần đúng:

$$\left(\frac{P_{clad}}{P} \right)_{total} = \frac{4}{3} M^{-1/2} \quad M - \text{số lượng mode truyền trong sợi}$$

Truyền sóng ánh sáng

- Sợi đa mode chiết suất bậc (MM-SI):
 - 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:
- $$N \approx \frac{V^2}{2} \quad (\text{for } V \gg 2.405)$$
- $$\approx (kan_1)^2 \Delta = \left(\frac{2\pi a n_1}{\lambda}\right)^2 \Delta$$
- Tán sắc mode lớn → giới hạn băng tần truyền dẫn của sợi

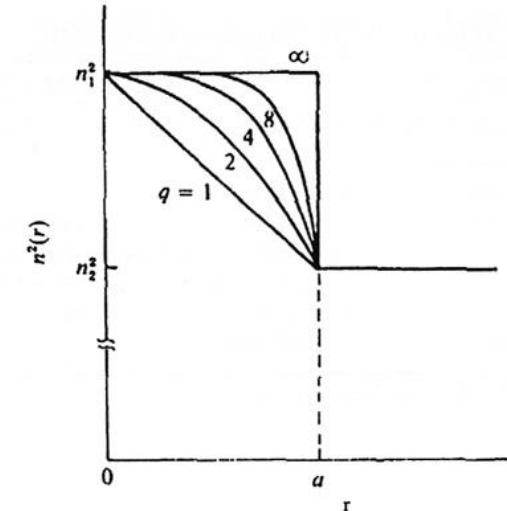
Truyền sóng ánh sáng

- Sợi đa mode chiết biến đổi (MM-GI):

- Mặt cắt chiết suất:

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

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

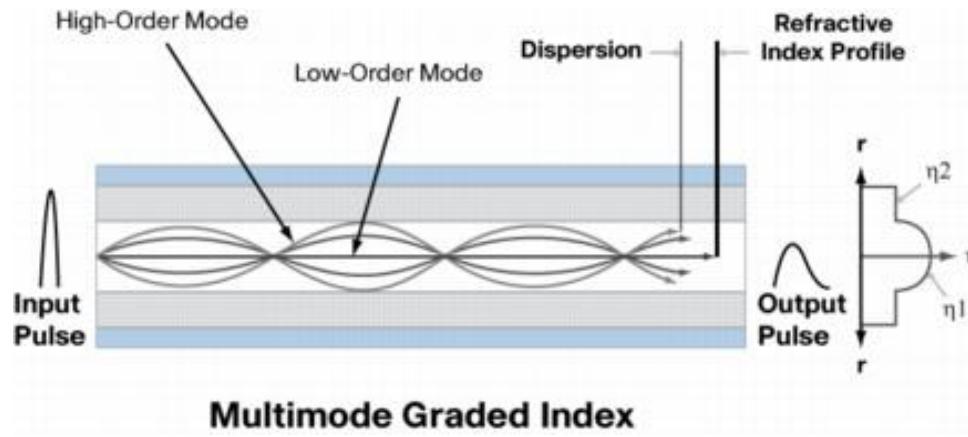


- Khẩu độ số: $NA(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} = NA_{max} \sqrt{1 - (r/a)^\alpha}$
- $NA_{max} = n_1 \sqrt{2\Delta}$
- Sợi truyền nhiều mode (hoặc tia sáng), cũng gồm 2 loại tia: tia kinh tuyến và tia nghiêng hoặc tia xoắn

Truyền sóng ánh sáng

- Sợi đa mode chiết biến đổi (MM-GI):

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



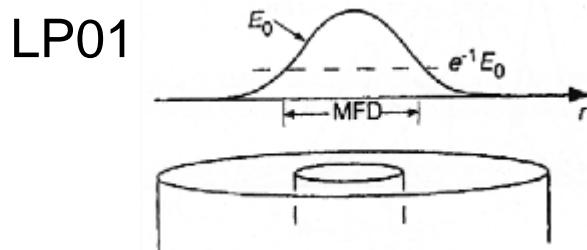
- Số lượng mode truyền: $N \approx \left(\frac{g}{g+2}\right) \left(\frac{4a^2\pi^2n_1^2\Delta}{\lambda^2}\right) \approx \left(\frac{g}{g+2}\right) \left(\frac{V^2}{2}\right)$
- Tán sắc mode nhỏ hơn \rightarrow tăng băng tần truyền dẫn của sợi

Truyền sóng ánh sáng

- Sợi đơn mode (SM):

- Chỉ truyền một mode duy nhất, mode LP01
- Điều kiện đơn mode: $V < 2,405$
- 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: $A_{eff} = \pi w_0^2$
- Hệ số giam hãm:

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



All fibers: $2 < V < 2.4$

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

Suy hao trong sợi quang

- **Hệ số suy hao:**

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

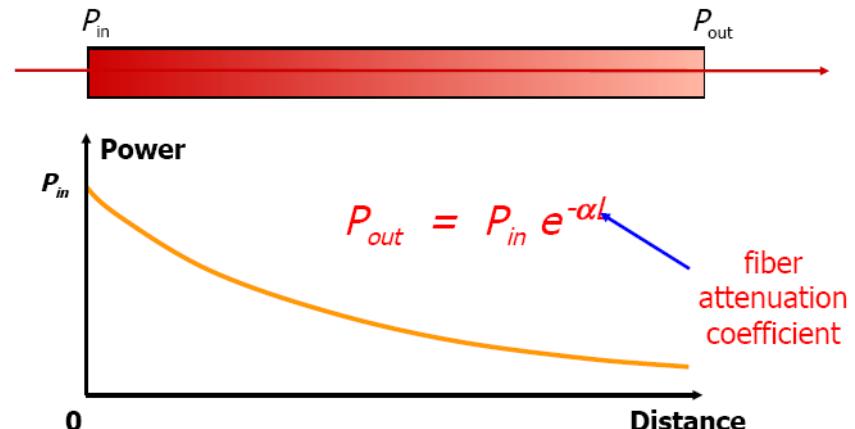
→ Tuân theo định luật Beer:

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

α - hệ số suy hao

- Hệ số suy hao:

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left[\frac{P(0)}{P(L)} \right] \quad [1/\text{km or } 1/\text{m}]$$



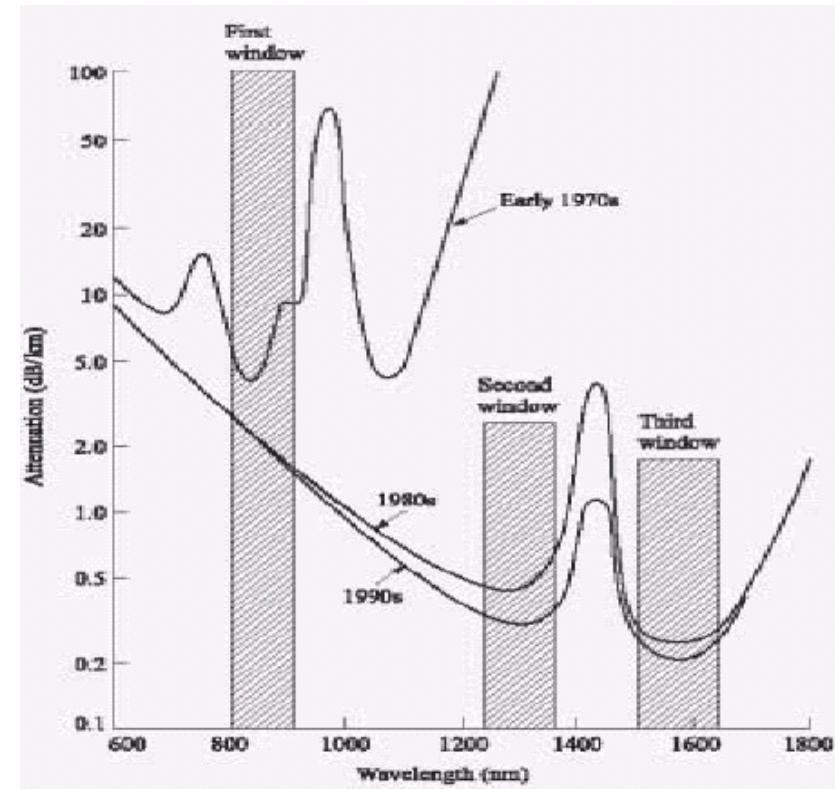
$$\alpha_{\text{dB}} = (10 \log_{10} e) \alpha \approx 4.343 \alpha$$

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

Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

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



Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:
 - Suy hao do hấp thụ: gồm 2 loại chính
 - *Hấp thụ ngoài*: do sự có mặt của các ion tạp chất
 - ✓ Các tạp chất kim loại chuyển tiếp như Fe, Cu, Co, Ni, Mn và Cr hấp thụ mạnh trong dải bước sóng 0.6 – 1.6 μm
 - ✓ Ion OH do sự có mặt của hơi nước trong quá trình chế tạo sợi → gây ra các đỉnh hấp thụ tại 1.39, 1.24, 0.95 μm
 - ✓ Để mức suy hao nhỏ < 1 dB/km, nồng độ mức tạp chất nên < 1ppb (10^{-9})
 - *Hấp thụ thuận*: do chính thủy tinh tạo nên sợi
 - ✓ Hấp thụ cực tím: liên quan đến kích thích điện tử
 - ✓ Hấp thụ hồng ngoại: tương tác giữa các liên kết dao động và trường quang

Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:
 - Suy hao do tán xạ: sinh ra do
 - Sự thay đổi vi mô về mật độ trong vật liệu tạo sợi
 - Sự tăng giáng thành phần
 - Các khuyết tật hoặc cấu trúc không đồng nhất
 - Quan trọng: sự tăng giáng mật độ → các tăng giáng ngẫu nhiên của chiết suất cỡ $< \lambda$ → Tán xạ Rayleigh
 - Suy hao do tán xạ Rayleigh: $\alpha_R = C/\lambda^4$
 $C \sim 0,7\text{-}0,9 \text{ (dB/km)}\cdot\mu\text{m} \rightarrow \alpha_R = 0.12 - 0,16 \text{ dB/km}$
tại $1,55 \mu\text{m}$

Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

- Suy hao do uốn cong:

- Do uốn cong vĩ mô: bán kính uốn cong lớn so với đường kính sợi

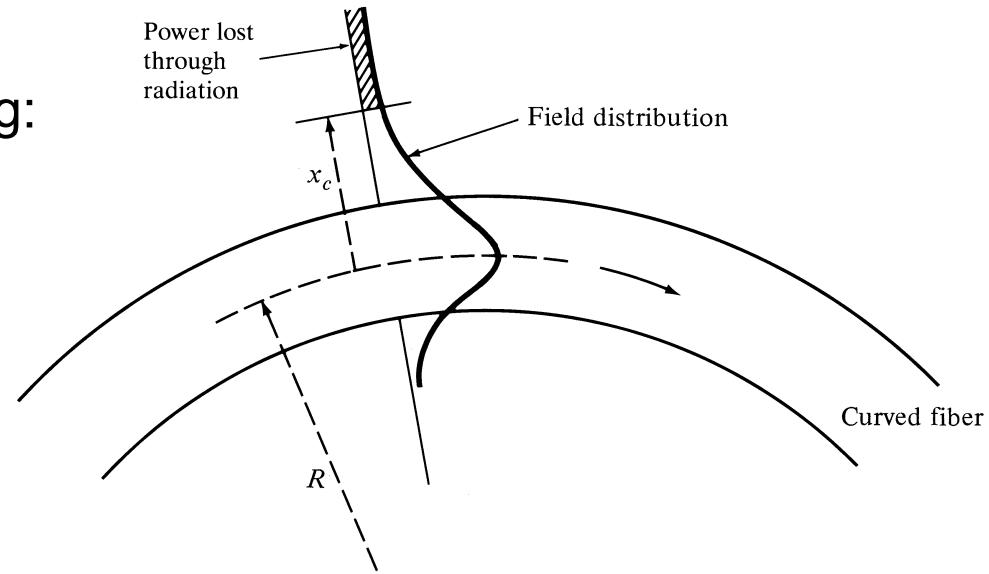
✓ Suy hao uốn cong tăng theo hàm mũ: $\sim \exp(-R/R_c)$, $R_c = a/NA$

✓ Ở sợi đa mode:

số lượng mode hiệu dụng:

$$N_{eff} = N_{\infty} \left\{ 1 - \frac{g+2}{2g\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{3}{2n_2 k R} \right)^{2/3} \right] \right\}$$

$$N_{\infty} = \frac{g}{g+2} (n_1 k a)^2 \Delta$$

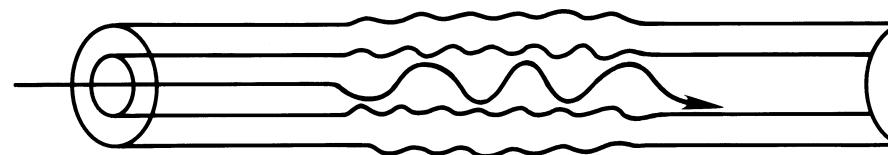
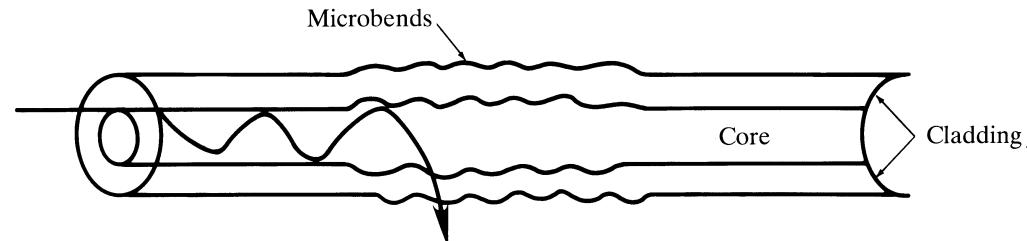


Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

- Suy hao do uốn cong:

- Do vi uốn cong: bán kính uốn cong nhỏ so với đường kính sợi



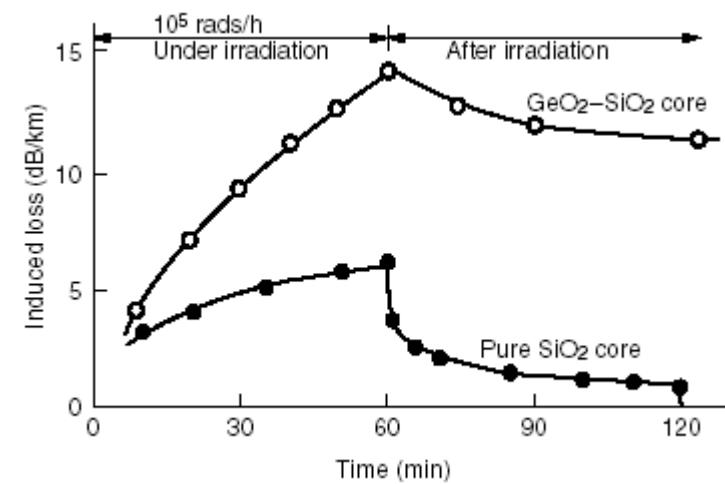
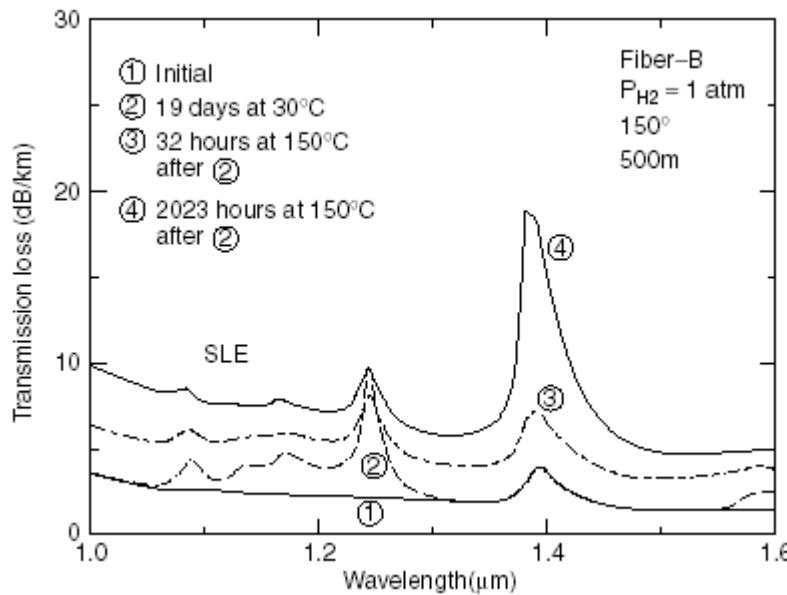
- ✓ Để giảm suy hao do vi uốn cong: bọc đệm sợi quang và chọn tham số V phù hợp (2 – 2.4)

Suy hao trong sợi quang

- Các nguyên nhân gây suy hao:

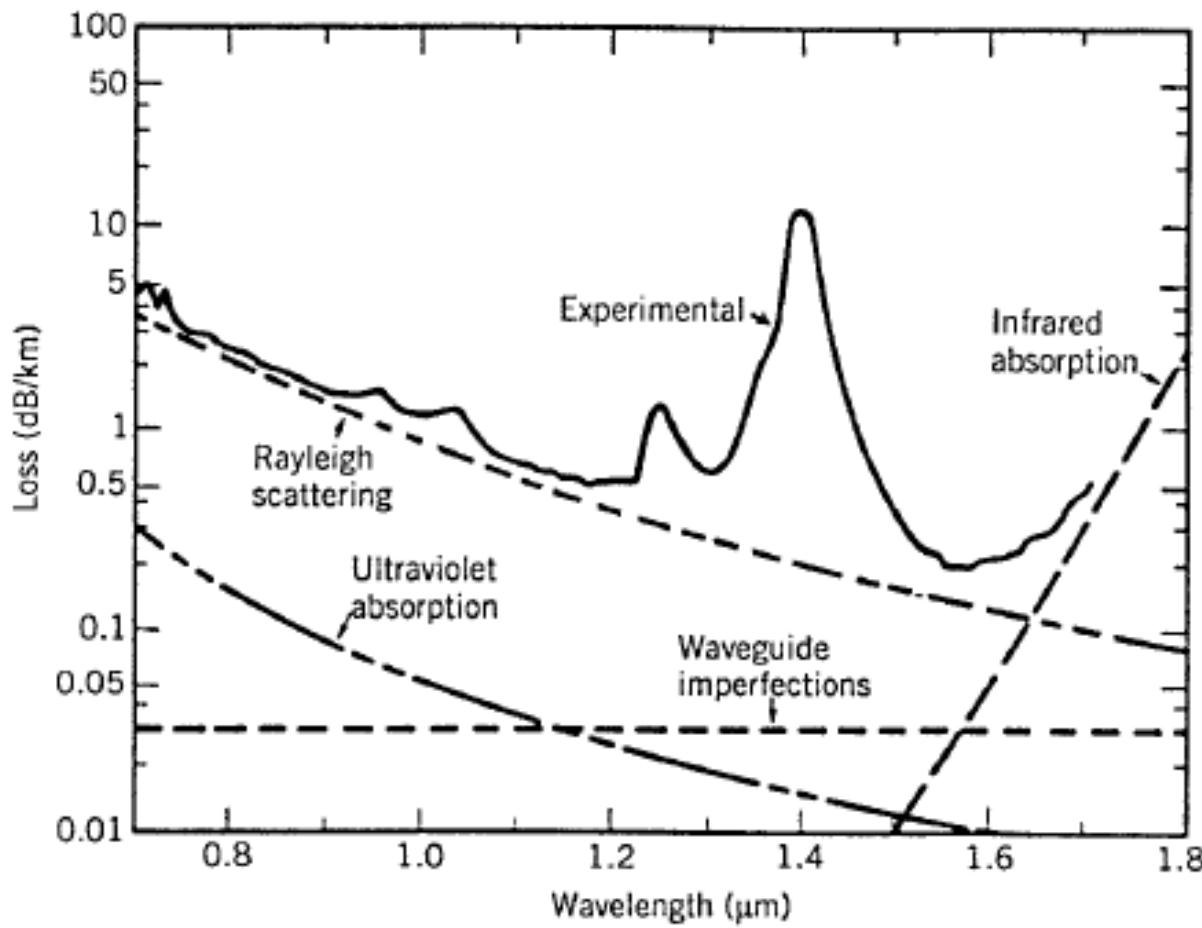
 - Các suy hao khác:

 - Suy hao do sự không hoàn hảo cấu trúc sợi quang
 - Suy hao do hàn nối
 - Suy hao trong môi trường chiếu xạ



Suy hao trong sợi quang

- Phổ suy hao sợi quang:

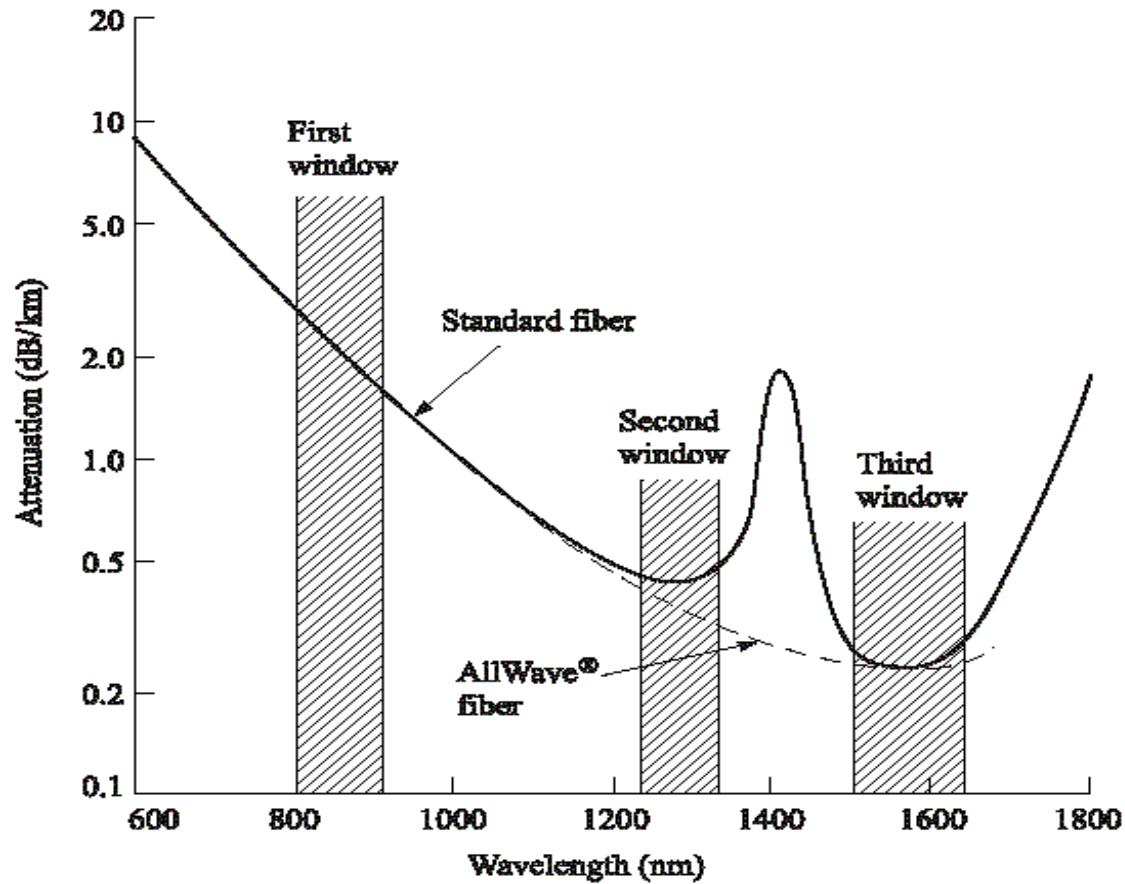


Suy hao trong sợi quang

- Phổ suy hao sợi quang:

➤ Cửa sổ truyền dẫn:

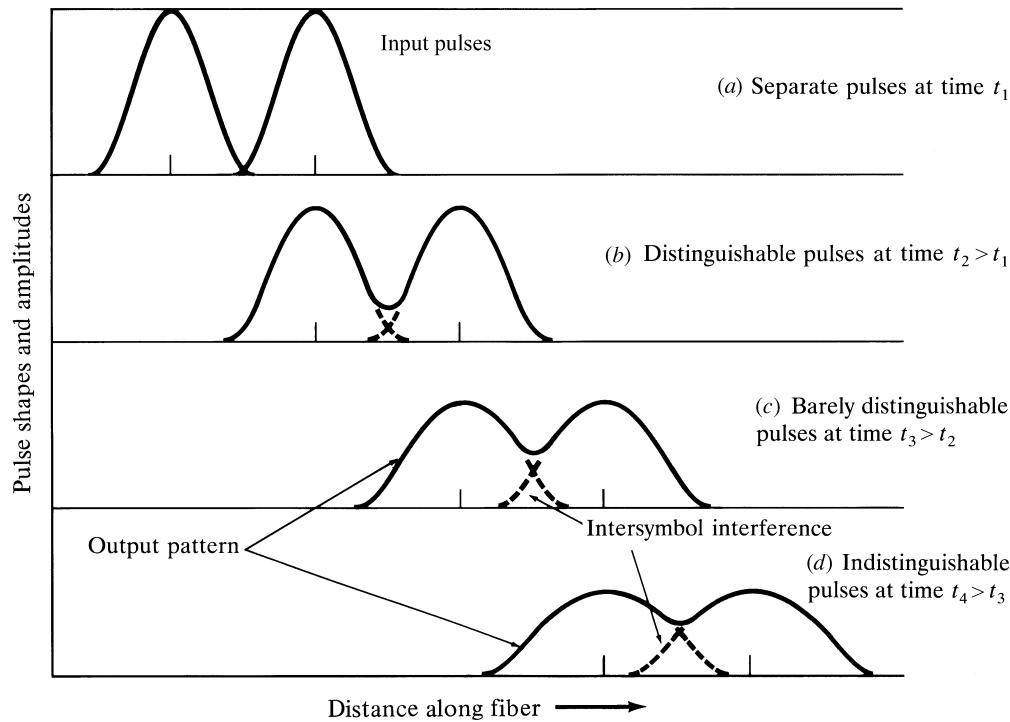
- 850 nm: 2-3 dB/km
- 1300 nm: 0.5 dB/km
- 1550 nm: 0.2 dB/km



Tán sắc trong sợi quang

- Khái niệm:

- Tán sắc: hiện tượng các thành phần tín hiệu quang (mode, bước sóng, trạng thái phân cực) có vận tốc lan truyền khác nhau → Xung quang bị dãn rộng về thời gian khi lan truyền → ISI



Tán sắc trong sợi quang

- Khái niệm:

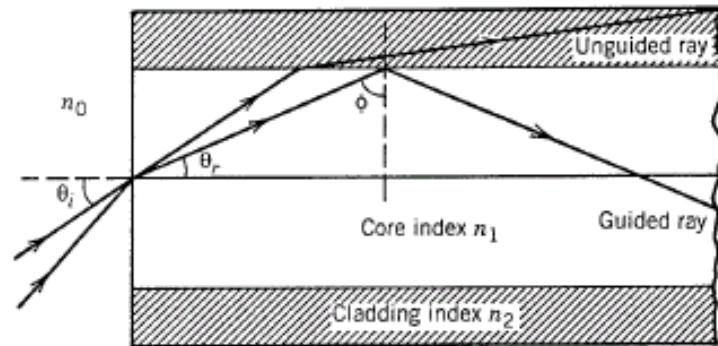
- Các loại tán sắc quan trọng:
 - Tán sắc mode
 - Tán sắc vận tốc nhóm (Tán sắc sắc thể):
 - ✓ Tán sắc vật liệu
 - ✓ Tán sắc ống dẫn sóng
 - Tán sắc mode phân cực
- Vận tốc pha: $v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k}$ $\beta = n\omega/c$
- Vận tốc nhóm: $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$ $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$
- Độ trễ nhóm: $\tau = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}$ $\tau = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk}$

Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode:

- Nguyên nhân:
 - Sợi truyền nhiều mode
 - Mỗi mode có tốc độ lan truyền khác nhau (có hằng số lan truyền khác nhau) → Lệch thời gian truyền giữa các mode (tán sắc mode)
- Đối với sợi MM-SI:
 - Độ lệch thời gian truyền giữa tia ngắn nhất (mode bậc thấp nhất) và tia dài nhất (mode bậc cao nhất)

$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \left(\frac{L}{\sin \phi_c} - L \right) = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta.$$



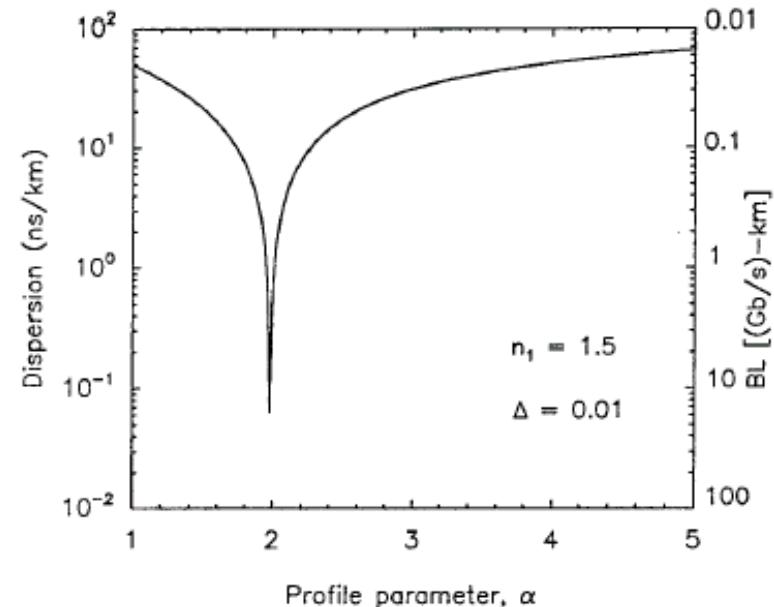
Tán sắc trong sợi quang

- 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:

$$\Delta T \approx \begin{cases} n_1 \Delta \frac{(g - g_{opt})L}{(g + 2)c} & g \neq g_{opt} \\ \frac{n_1 \Delta^2 L}{2c} & g = g_{opt} \end{cases}$$



Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Nguyên nhân: Sự phụ thuộc của vận tốc nhóm (hằng số lan truyền) vào tần số (bước sóng) → gây ra mở rộng xung

- Các thành phần phổ lan truyền tại tốc độ khác nhau

$$T = L/v_g \quad v_g = c/\bar{n}_g \leftarrow \text{Chiết suất nhóm}$$

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega(d\bar{n}/d\omega) \quad \bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$$

- Độ trễ thời gian giữa các thành phần: Tham số GVD

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

- Độ trễ được xác định theo độ rộng phổ nguồn quang $\Delta\lambda$

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta \lambda = D L \Delta \lambda,$$

Hệ số tán sắc D (ps/nm/km): $D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2.$

Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Tán sắc vật liệu: Do sự phụ thuộc của chiết suất vật liệu vào tần số (bước sóng)

- Phương trình Sellmeier:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{i=1}^M \frac{B_i \omega_i^2}{\omega_i^2 - \omega^2}$$

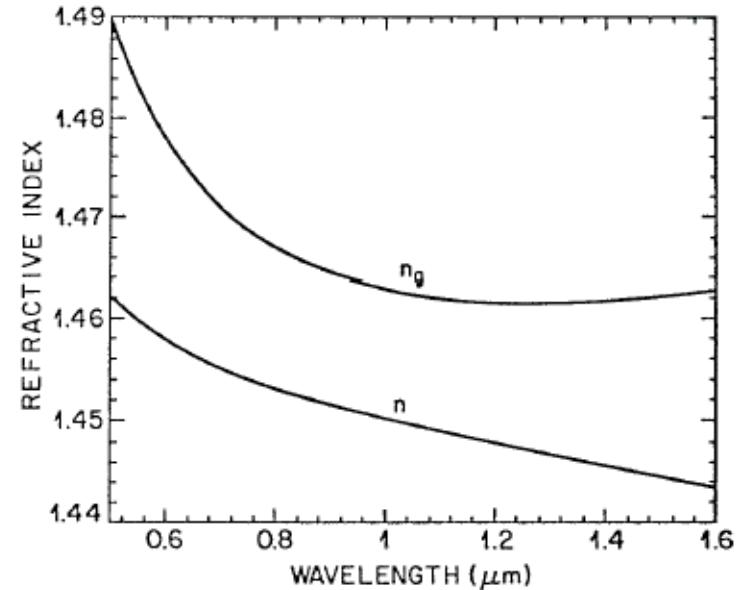
B_i resonance strength
 ω_i Resonance frequency

- Độ trễ nhóm:

$$\tau = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{d\beta}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega}$$

Sử dụng $\frac{d\lambda}{d\omega} = -\frac{\lambda}{\omega}$ ta có:

$$\tau = \frac{d\beta}{d\lambda} \left(-\frac{\lambda}{\omega} \right) = -\frac{\lambda}{\omega} \frac{d\beta}{d\lambda} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda}$$



Tham số GVD

Chiết suất nhóm

Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Tán sắc vật liệu: (tiếp)
 - Biết rằng $\beta = 2\pi n(\lambda)/\lambda$, do vậy:

$$\begin{aligned}\tau &= -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \left(-\frac{2\pi n}{\lambda^2} + \frac{2\pi n'}{\lambda} \right) \\ &= -\frac{1}{c} (-n + \lambda n') = \frac{1}{c} \left(n(\lambda) + \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \right)\end{aligned}$$

- Hệ số tán sắc: $D = \frac{d\tau}{d\lambda}$

→ Hệ số tán sắc vật liệu:

$$D_M = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{1}{c} \left[\frac{dn}{d\lambda} - \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} - \frac{dn}{d\lambda} \right] = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad \text{ps/(nm.km)}$$

Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Tán sắc ống dẫn sóng: Do sự phụ thuộc của hằng số lan truyền vào cấu trúc sợi quang (tham số V)

- Do phần công suất tại mỗi thành phần phổ thâm thấu ra ngoài vỏ có chiết suất nhỏ hơn khác nhau → tốc độ nhóm khác nhau.
- Sử dụng $\beta \approx \bar{n}k$, ta có độ trễ:

$$\tau = \frac{1}{c} \left(n_1 + n_1 \Delta \frac{d(kb)}{dk} \right)$$

- Sử dụng gần đúng: $V \approx kan_1 \sqrt{2\Delta}$

→ Độ trễ:

$$\tau = \frac{1}{c} \left(n_1 + n_1 \Delta \frac{d(Vb)}{dV} \right)$$

Tán sắc trong sợi quang

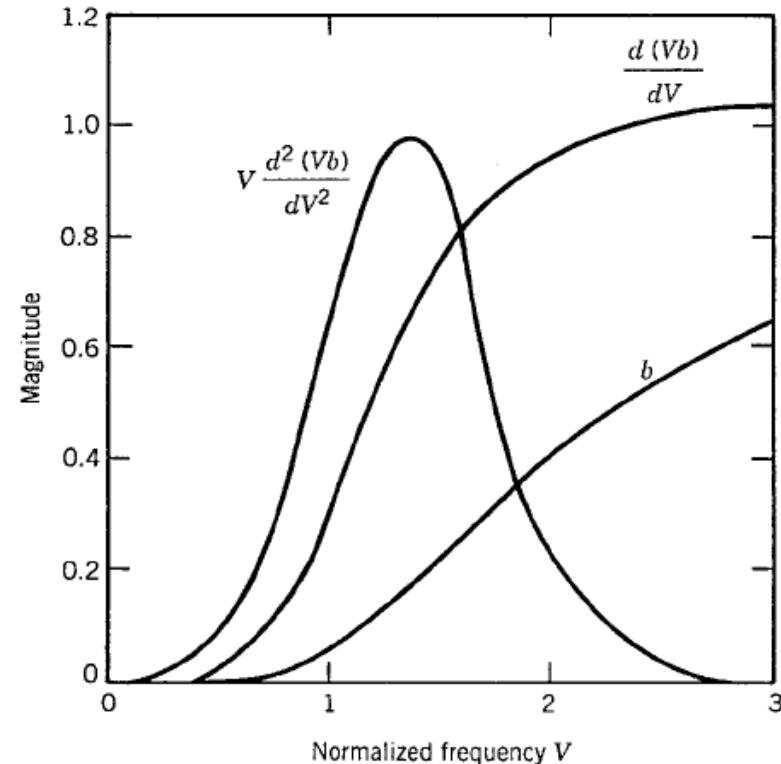
- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):

- Tán sắc ống dẫn sóng:
 - Thành phần phụ thuộc bước sóng:

$$\tau(\lambda) \approx \frac{n_1 \Delta}{c} \frac{d(Vb)}{dV}$$

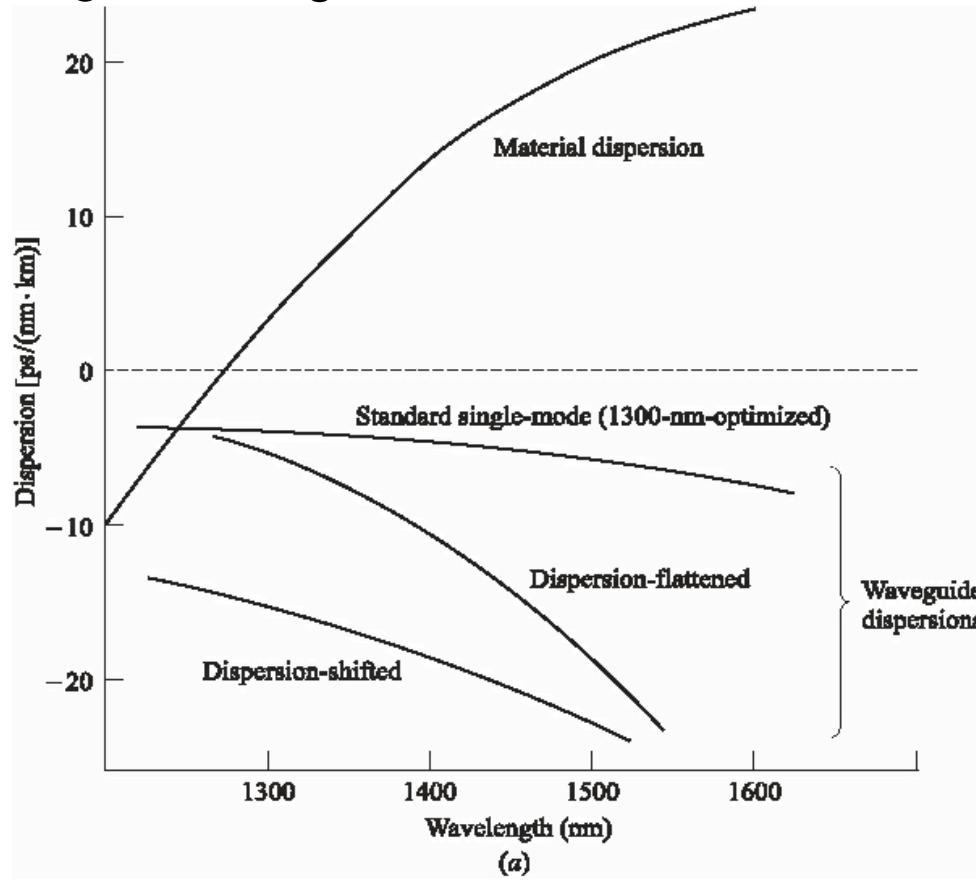
→ Hệ số tán sắc ống dẫn sóng:

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



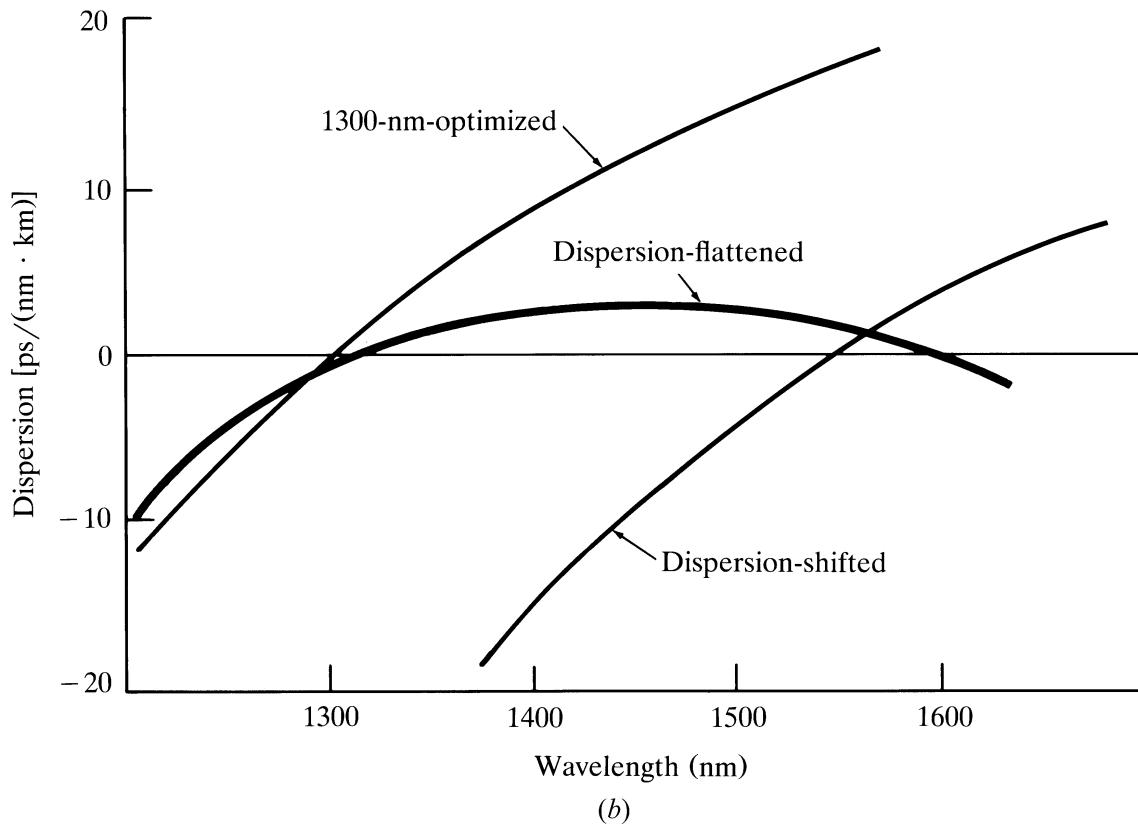
Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):
 - Tán sắc ống dẫn sóng:



Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):
 - Hệ số tán sắc trong sợi SM: $D = D_M + D_W$,



Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc vận tốc nhóm (GVD):
 - Hệ số tán sắc trong sợi SM:

Fiber Type and Trade Name	A_{eff} (μm^2)	λ_{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

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: $S = dD/d\lambda$

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

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

Tán sắc trong sợi quang

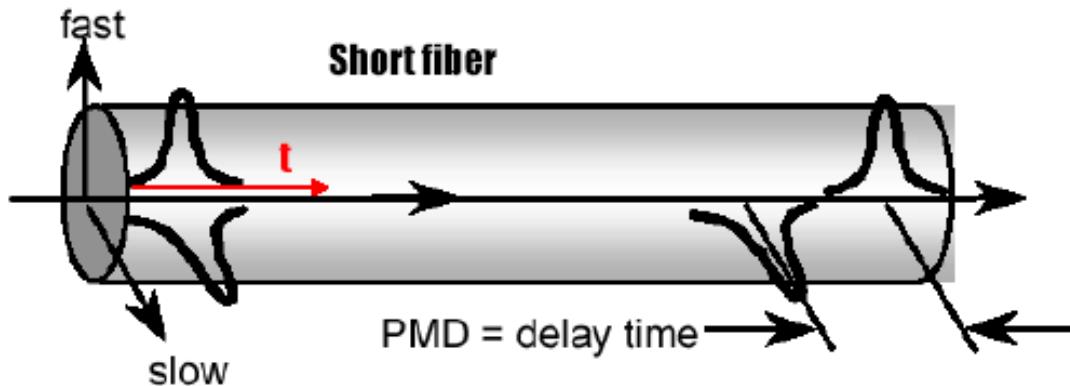
- Tán sắc mode phân cực (PMD):

- 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)
- Độ lệch chiết suất mode phân cực: $\beta_x \neq \beta_y$

$$B_m = |\bar{n}_x - \bar{n}_y| = |\beta_x - \beta_y| / k_0$$

- 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



Tán sắc trong sợi quang

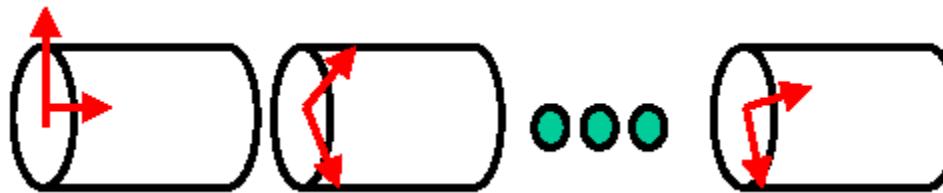
- Tán sắc mode phân cực (PMD):

- Độ trễ thời gian giữa 2 mode phân cực:

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

For short fiber (no coupling or no rotation)

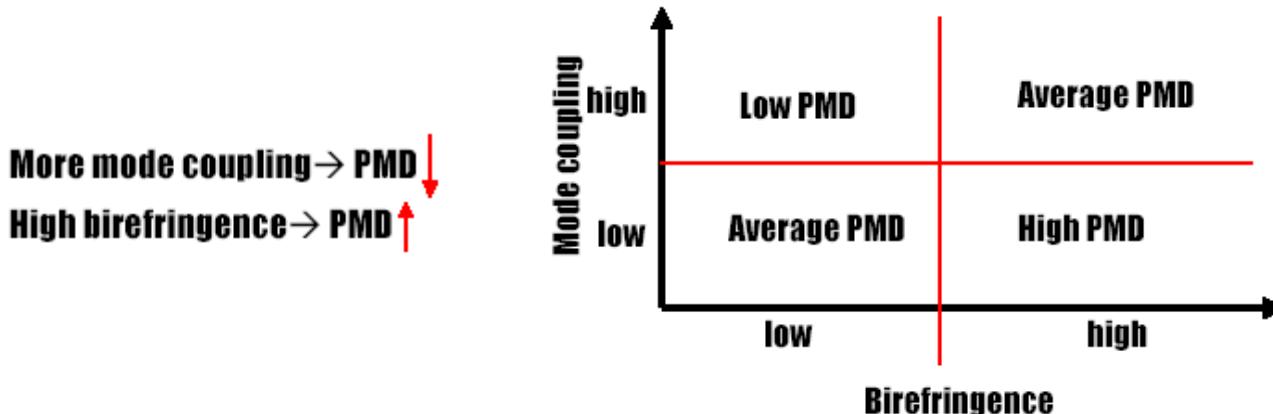
- Đối với sợi quang dài: có sự ghép cặp mode => cân bằng thời gian truyền → giảm PMD



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

Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode phân cực (PMD):



- Quá trình ghép cặp mode thay đổi theo vui trường, độ dài ghép cặp mode biến đổi theo chiều dài sợi => giá trị PMD tức thời là một biến ngẫu nhiên.
- Hệ số PMD: DPMD có đơn vị ps/km^{1/2}

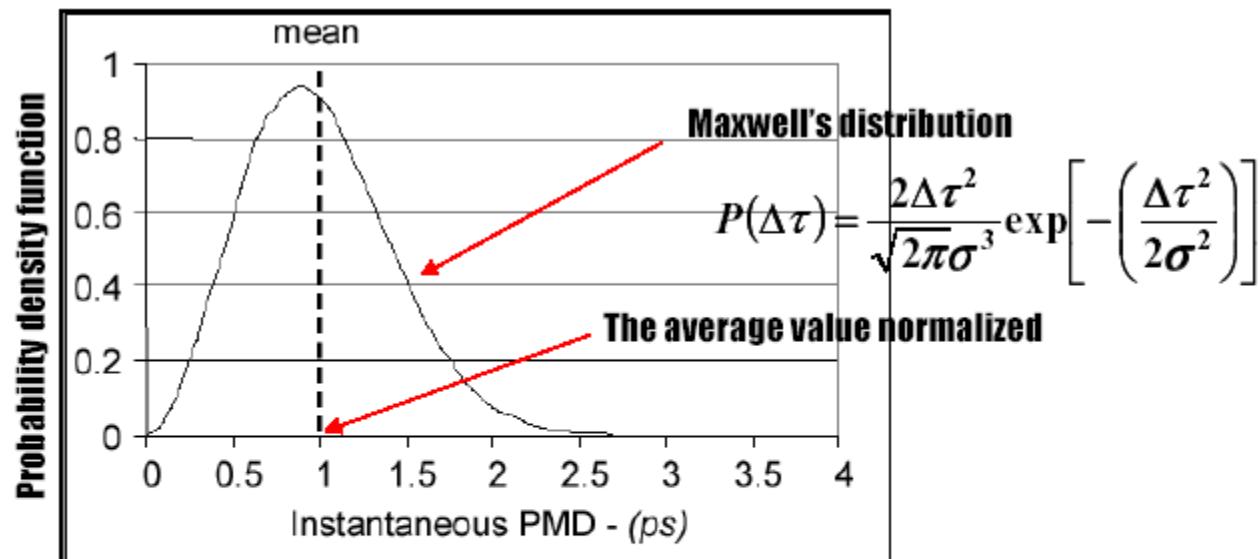
$$\frac{PMD_1}{\ell_1} \quad \frac{PMD_2}{\ell_2} \quad \frac{PMD_3}{\ell_3} \quad \cdots \quad \frac{PMD_N}{\ell_N}$$

$\overbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad}^{\ell_T} \quad PMD_T = ?$

$$PMD_T = \sqrt{\sum_{i=1}^N PMD_i^2}$$

Tán sắc trong sợi quang

- Tán sắc mode phân cực (PMD):
 - Hàm mật độ xác suất của PMD tức thời tuân theo hàm Maxwell



Only mean is measurable, but also differs for successive measurements on the same fiber

$$\langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{D_{PMD}}{\sqrt{h}} \sqrt{L} \quad \sigma = \sqrt{\frac{3\pi-8}{\pi}} \frac{D_{PMD}}{\sqrt{h}} \sqrt{L}$$

28

Các giới hạn truyền dẫn

- Phương trình truyền dẫn

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

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

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

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

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

Các giới hạn truyền dẫn

- Phương trình truyền dẫn

- Phương trình truyền dẫn cơ bản cho thành phần biên độ xung biến đổi chậm (A):

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

- Chuẩn hóa theo tốc độ lan truyền của xung:

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

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

Các giới hạn truyền dẫn

- Truyền xung Gauss có chirp

- Xung Gauss ban đầu:

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

C – hệ số chirp, T0 – độ rộng xung $T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 \approx 1.665 T_0$.

- Chirp (sự dịch tần số theo thời gian) được xác định:

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

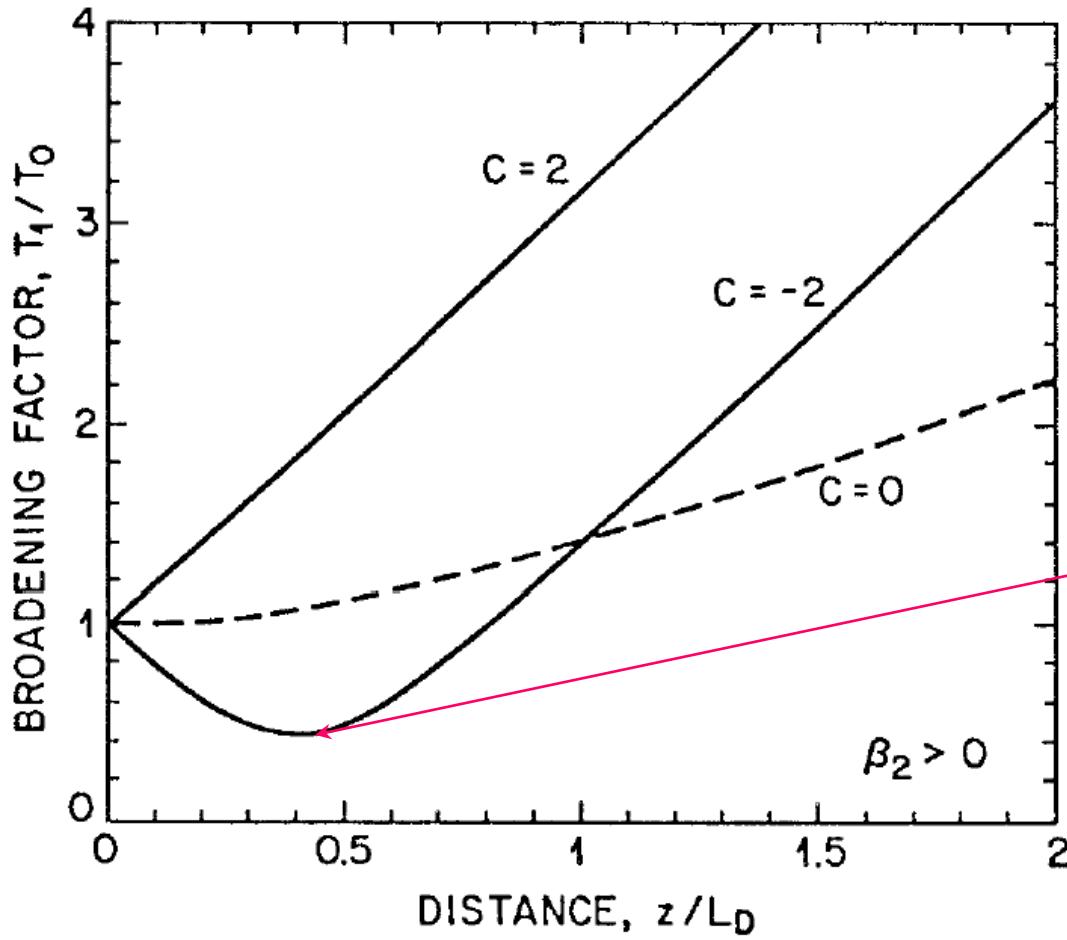
- Xung Gauss đâu ra: xác định bằng việc giải ptrình truyền dẫn

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

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

Các giới hạn truyền dẫn

- Truyền xung Gauss có chirp



$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$$

Dispersion length

Độ rộng xung được nén

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

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

Các giới hạn truyền dẫn

- Giới hạn về tốc độ bit

– Trường hợp nguồn quang có độ rộng phô lớn:

- Chỉ xét β_2 và $C = 0$: $\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_2 L / 2\sigma_0)^2 \equiv \sigma_0^2 + \sigma_D^2$.

$$\rightarrow BL|D|\sigma_\lambda \leq \frac{1}{4}.$$

- Xét $\beta_2 = 0$ và $C = 0$: $\sigma^2 = \sigma_0^2 + \frac{1}{2}(\beta_3 L \sigma_\omega^2)^2 \equiv \sigma_0^2 + \frac{1}{2}(SL\sigma_\lambda^2)^2$,

$$\rightarrow BL|S|\sigma_\lambda^2 \leq 1/\sqrt{8}.$$

– Trường hợp nguồn quang có độ rộng phô nhỏ:

- Chỉ xét β_2 và $C = 0$: $\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_2 L / 2\sigma_0)^2 \equiv \sigma_0^2 + \sigma_D^2$.

$$\rightarrow B\sqrt{|\beta_2|L} \leq \frac{1}{4}.$$

- Xét $\beta_2 = 0$ và $C = 0$: $\sigma^2 = \sigma_0^2 + (\beta_3 L / 4\sigma_0^2)^2 / 2 \equiv \sigma_0^2 + \sigma_D^2$.

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

Các giới hạn truyền dẫn

- Độ rộng băng tần

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

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

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

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

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

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

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

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

Hiệu ứng phi tuyển

- Nguồn gốc:

- Trường quang khi lan truyền trong sợi quang:

$$E(z+dz) = E(z) \exp [(-\alpha/2 + i\beta + \gamma P(z,t)/2) dz]$$

trong đó γ - hệ số phi tuyển $\gamma = (2\pi/\lambda)(n_2/A_{eff})$; n_2 - chiết suất phi tuyển

- Hiệu ứng phi tuyển chỉ ảnh hưởng khi công suất quang trong lõi sợi lớn (γ nhỏ)

- Các hiệu ứng phi tuyển trong sợi quang:

- Tán xạ kích thích: (γ là thực)

- ✓ Tán xạ Raman kích thích (SRS)
 - ✓ Tán xạ Brillouin kích thích (SBS)

- Điều chế pha phi tuyển: (γ là ảo)

- ✓ Tự điều chế pha (SPM)
 - ✓ Điều chế pha chéo (XPM)
 - ✓ Trộn bốn sóng (FWM)

Hiệu ứng phi tuyển

- **Tán xạ kích thích:**

- Tần số ánh sáng bị tán xạ khác với tần số ánh sáng tới
- Tương tác trường quang với môi trường (xác suất nhỏ) sinh ra năng lượng dao động (phonon) và photon tần số thấp hơn

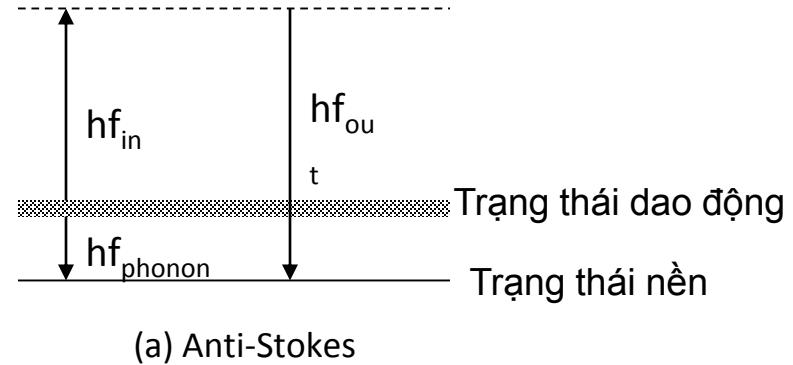
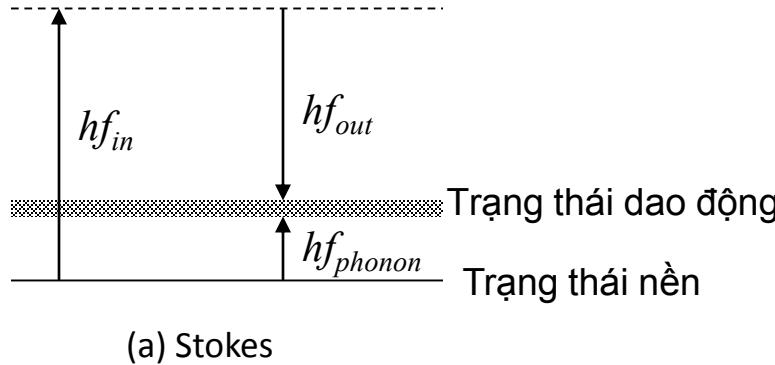
$$hf_{in} = hf_{out} + hf_{phonon} \quad \text{Bảo toàn năng lượng}$$

- Khác nhau giữa SRS và SBS:

- Đối với SBS, phonon ở tần số thấp (phonon âm); đối với SRS phonon ở tần số cao (phonon quang)
- SRS có thể xảy ra ở cả hai hướng, còn SBS thường chiếm chủ yếu ở hướng ngược lại với chiều lan truyền.
- Đối với SRS ánh sáng bị tán xạ bị dịch khoảng 13 THz, còn đối với SBS chỉ khoảng 10 GHz.
- Phổ khuyếch đại Brillouin (< 100 MHz) hẹp hơn nhiều so với phổ khuyếch đại Raman (10 – 30 THz)

Hiệu ứng phi tuyến

- Tán xạ kích thích:
 - Tán xạ Raman kích thích:
 - Có 2 loại tán xạ Raman:



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

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

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

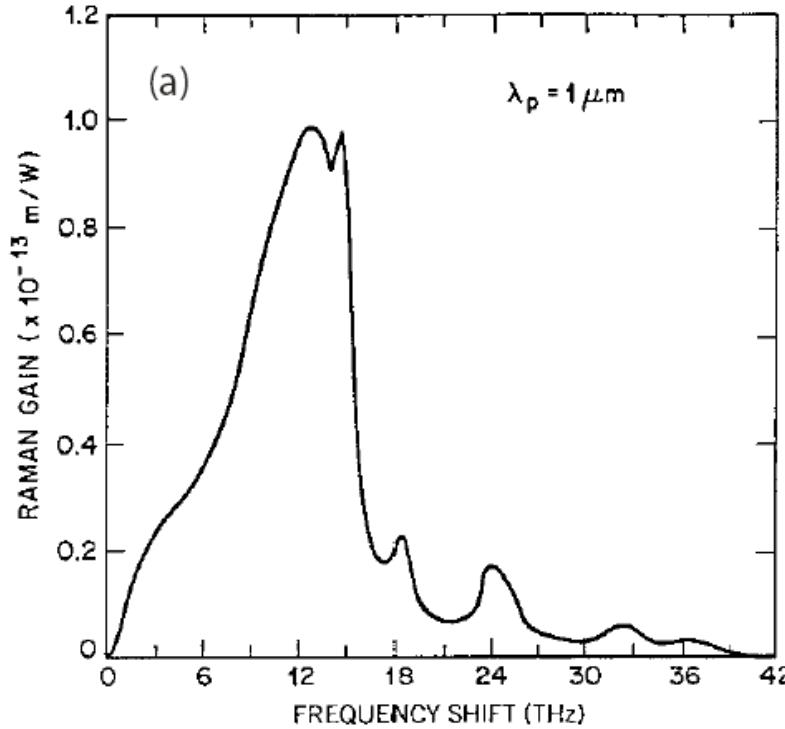


Hiệu ứng phi tuyến

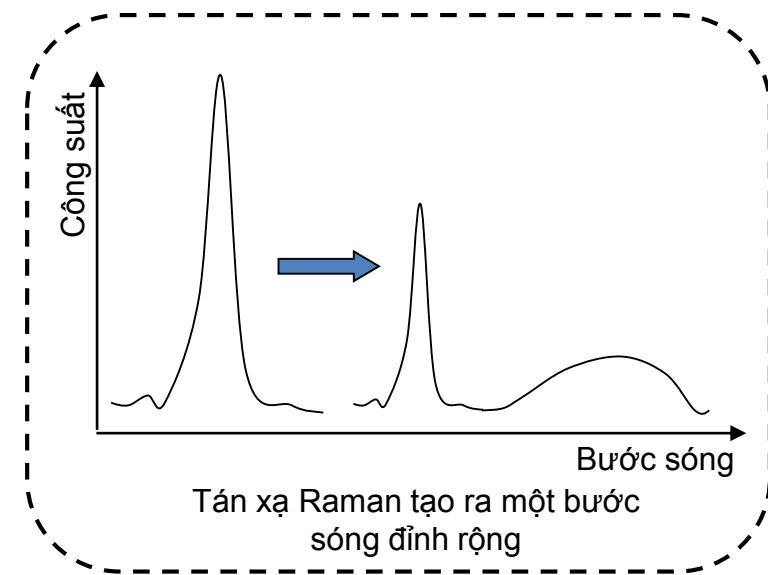
- Tán xạ kích thích:

- Tán xạ Raman kích thích:

- Các trạng thái dao động: hình thành một dải $\rightarrow f_s$ trên một dải rộng



Phổ khuyếch đại Raman của thủy tinh

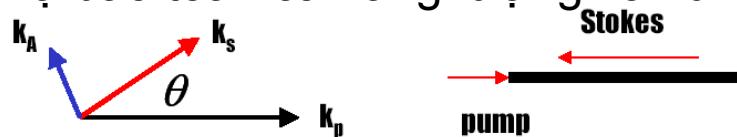


Hiệu ứng phi tuyến

- Tán xạ kích thích:

- Tán xạ Brillouin kích thích:

- Tán xạ xảy ra do tương tác của photon tới với một sóng âm
- Sóng âm sinh ra do sự thăng giáng chiết suất gây ra bởi các dao động trong vật liệu
- Quá trình tán xạ bảo toàn cả năng lượng và xung lượng



• Stokes generated by interaction of pump light and acoustic wave

$$\text{Energy conservation} \rightarrow \Omega_A = \omega_p - \omega_s$$

$$\text{Momentum conservation} \rightarrow k_A = k_p - k_s$$

$$\Omega_A = v_A |k_A| \approx 2v_A |k_p| \sin(\theta/2)$$

$|k_p| \approx |k_s|$

Hiệu ứng phi tuyến

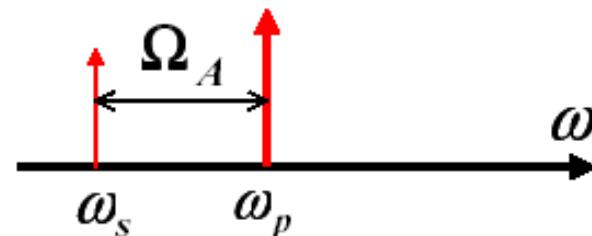
- Tán xạ kích thích:

- Tán xạ Brillouin kích thích:

$$\theta = \pi \quad \Omega_A \text{ maximum} \rightarrow \text{backward direction}$$

$$\theta = 0 \quad \Omega_A = 0 \rightarrow \text{vanish in the forward direction}$$

Fiber:
 $n=1.45$, $v_A=5.96 \text{ km/s}$,
 $\lambda_p = 1.55 \mu\text{m}$



Freq of acoustic wave:

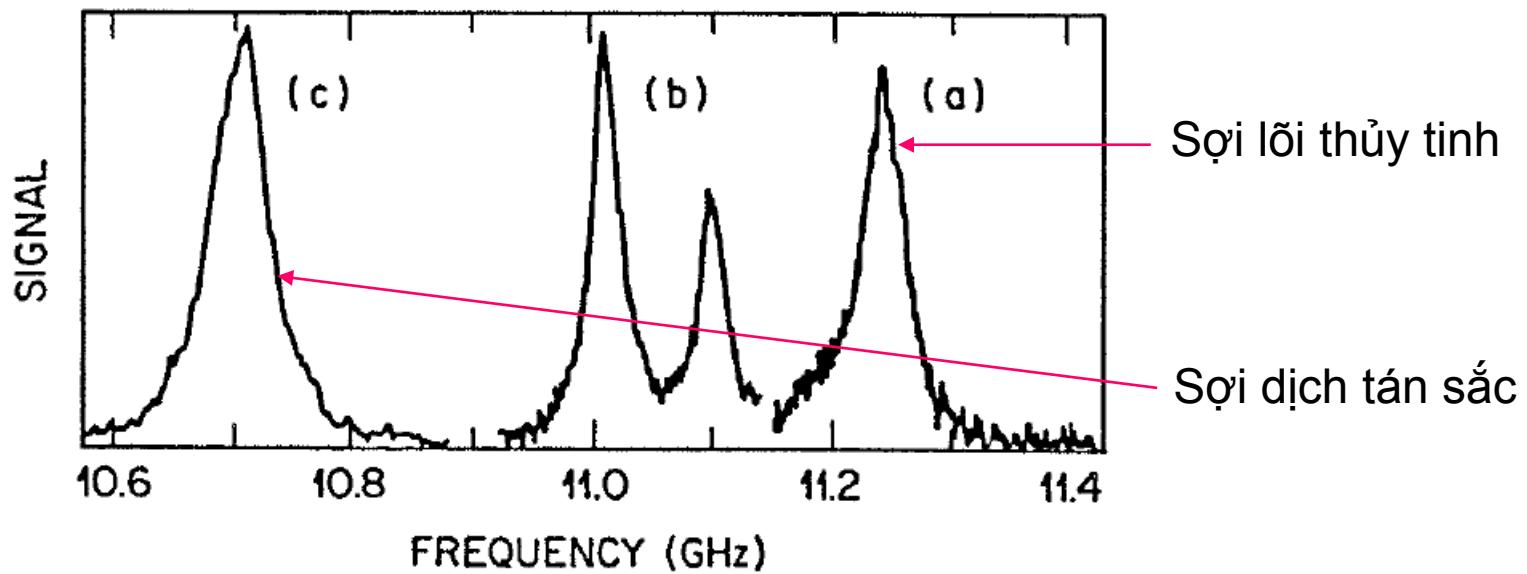
$$v_A = \frac{\Omega_A}{2\pi} = 11.1 \text{ GHz}$$

- Phổ khuyếch đại Brillouin giống với dạng Lorentz

$$g_B(\Omega) = \frac{g_B(\Omega_B)}{1 + (\Omega - \Omega_B)^2 T_B^2}.$$

Hiệu ứng phi tuyến

- Tán xạ kích thích:
 - Tán xạ Brillouin kích thích:



- Ngưỡng SBS: $P_{th} \approx 21A_{eff}/(g_B \cdot L_{eff})$
- Ánh sáng điều biến có ngưỡng SBS cao hơn nhiều
Tốc độ bít $\uparrow \rightarrow$ Ngưỡng SBS \uparrow



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

$$\hat{n}_i = n_i + \hat{n}_2 I$$

n_i $i=1,2$ core or cladding

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

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

Hiệu ứng phi tuyến

- Điều chế pha phi tuyến

- Tự điều chế pha (SPM):

- Hệ số truyền dẫn phụ thuộc vào công suất

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

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

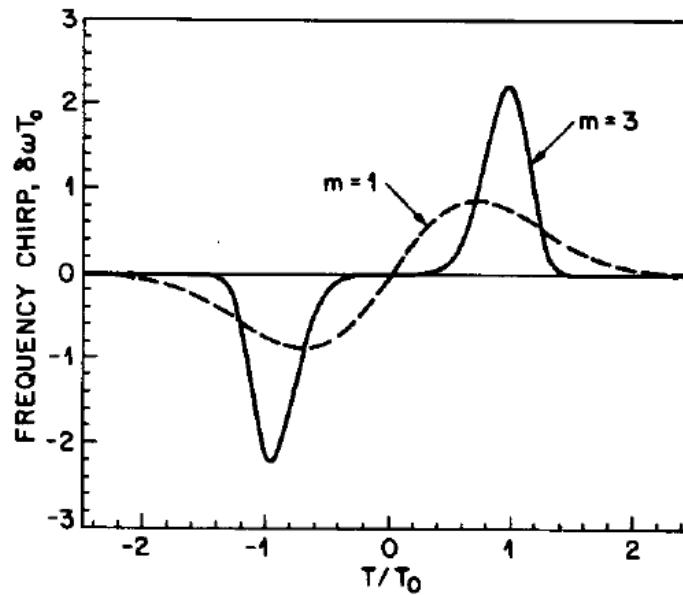
$$P = |A(z, t)|^2 \quad \text{Time dependent,}$$

- Cường độ xung quang điều chế pha của chính xung quang
⇒ SPM
- Độ dịch pha phi tuyến:

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

Hiệu ứng phi tuyến

- Điều chế pha phi tuyến
 - Tự điều chế pha (SPM):
 - Chirp tần gây ra bởi SPM:



- Giới hạn công suất đỉnh:

$$P_{in} < 0.1\alpha / (\gamma N_A) \quad N_A - \text{Số lượng bộ khuyếch đại}$$

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:

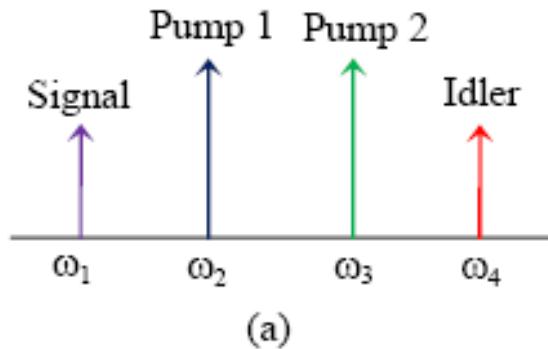
$$\phi_j^{\text{NL}} = \gamma L_{\text{eff}} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right),$$

- 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

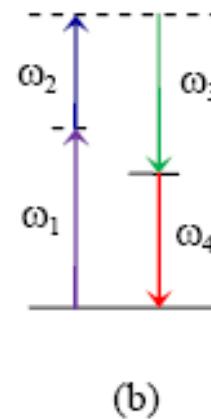
Hiệu ứng phi tuyến

- Trộn bốn sóng (FWM)

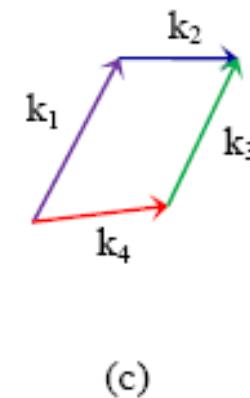
- Khi ba trường quang ở các tần số $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ truyền đồng thời trong sợi quang tạo ra trường quang mới ω_4



Distinct optical waves



Energy conservation



Momentum conservation

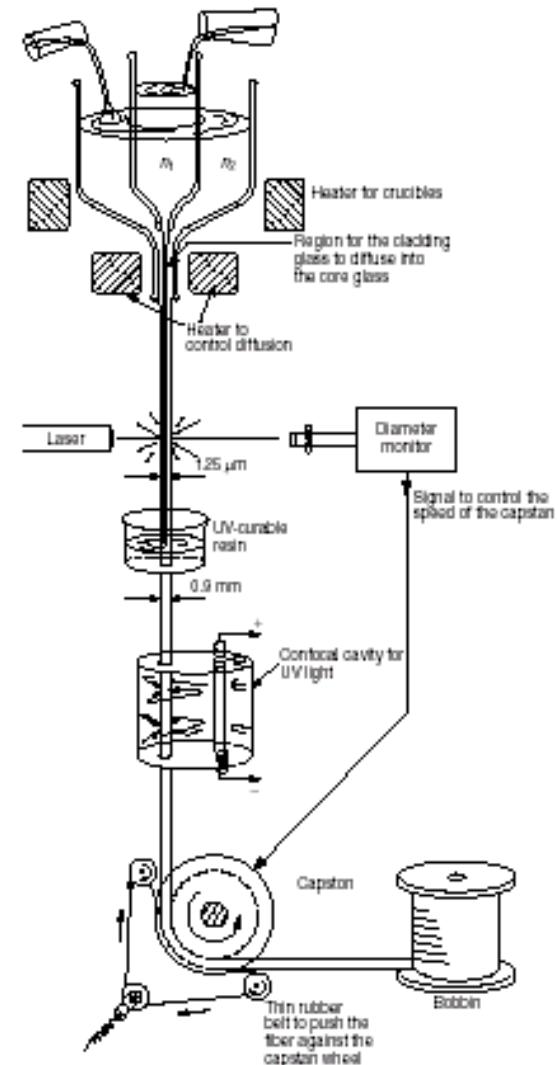
$$\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 \quad \text{all combinations}$$

- Điều kiện phối hợp pha:

Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Quá trình sản xuất sợi quang

- Sản xuất sợi quang theo 1 giai đoạn:
 - Ưu điểm: Kéo sợi liên tục
 - Nhược điểm: Chỉ được sử dụng với thủy tinh có điểm nóng chảy thấp, khó điều khiển để sợi quang được đồng đều



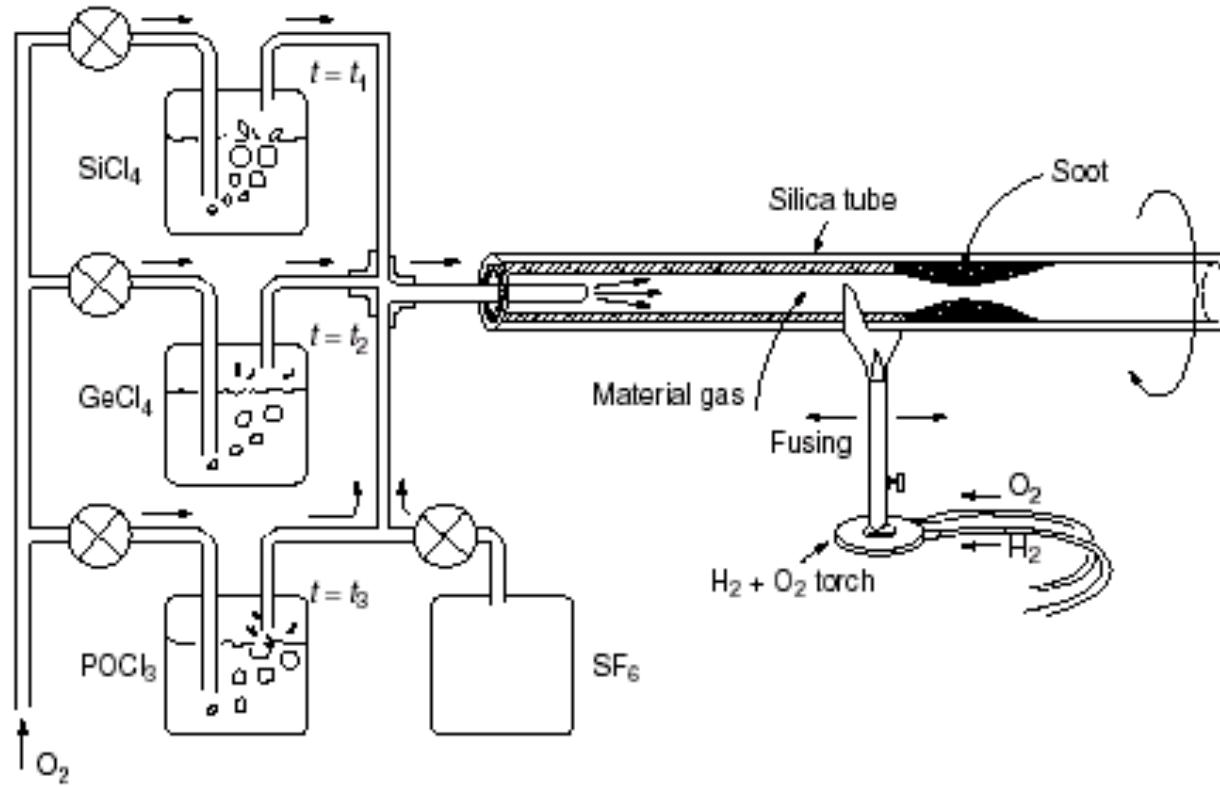
Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Quá trình sản xuất sợi quang
 - Sản xuất sợi quang theo 2 giai đoạn:
 - Chế tạo phôi: Có kích thước dài ~ 1 m, đường kính ~ 2cm
 - Sử dụng các phương pháp sau:
 - ✓ Phương pháp lắng đọng pha hơi hóa chất bên trong (IVD)
 - MCVD
 - PCVD
 - PMCVD
 - ✓ Phương pháp lắng đọng pha hơi hóa chất bên ngoài (OVD)
 - ✓ Phương pháp lắng đọng pha hơi hóa chất theo trực (AVD)
 - Kéo sợi



Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Quá trình sản xuất sợi quang
 - Sản xuất sợi quang theo 2 giai đoạn:
 - Chế tạo phôi:* Phương pháp MCVD

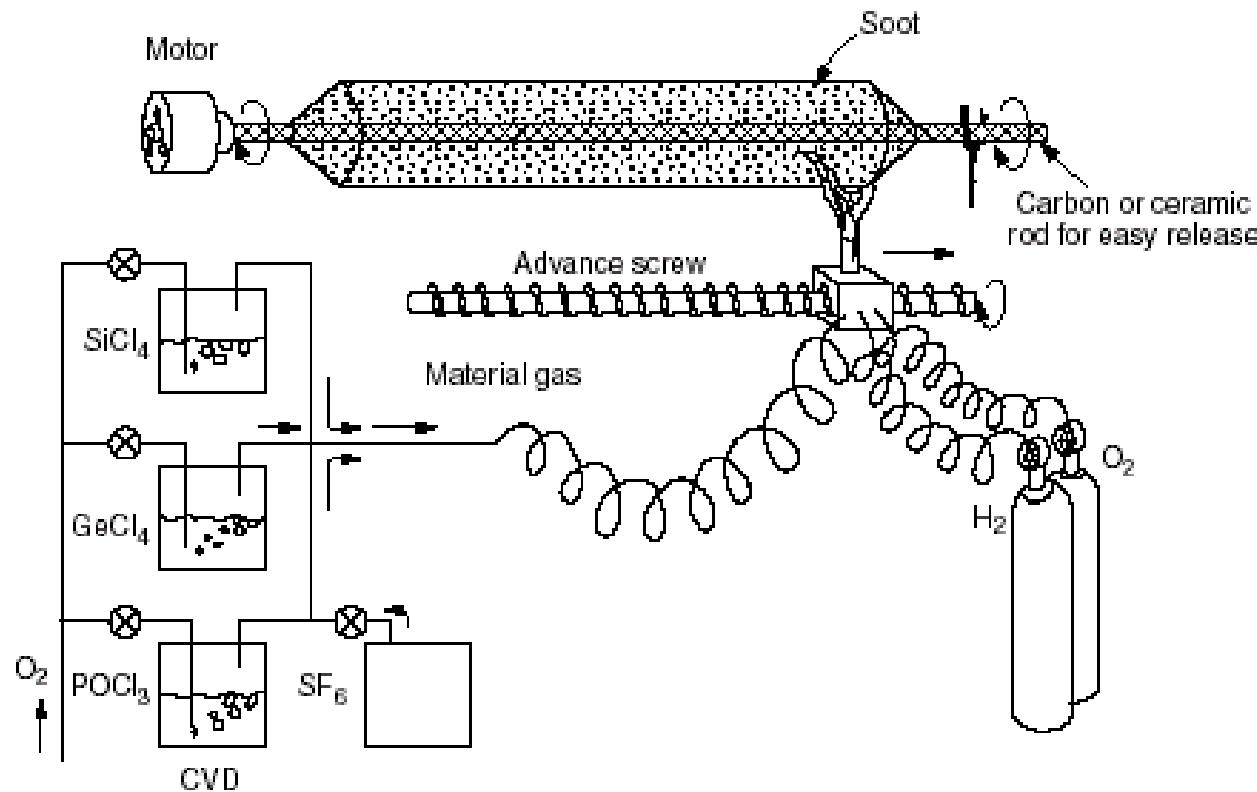


Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Quá trình sản xuất sợi quang

- Sản xuất sợi quang theo 2 giai đoạn:

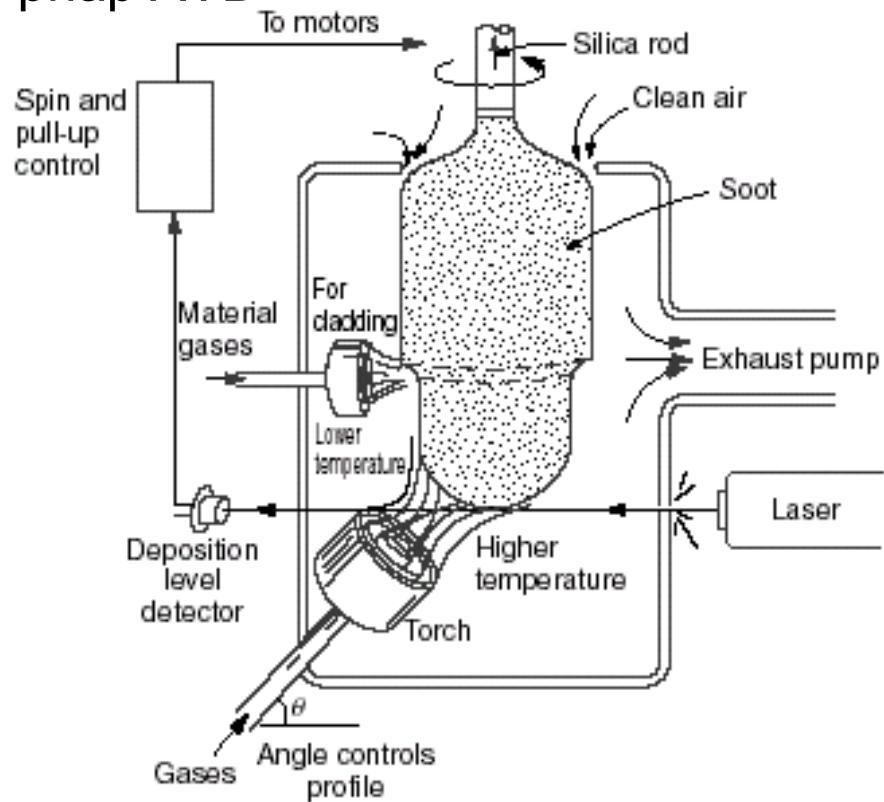
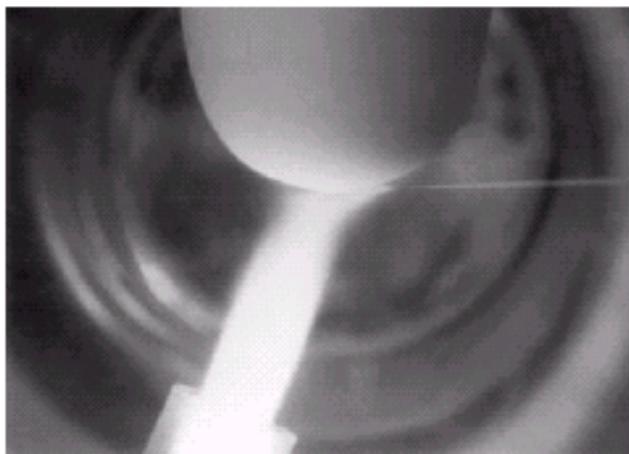
- Chế tạo phôi: Phương pháp OVD



Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Quá trình sản xuất sợi quang

- Sản xuất sợi quang theo 2 giai đoạn:
 - Chế tạo phôi: Phương pháp AVD

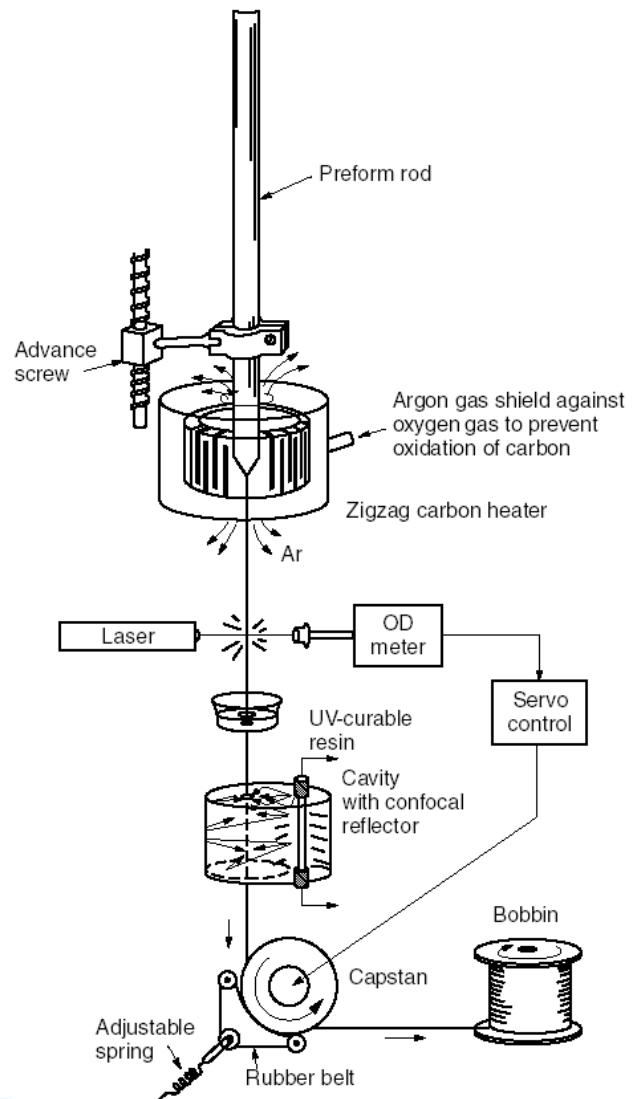


Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Quá trình sản xuất sợi quang

- Sản xuất sợi quang theo 2 giai đoạn:

- Kéo sợi:



Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Cáp sợi quang

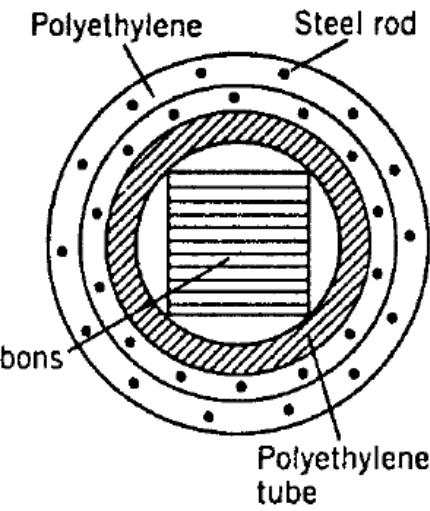
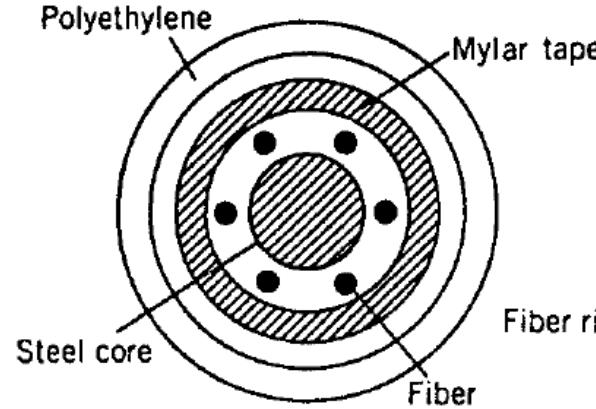
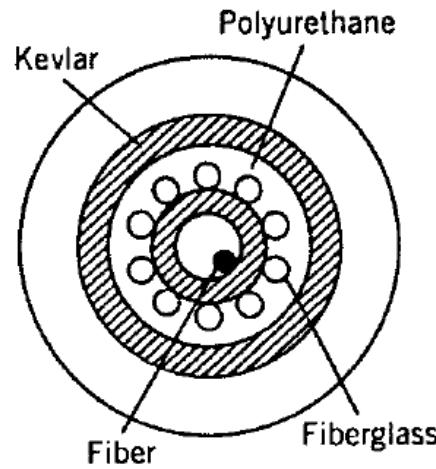
- Gồm các thành phần chính
 - Lõi cáp: Sợi quang đã được bọc đệm được bện xoắn hoặc đặt vào lõi có rãnh sẵn có



- Thành phần gia cường: Bảo vệ sợi khỏi các tác động cơ học và giữ ổn định cho cáp
 - ✓ Gồm 2 kiểu cơ bản: thành phần gia cường trung tâm và thành phần gia cường bao ngoài
 - ✓ Vật liệu: Kim loại (Thép) hoặc phi kim loại (Composit sợi C hoặc nilon, sợi polyme)

• Cáp sợi quang

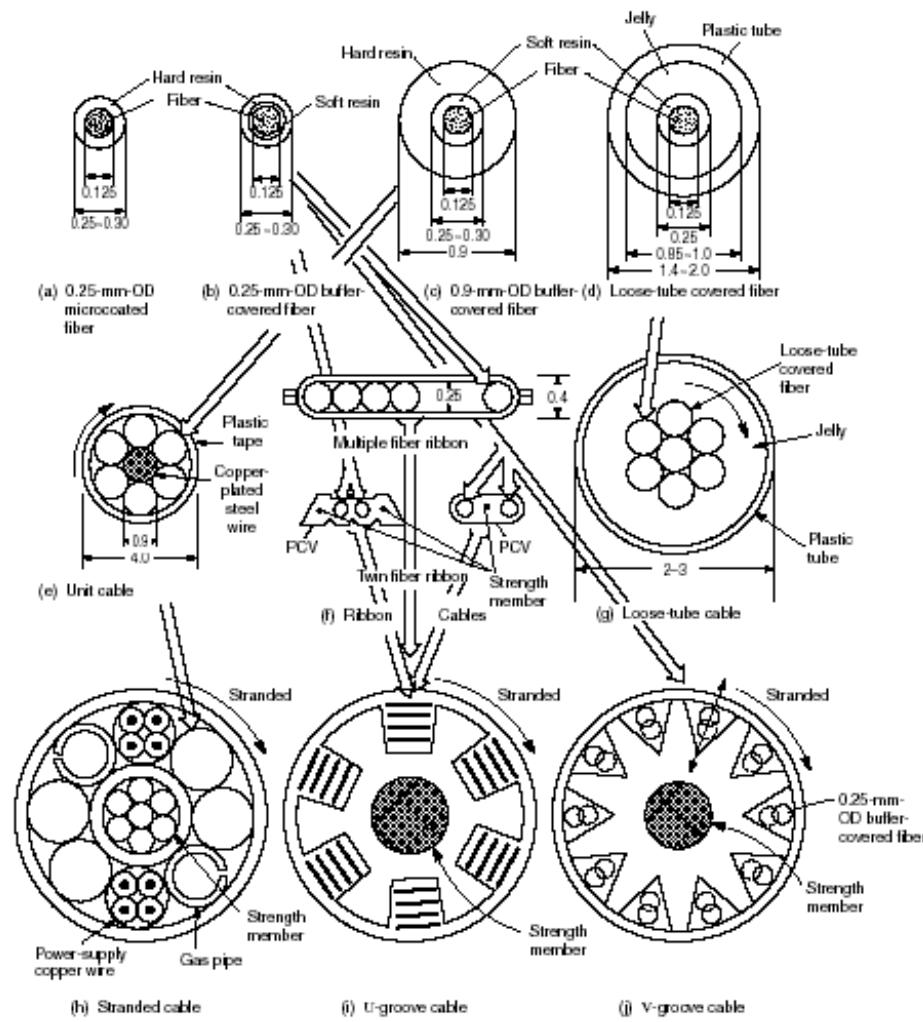
- Gồm các thành phần chính
 - Vỏ cáp: Bao bọc bên ngoài nên phải có đặc tính cơ lý hóa học tốt
 - Vật liệu: PE (thường cho cáp ngoài trời) hoặc PVC
 - Chất độn: lấp đầy các khoảng trống trong cáp, có khả năng chống ẩm, không thấm nước, không phản ứng với các thành phần khác, khó cháy



Thiết kế và chế tạo sợi quang

- Cáp sợi quang

 - Ví dụ:



Thiết kế và chế tạo sợi quang

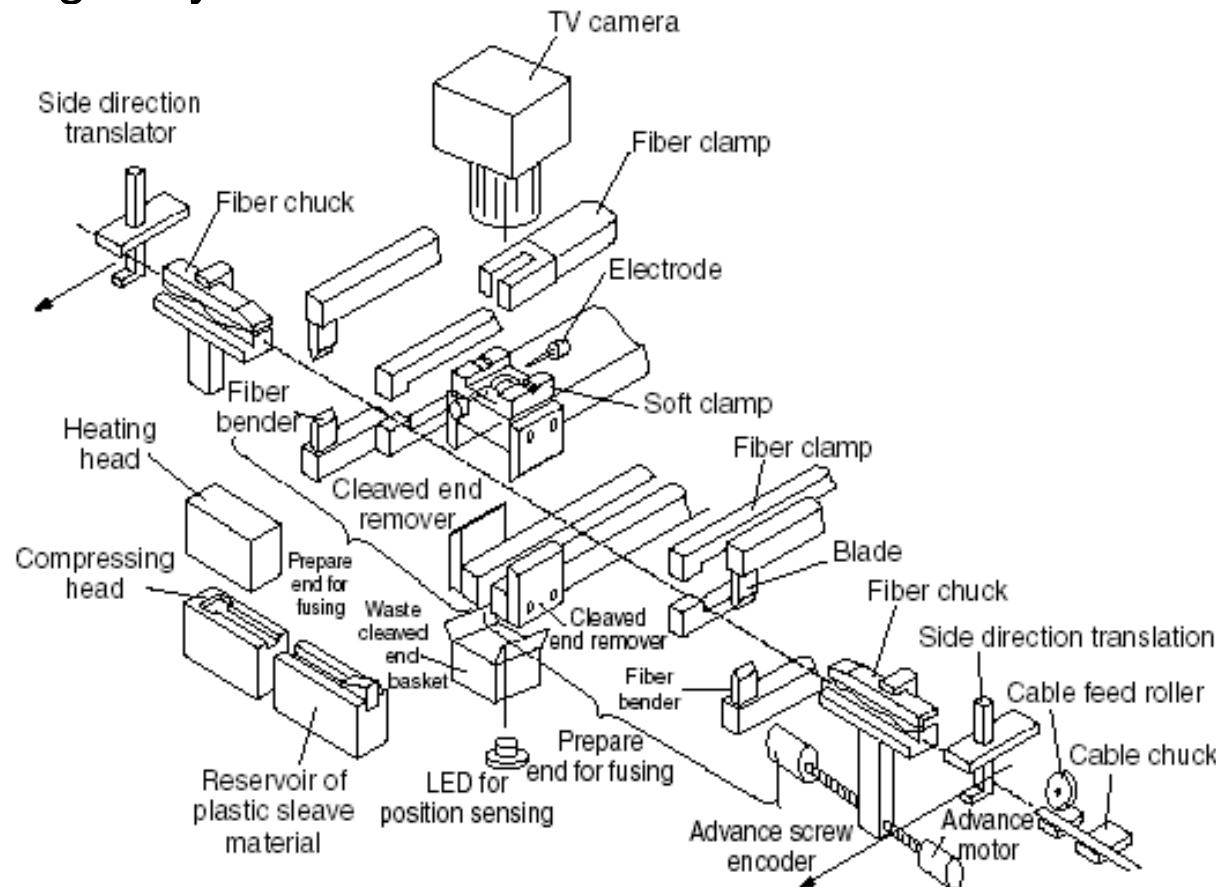
• Hàn nối sợi quang

- Các yếu tố ảnh hưởng đến suy hao của mối hàn nối:
 - Chất lượng mặt cắt của sợi:
 - Không phẳng nhẵn, lồi lõm
 - Dính bụi và các chất bẩn
 - Không vuông góc với trực sợi
 - Vị trí tương đối giữa hai đầu sợi:
 - Lệch trực
 - Lệch tâm
 - Khe hở
 - Các thông số hai sợi: Khác biệt nhau về đường kính lõi, đường kính vỏ, NA, độ méo...

Thiết kế và chế tạo sợi quang

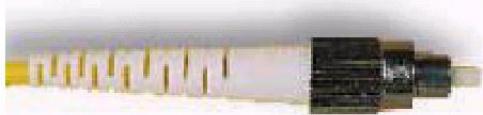
- **Hàn nối sợi quang**

- **Hàn nóng chảy:**



Thiết kế và chế tạo sợi quang

- **Hàn nối sợi quang**
 - Connector quang:



Fiber channel (FC)



Square connector (SC)



Straight tip (ST)

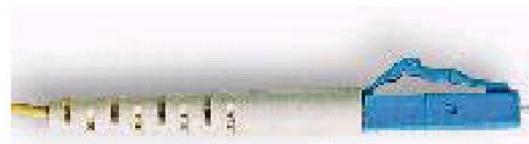
ferule



E2000



Lucent connector (LC)



- PC (physical contact)
- APC (Angled physical contact)

FC/PC, FC/APC, LC/PC, LC/APC,

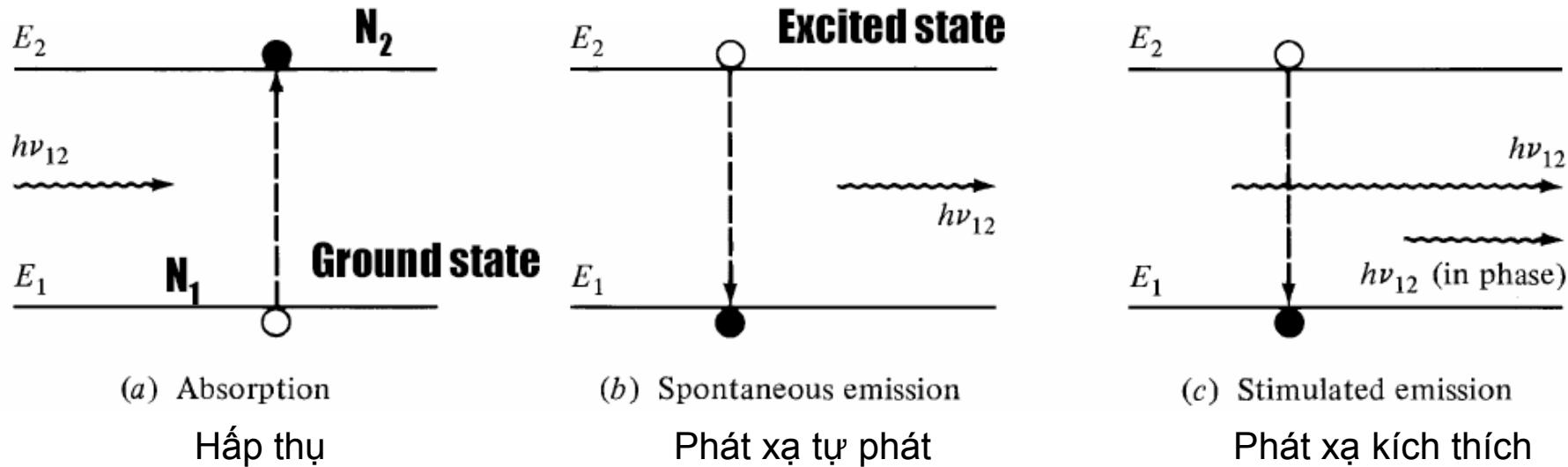


Chương 3

Bộ phát quang

Một số vấn đề cơ bản

- Quá trình phát xạ và hấp thụ
 - Hệ 2 mức đơn giản: có 3 quá trình cơ bản



N_1, N_2 : atomic density

$\rho_{em}(\nu)$ spectral density of EM energy

Một số vấn đề cơ bản

- Quá trình phát xạ và hấp thụ

- Tốc độ phát xạ tự phát: $R_{sp} = AN_2$
- Tốc độ phát xạ kích thích: $R_{st} = BN_2\rho_{em}$
- Tốc độ hấp thụ: $R_{ab} = CN_1\rho_{em}$
- Ở điều kiện cân bằng nhiệt:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)$$

$$AN_2 + BN_2\rho_{em} = CN_1\rho_{em}$$

→ $\rho_{em} = \frac{A/B}{(C/B)\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$

Một số vấn đề cơ bản

- Quá trình phát xạ và hấp thụ

- Theo lý thuyết bức xạ lõi đen:

Also from blackbody radiation:

$$\rho_{em} = \frac{8\pi h\nu^3/c^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

$$\rightarrow A = \left(\frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \right) B, C = B$$

- Trong điều kiện cân bằng nhiệt:

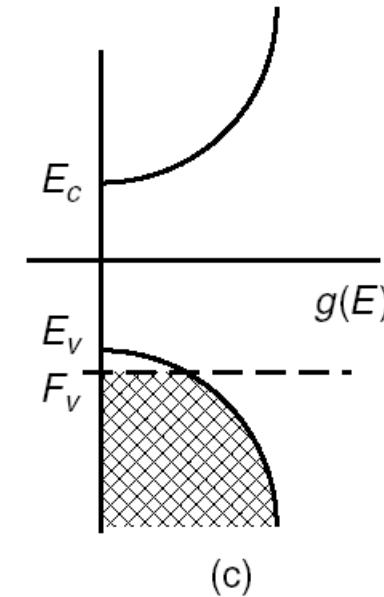
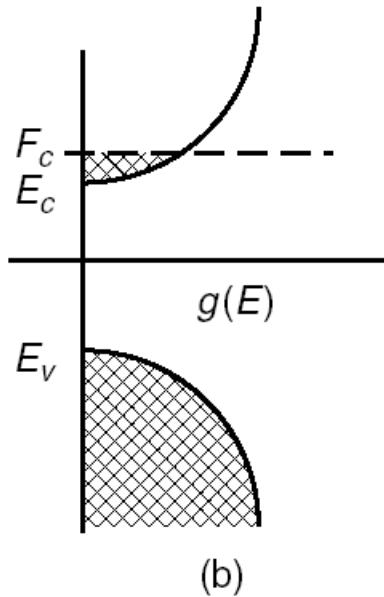
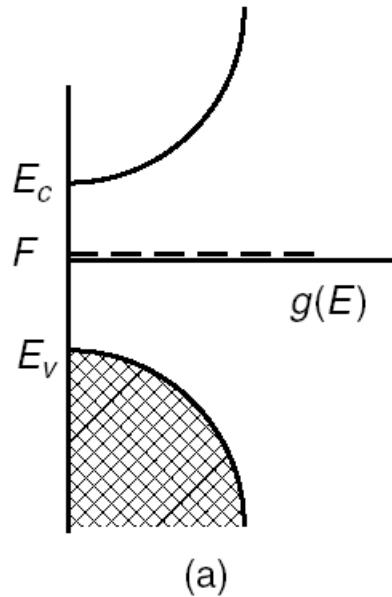
$$\frac{R_{st}}{R_{sp}} = \frac{B}{A} \rho_{em} = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \ll 1$$

- Phát xạ kích thích > hấp thụ:

$$\frac{R_{st}}{R_{ab}} = \frac{N_2}{N_1} > 1 \quad \text{Population inversion}$$

Một số vấn đề cơ bản

- Các vật liệu bán dẫn
 - Các loại bán dẫn:



Hàm mật độ trạng thái $g(E)$ (a) Bán dẫn thuần, (b) Bán dẫn loại n,
 (c) Bán dẫn loại p.

Một số vấn đề cơ bản

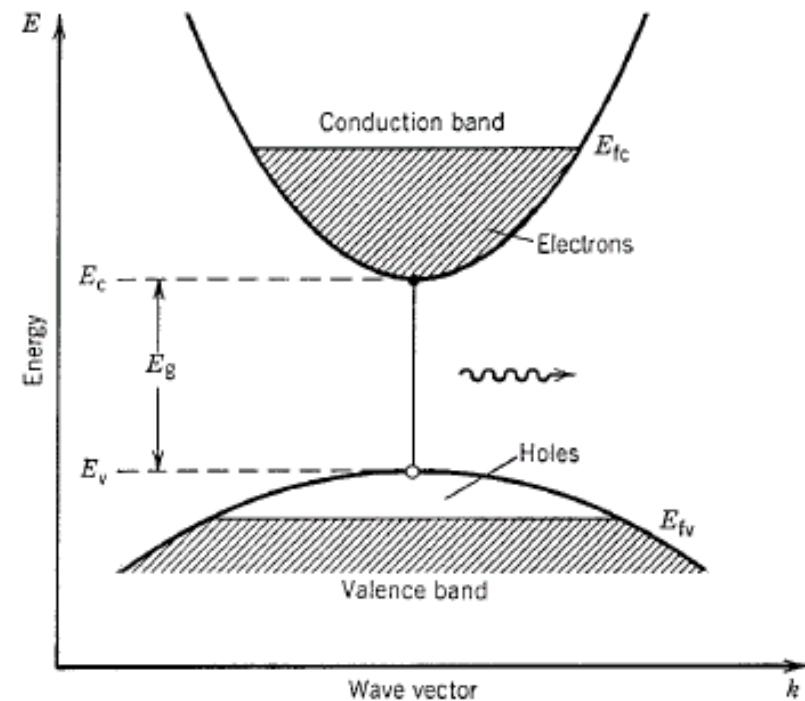
- Các vật liệu bán dẫn

- Quá trình phát xạ và hấp thụ trong vật liệu bán dẫn: phụ thuộc vào các dải năng lượng trong bán dẫn

- Điều kiện đảo lộn mật độ:

$$R_{\text{stim}} > R_{\text{abs}}$$

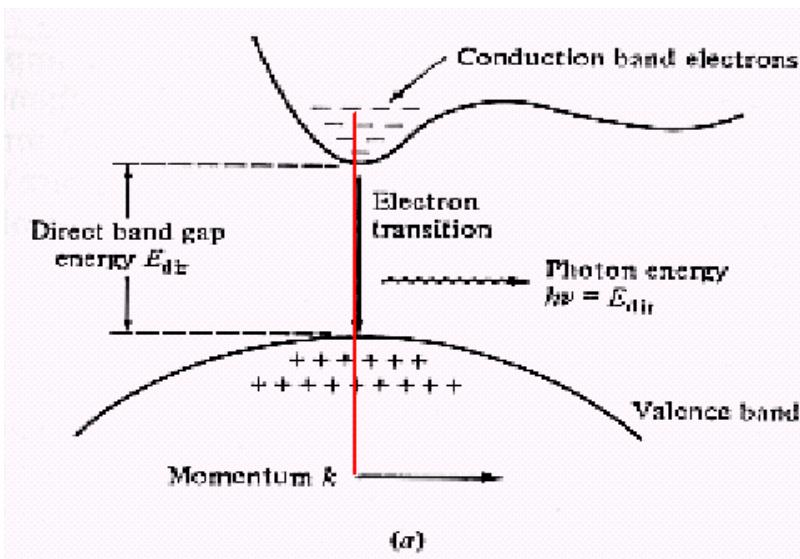
$$\rightarrow E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g.$$



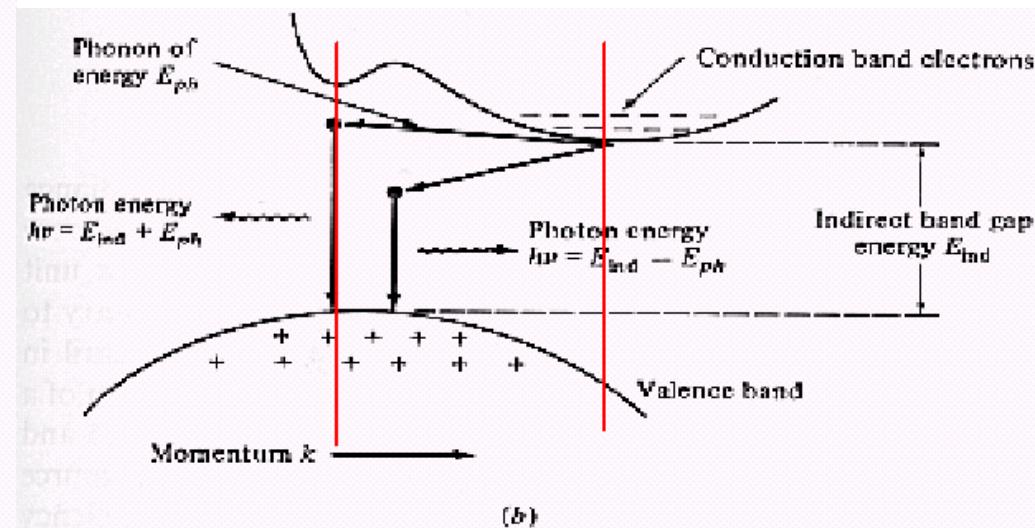
Một số vấn đề cơ bản

- Các vật liệu bán dẫn

- Quá trình tái hợp e-h phát ra photon bảo toàn cả về năng lượng và xung lượng → Đối với vật liệu dải cấm gián tiếp, đòi hỏi phải có sự tham gia của phonon



Dải cấm trực tiếp



Dải cấm gián tiếp



Một số vấn đề cơ bản

- Các vật liệu bán dẫn

- Hợp chất 3 thành phần:



$$E_g(x) = 1.424 + 1.247x$$

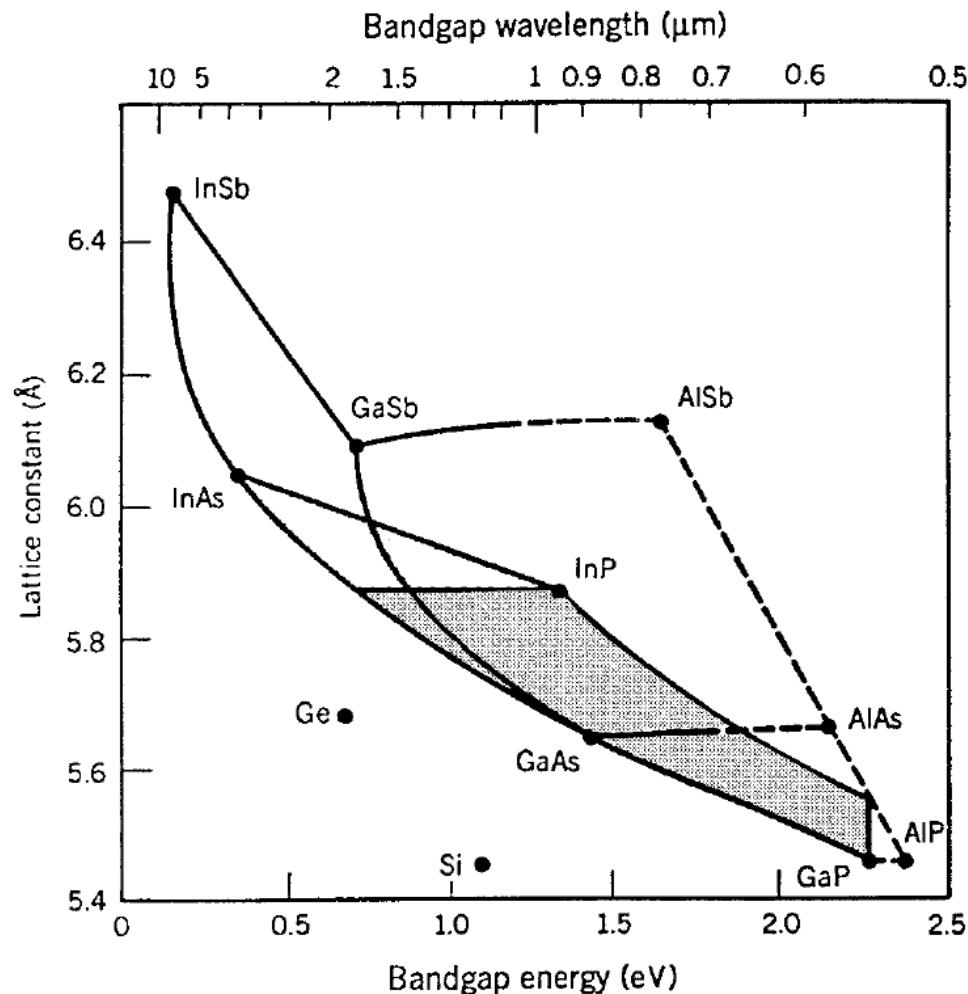
$(0 < x < 0.45)$

- Hợp chất 4 thành phần:



$$E_g(y) = 1.35 - 0.72x + 0.12y^2$$

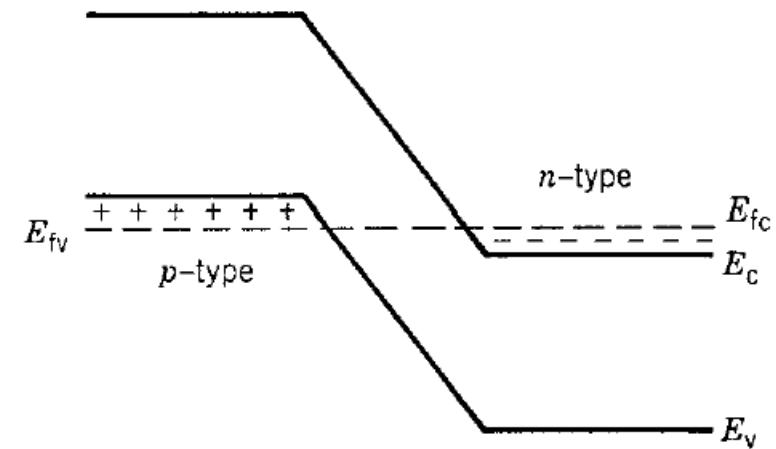
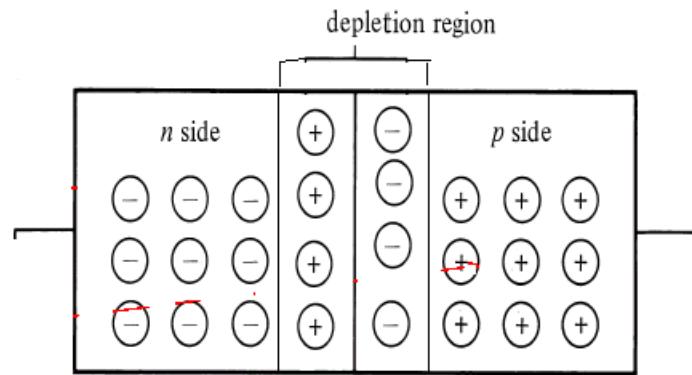
$(0 \leq y \leq 1), x/y = 0.45$



Một số vấn đề cơ bản

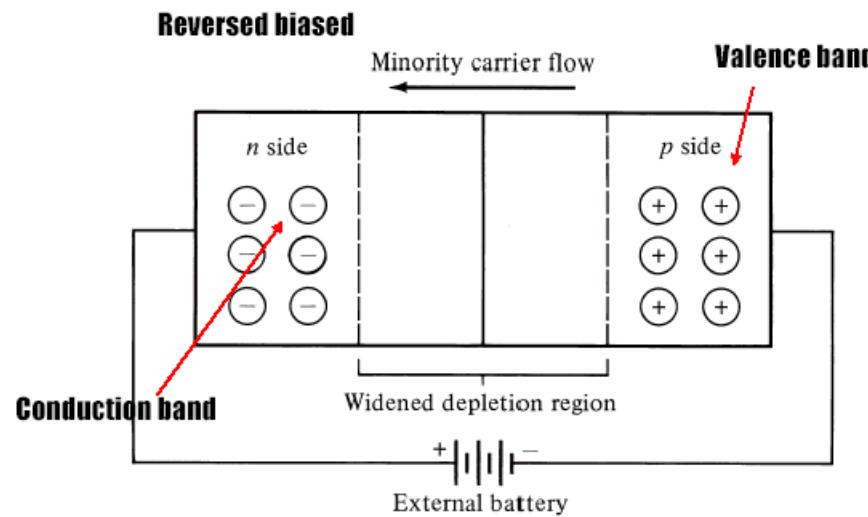
- Tiếp giáp p-n

- Hình thành từ hai loại bán dẫn loại n và bán dẫn loại p
- Khi chưa đặt điện áp phân cực → Các hạt tải đa số khuyếch tán qua lớp tiếp giáp → Hình thành hàng rào thế
- Trạng thái cân bằng thiết lập → Vùng nghèo (không có hạt tải linh động)



Một số vấn đề cơ bản

- Tiếp giáp p-n
 - Khi phân cực ngược: Vùng nghèo được mở rộng, các điện tử và lỗ trống khó gặp nhau để tái hợp phát ra ánh sáng → Sử dụng cho chế tạo photodiode



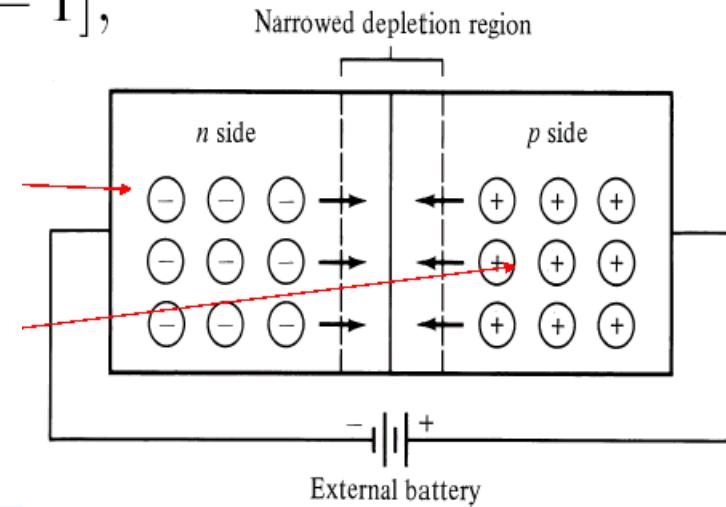
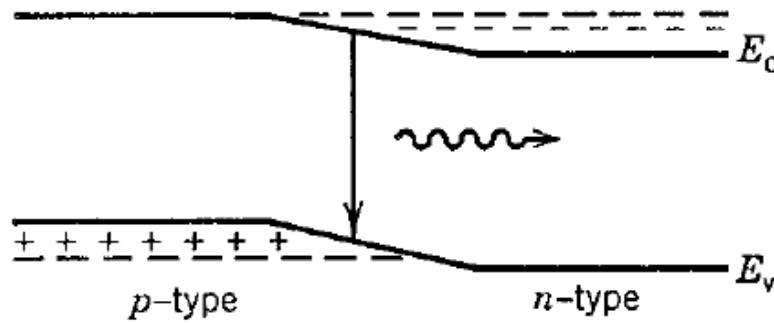
Một số vấn đề cơ bản

- Tiếp giáp p-n

- Khi phân cực thuận: Vùng nghèo hẹp lại, hay hàng rào thế hạ thấp xuống → Các điện tử và các lỗ trống được bơm vào vùng nghèo dễ dàng tái hợp để phát ra ánh sáng

Quan hệ giữa dòng chạy qua tiếp giáp và thế đặt vào:

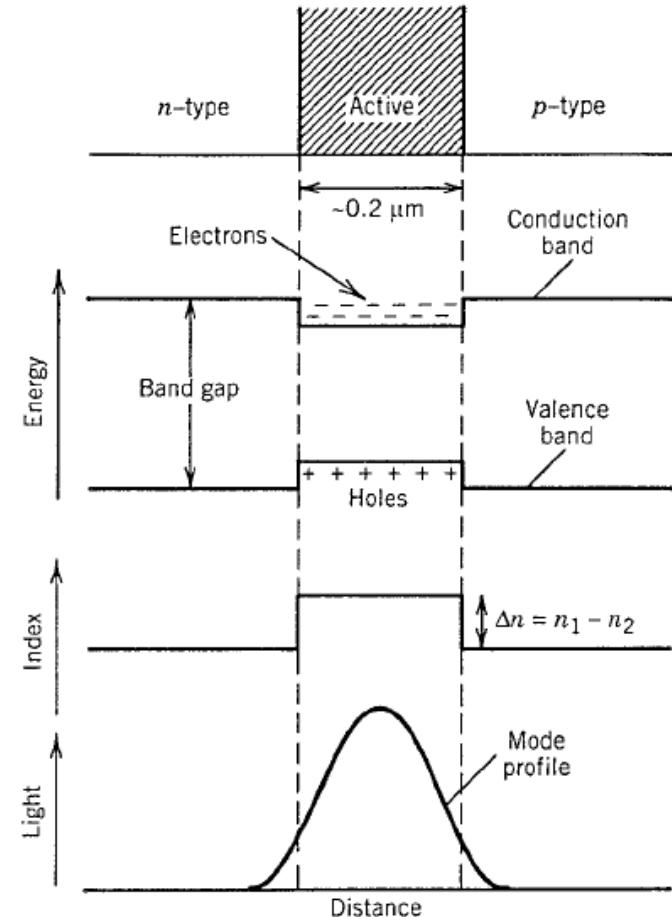
$$I = I_s [\exp(qV/k_B T) - 1],$$



Một số vấn đề cơ bản

- Tiếp giáp p-n

- Cấu trúc đồng thể: các hạt tải không bị giam hãm → hiệu suất phát xạ kém
- Cấu trúc dị thể kép: gồm 3 lớp cơ bản
 - Lớp bán dẫn mỏng ở giữa có Eg nhỏ (lớp tích cực)
 - Hai lớp bán dẫn p và n ở hai bên có Eg lớp hơn (các lớp hạn chế)
 - Ưu điểm:
 - Giảm hãm hạt tải
 - Giảm hãm photon



Một số vấn đề cơ bản

- Quá trình tái hợp

- Bên cạnh tái hợp bức xạ còn có tái hợp không bức xạ
- Hiệu suất lượng tử nội:

Internal quantum efficiency: $\eta_{int} = \frac{R_{rr}}{R_{tot}} = \frac{R_{rr}}{R_{rr} + R_{nr}}$

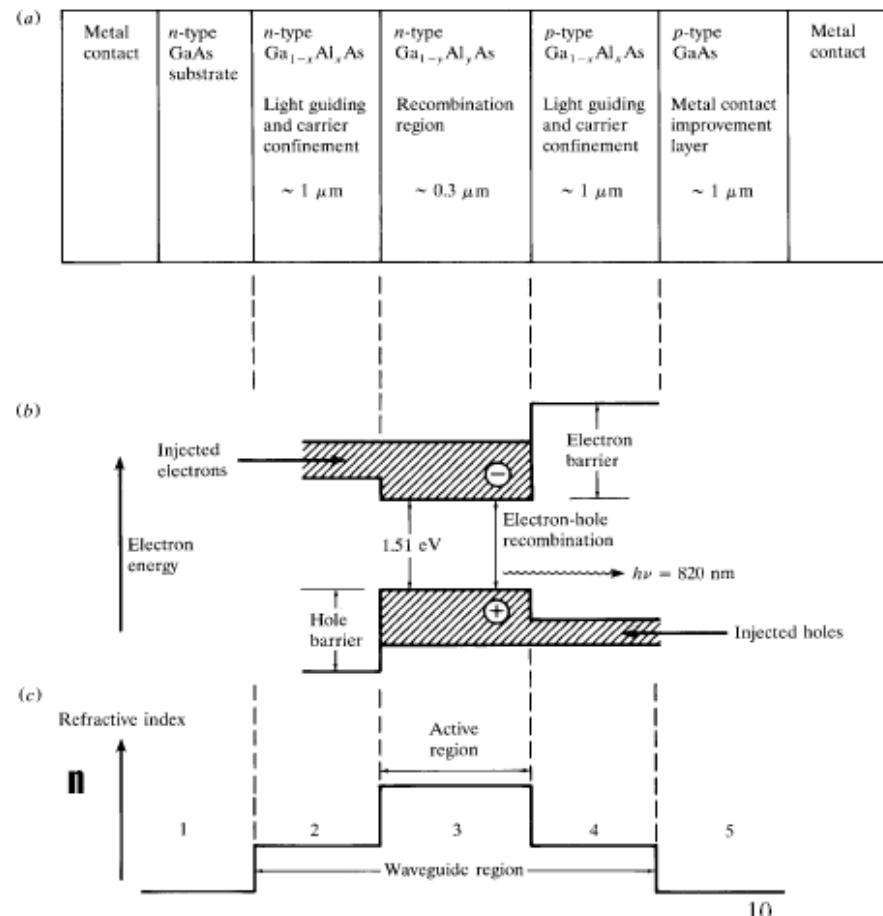
Hoặc $\eta_{int} = \frac{\tau_{nr}}{\tau_{rr} + \tau_{nr}}$. trong đó $R_{rr} = N/\tau_{rr}$ and $R_{nr} = N/\tau_{nr}$

- Tốc độ tái hợp bức xạ: $R_{rr} = R_{sp} + R_{st}$
- Thời gian sống của hạt tải: $\tau_c = \frac{N}{R_{nr} + R_{sp}}$
 $\tau_c^{-1} = A_{nr} + BN + CN^2$.

Nguồn LED

- Cấu tạo LED

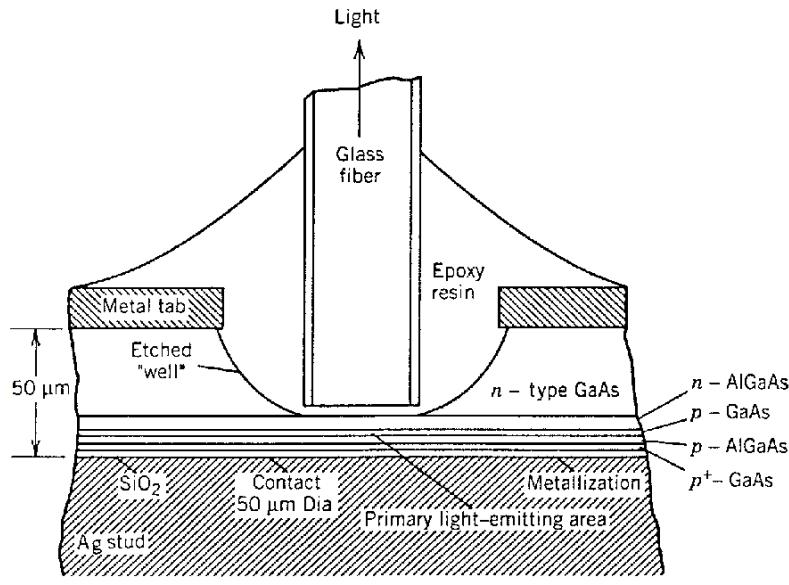
- Cấu trúc dì thê kép
- Dựa trên cơ chế phát xạ tự phát
- Ánh sáng phát ra là ánh sáng không kết hợp, có độ rộng phổ lớn
- Độ rộng chùm sáng phát xạ lớn → Hiệu suất ghép nối với sợi quang nhỏ



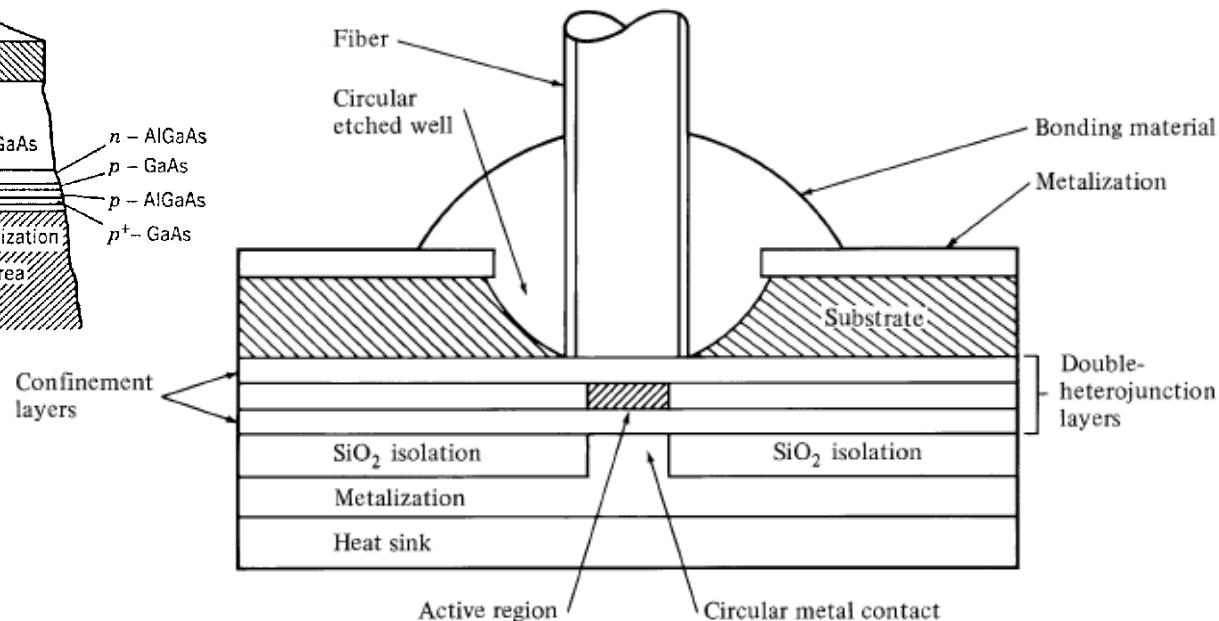
10

Nguồn LED

- Các loại LED
 - LED phát xạ mặt



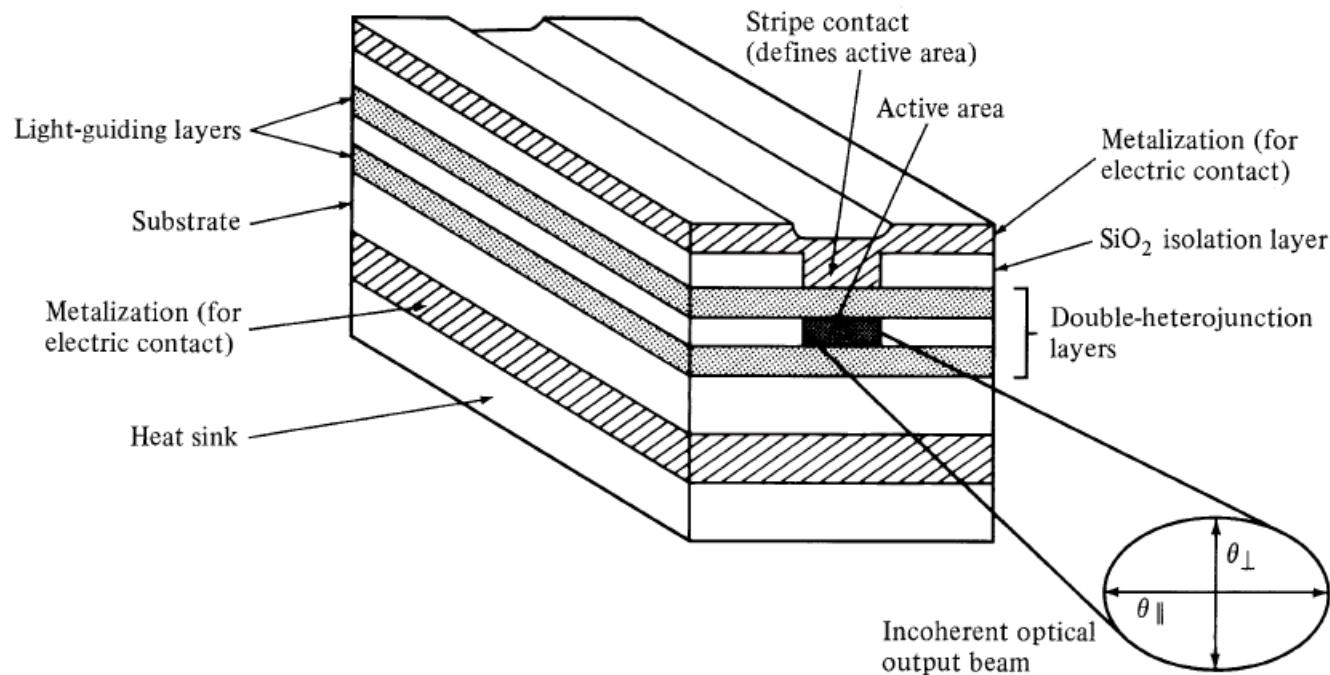
Surface-emitting LED



Nguồn LED

- Các loại LED
 - LED phát xạ cạnh

Edge-emitting LED



Nguồn LED

- Đặc tính của LED

 - Đặc tính P-I của LED:

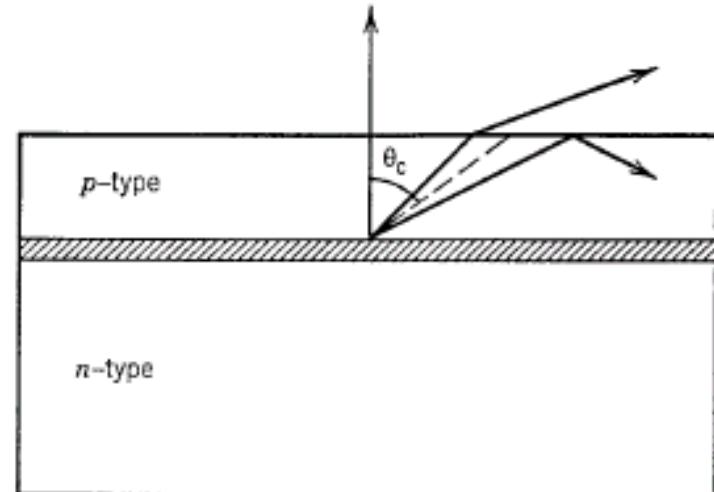
 - Tốc độ tái hợp bức xạ và không bức xạ bằng với tốc độ bơm hạt tải
 - Công suất quang: $P_{\text{int}} = \eta_{\text{int}}(\hbar\omega/q)I,$
 - Công suất phát xạ: $P_e = \eta_{\text{ext}}P_{\text{int}} = \eta_{\text{ext}}\eta_{\text{int}}(\hbar\omega/q)I.$
 - Hiệu suất lượng tử ngoài:

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\theta_c} T_f(\theta) (2\pi \sin \theta) d\theta,$$

 - Gần đúng với:

$$T_f(0) = 4n/(n+1)^2.$$

$$\rightarrow \eta_{\text{ext}} = n^{-1}(n+1)^{-2}.$$



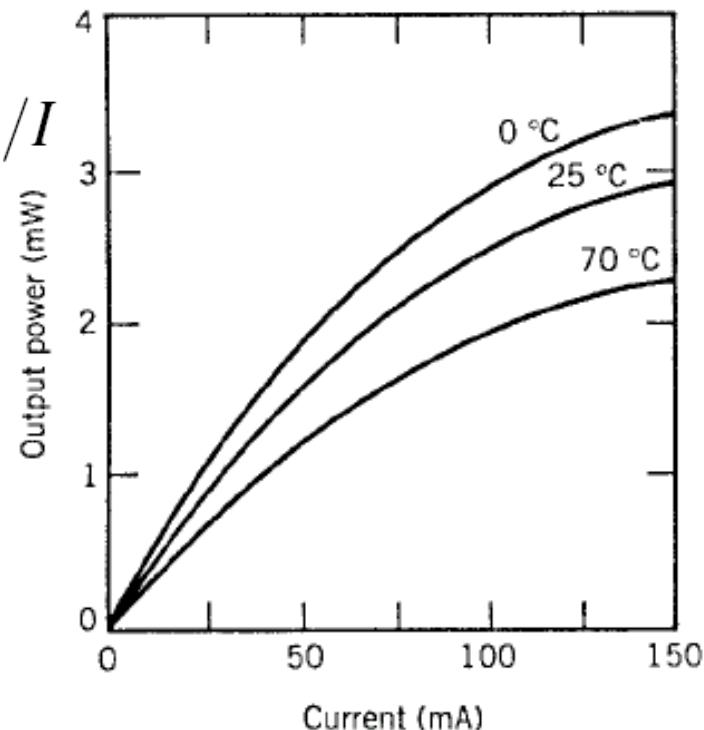
Nguồn LED

- Đặc tính của LED

 - Đặc tính P-I của LED:

 - Hiệu suất lượng tử tổng cộng: tỉ lệ công suất phát xạ với công suất điện đặt vào (hiệu suất chuyển đổi công suất)

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{ext}} \eta_{\text{int}} (\hbar\omega/qV_0).$$
 - Độ đáp ứng của LED: $R_{\text{LED}} = P_e/I$
 $\rightarrow R_{\text{LED}} = \eta_{\text{ext}} \eta_{\text{int}} (\hbar\omega/q).$
 - Đường đặc tính P-I: tỉ lệ tuyến tính theo I, bão hòa ở dòng bơm cao
 - Nhiệt độ tăng \rightarrow độ đáp ứng giảm



Nguồn LED

- Đặc tính của LED

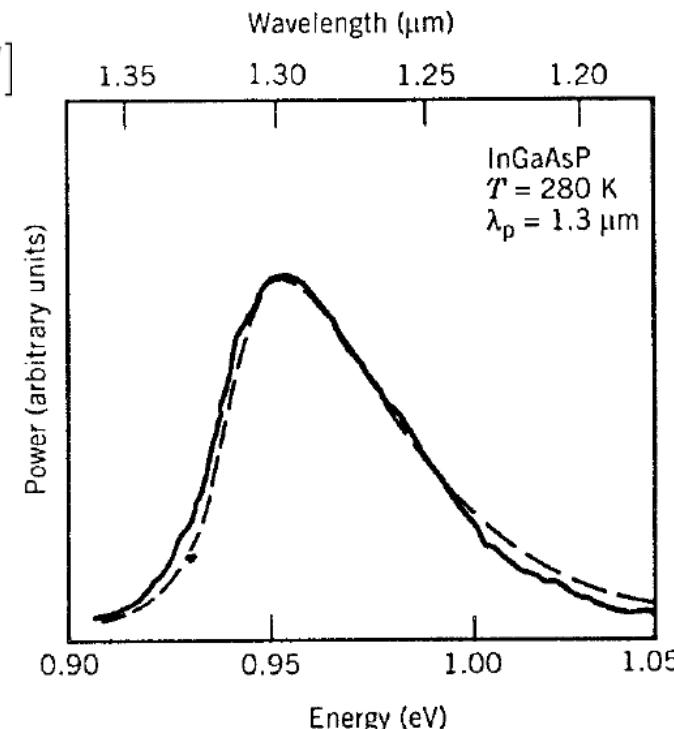
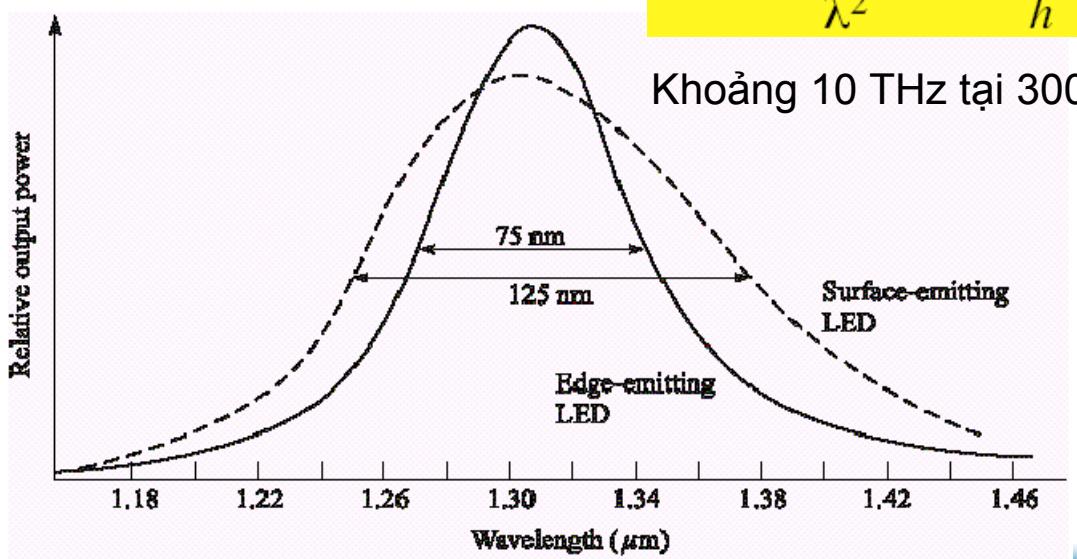
 - Đặc tính phổ của LED:

 - Phổ của LED liên quan đến phổ phát xạ tự phát
 - Gần đúng:

$$R_{\text{spon}}(\omega) = A_0(\hbar\omega - E_g)^{1/2} \exp[-(\hbar\omega - E_g)/k_B T]$$

Độ rộng phổ:

$$\Delta\nu = \Delta\lambda \frac{c}{\lambda^2} \approx 1.8 \frac{k_B T}{h}$$



Nguồn LED

- **Đặc tính của LED**

- Đặc tính điều chế của LED:

- Phương trình tốc độ của LED: $\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c}$,
- Giả sử điều chế dòng bơm dạng: $I(t) = I_b + I_m \exp(i\omega_m t)$,
- Mật độ hạt tải điều chế: $N(t) = N_b + N_m \exp(i\omega_m t)$,

trong đó:

$$N_b = \tau_c I_b / qV \quad N_m(\omega_m) = \frac{\tau_c I_m / qV}{1 + i\omega_m \tau_c}$$

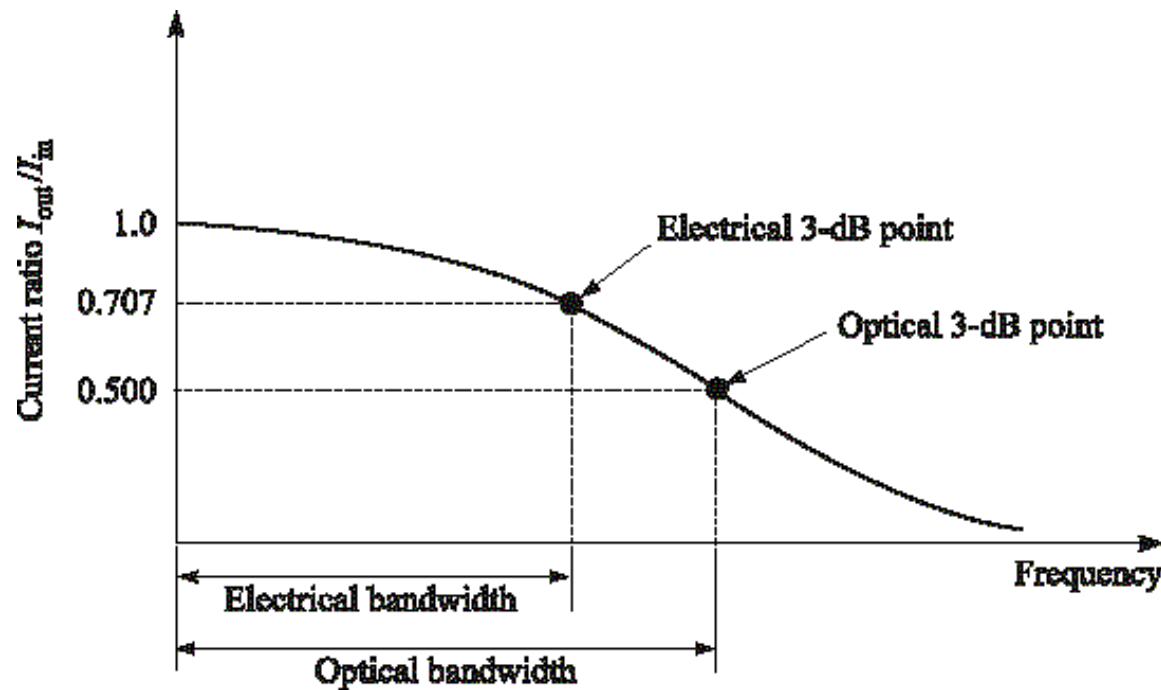
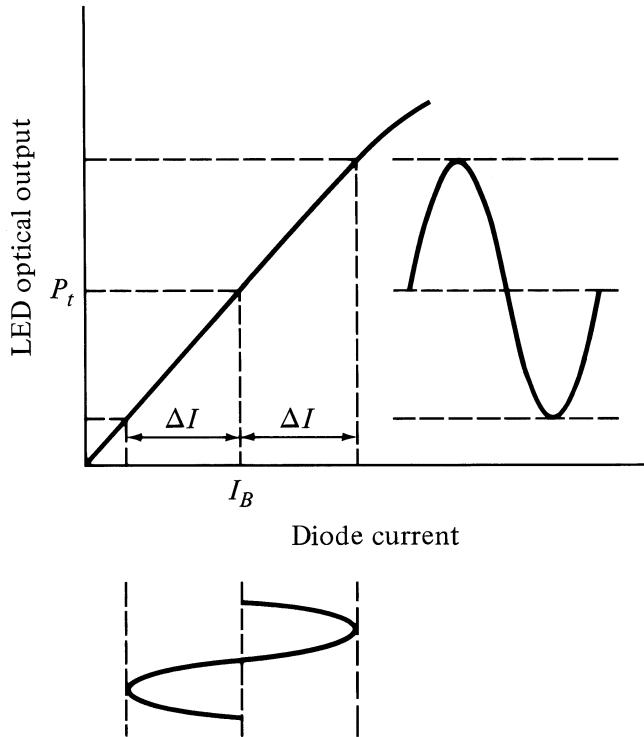
- Công suất điều biến $P_m \sim N_m \rightarrow$ Hàm truyền đạt của LED:

$$H(\omega_m) = \frac{N_m(\omega_m)}{N_m(0)} = \frac{1}{1 + i\omega_m \tau_c}$$

- Độ rộng băng tần điều biến 3 dB: $f_{3\text{dB}} = \sqrt{3}(2\pi\tau_c)^{-1}$
(Điển hình 50 – 150 MHz)

Nguồn LED

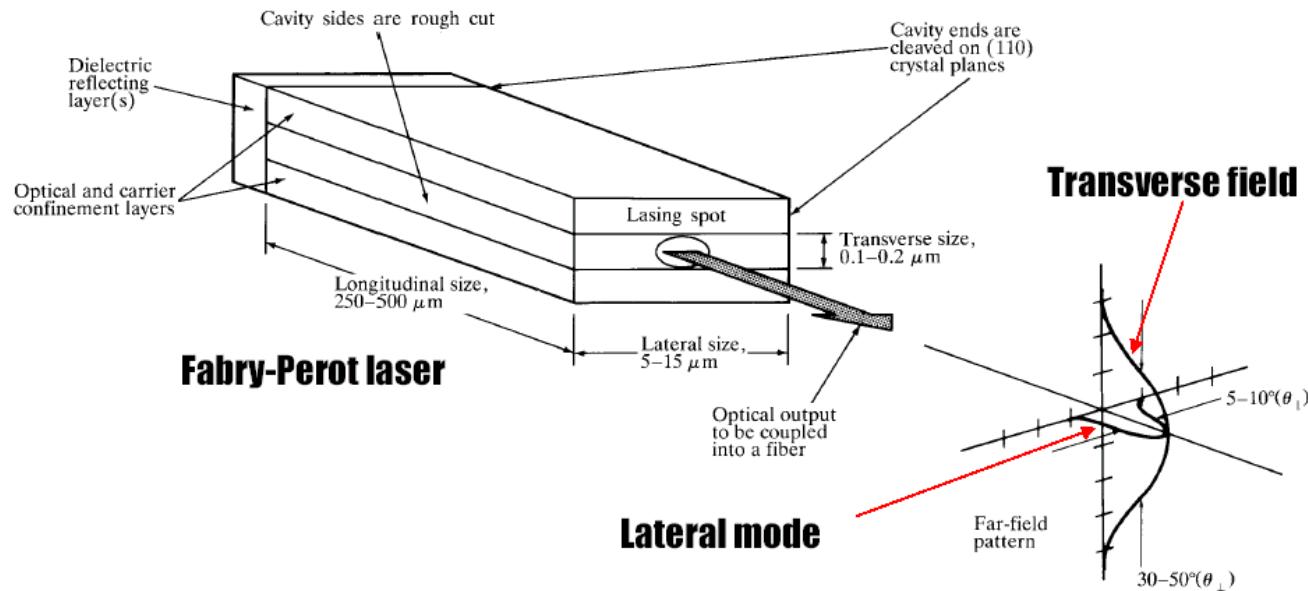
- Đặc tính của LED
 - Đặc tính điều chế của LED:



Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Laser: bộ cộng hưởng trong một môi trường tích cực (khuyếch đại)
- Dựa trên cơ chế phát xạ kích thích
- Laser bán dẫn (LD): cũng sử dụng cấu trúc dí thê kép



Laser is a cavity, and forms lateral, transverse, and longitudinal modes

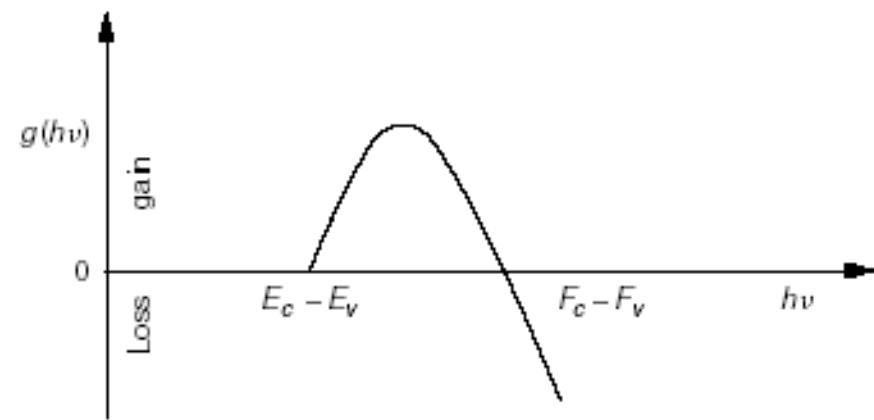
Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Phát xạ kích thích chiếm ưu thế khi thỏa mãn điều kiện đảo lộn mật độ
- Khi mật độ hạt tải trong lớp tích cực > một giá trị xác định \rightarrow xảy ra đảo lộn mật độ, vùng tích cực \rightarrow môi trường khuyếch đại quang
- Tín hiệu truyền trong môi trường $\sim \exp(gz)$
 g – hệ số khuyếch đại tỉ lệ với $R_{stim} - R_{abs}$

$$E_g < h\nu < eV_b$$

$$eV_b = F_c - F_v$$



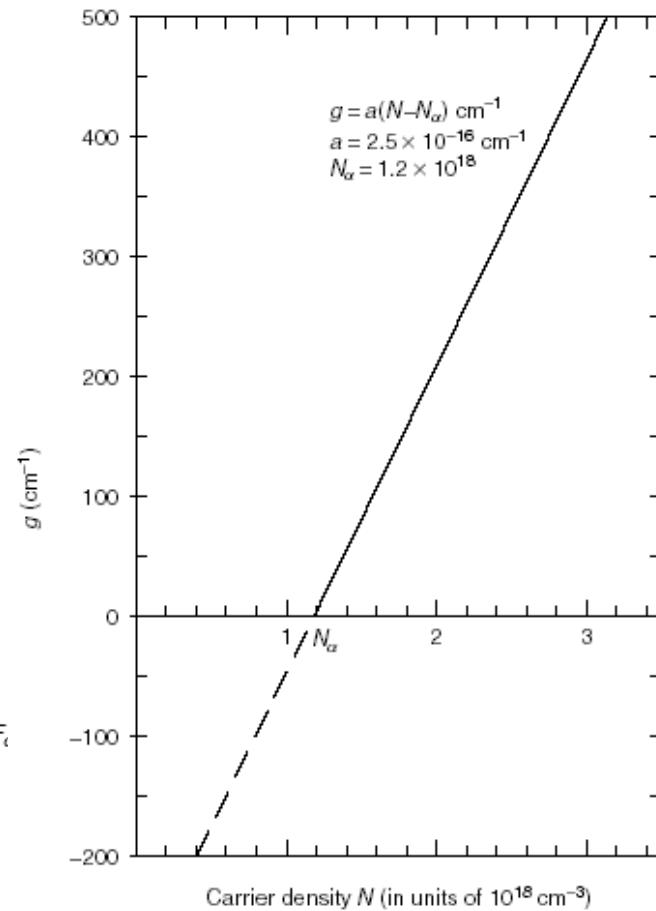
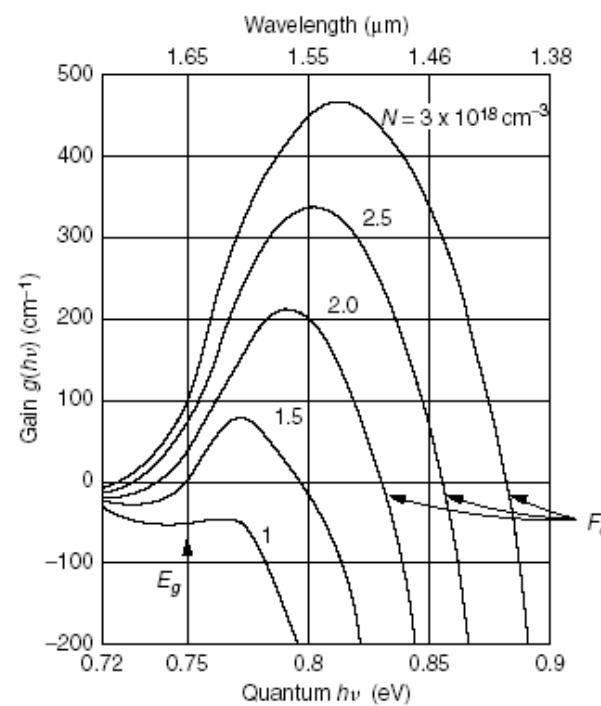
Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Phổ khuyếch đại phụ thuộc vào N
- Gần đúng sự phụ thuộc độ khuyếch đại định: $g_p(N) = \sigma_g(N - N_T)$,

σ_g – độ khuyếch đại vi sai hay mặt cắt khuyếch đại

N_T – mật độ hạt tải khi độ khuyếch đại = 0

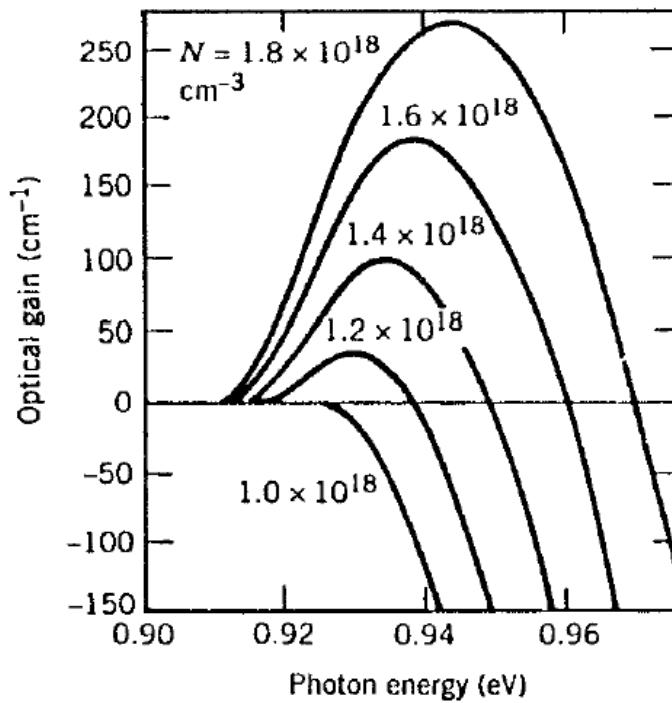


Nguồn Laser diode

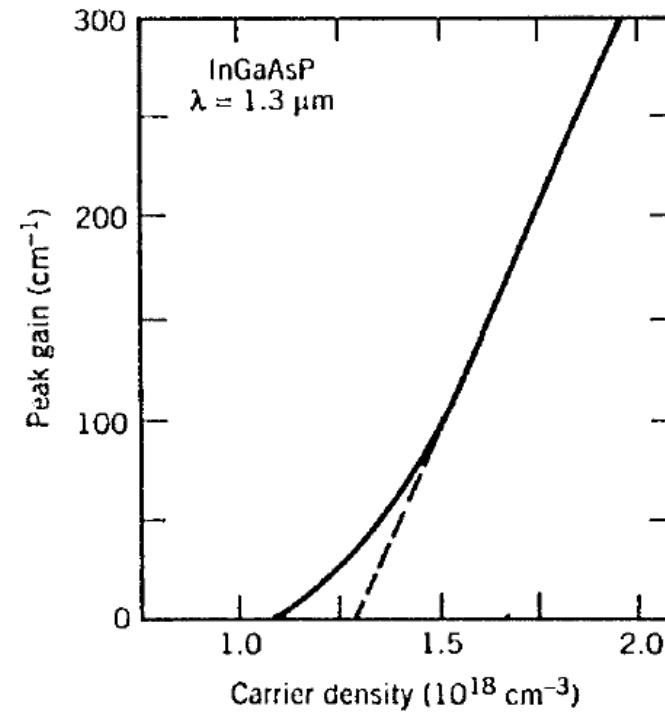
- Cấu tạo cơ bản LD

- Gần đúng khác tốt hơn:

$$g_p(N) = g_0[1 + \ln(N/N_0)], \quad N_0 = eN_T \approx 2.718N_T$$



(a)



(b)

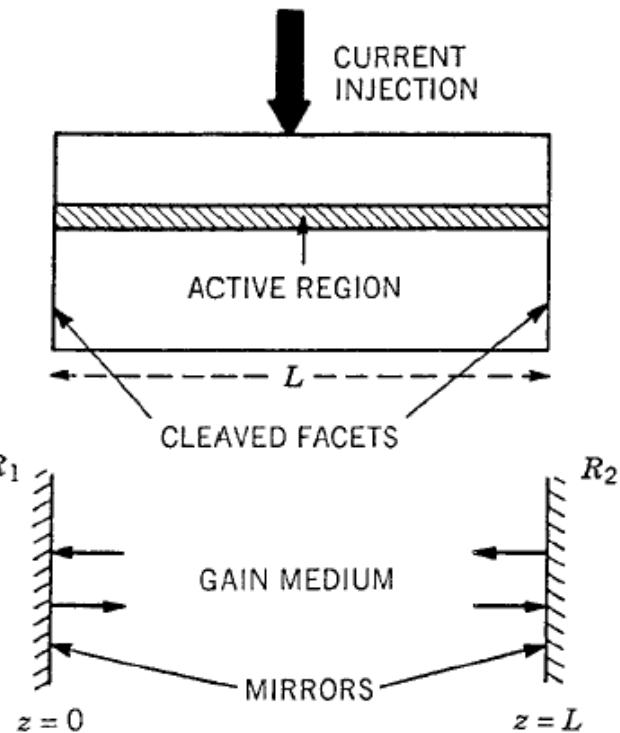


Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Quá trình hồi tiếp quang: thực hiện trong một hộp cộng hưởng hình thành bởi 2 gương phản xạ
- Độ phản xạ:

$$R_m = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$
- Nguồng laser: các photon sinh ra từ phát xạ kích thích bổ sung cho các photon bị mất đi do suy hao → khuyếch đại quang phải đủ lớn để bù suy hao hộp cộng hưởng → Hoạt động laser chỉ xảy ra khi dòng bơm > dòng ngưỡng



Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Biên độ tín hiệu quang sau mỗi lô trình:

$$E_0 \exp(gL) \sqrt{R_1 R_2} \exp(-\alpha_{\text{int}} L) \exp(2ikL) = E$$

E_0 – biên độ trước lô trình, L – chiều dài lớp tích cực, α_{int} – hệ số suy hao bên trong hộp cộng hưởng, k – số sóng, R – hệ số phản xạ

- Điều kiện để phát xạ laser: (1) Biên độ sau mỗi lô trình phải lớn hơn biên độ ban đầu, (2) pha sau mỗi lô trình phải không đổi.
 - Tại ngưỡng:

$$E_0 \exp(gL) \sqrt{R_1 R_2} \exp(-\alpha_{\text{int}} L) \exp(2ikL) = E_0.$$

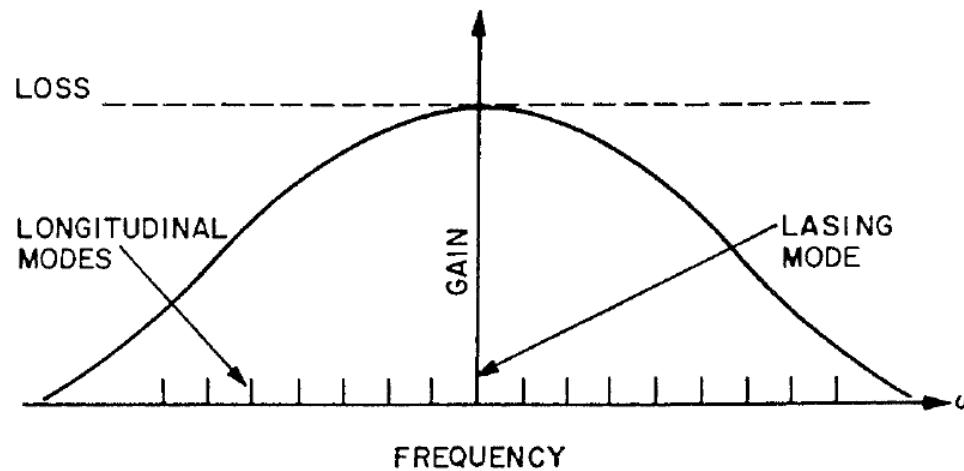
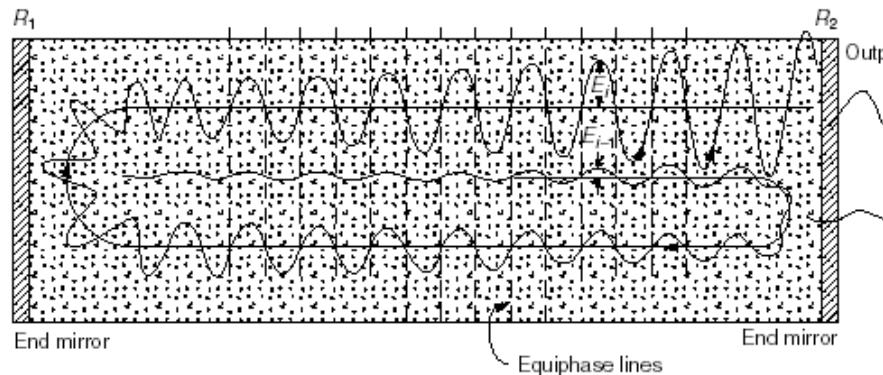
- Điều kiện về biên độ:

$$g = \alpha_{\text{int}} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{mir}} = \alpha_{\text{cav}},$$

Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Chú ý: $g = \Gamma g_m$, Γ - hệ số giam hãm của vùng tích cực (< 0.4)



Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Điều kiện về pha:

$$2kL = 2m\pi \quad \text{or} \quad v = v_m = mc/2nL,$$

m-số nguyên \Rightarrow các tần số của các mode dọc phát xạ laser.

- Giả sử phổ khuyếch đại dạng Gauss:

$$g(\lambda) = g(0) \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$m = \frac{L2n}{\lambda} = \frac{2Ln}{c} v_m \quad m-1 = \frac{L2n}{\lambda} = \frac{2Ln}{c} v_{m-1}$$

$$\Delta v = v_m - v_{m-1} = \frac{c}{2Ln} \quad \text{Frequency difference of two modes}$$

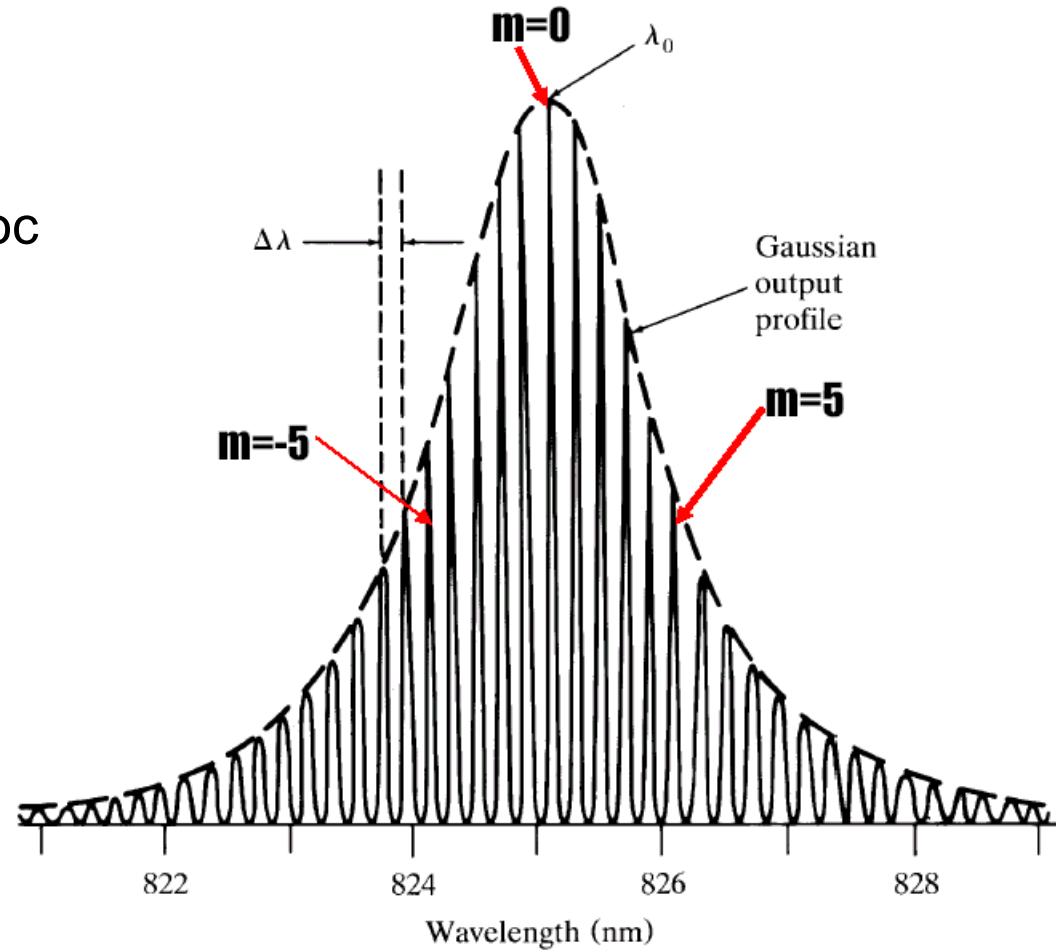
$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln}$$



Nguồn Laser diode

- Cấu tạo cơ bản LD

- Do độ rộng phổ laser
 - tồn tại nhiều mode dọc
 - Laser đa mode



Multimode FP laser spectrum

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Phương trình tốc độ:

$$\frac{dN_c}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_c}{\tau_c} - GN_{ph}$$

$$\frac{dN_{ph}}{dt} = GN_{ph} + R_{sp} - \frac{N_{ph}}{\tau_{ph}}$$

Trong đó: $G = \Gamma \cdot v_g \cdot g_m = G_N (N_c - N_T)$

$$G_N = \Gamma \cdot v_g \cdot \sigma_g$$

$$R_{sp} = n_{sp} \cdot G \text{ hoặc } R_{sp} = \gamma \cdot N_c / \tau_c$$

$$\tau_p^{-1} = v_g \alpha_{cav} = v_g (\alpha_{mir} + \alpha_{int})$$

Chú thích:

N_c – Mật độ hạt tải

N_{ph} – Mật độ photon

V – Thể tích vùng tích cực

τ_c - Thời gian sống của hạt tải

τ_{ph} – Thời gian sống của photon

R_{sp} – Tốc độ phát xạ tự phát

γ - Tỉ phần tái hợp phát xạ tự phát

v_g – Vận tốc nhóm

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính phát xạ P-I của LD:

- Xét trạng thái tĩnh: $\frac{dN_c}{dt} = \frac{dN_{ph}}{dt} = 0$

$$\rightarrow \frac{I}{qV} - \frac{N_c}{\tau_c} - G_N(N_c - N_T)N_{ph} = 0$$

$$G_N(N_c - N_T)N_{ph} + R_{sp} - \frac{N_{ph}}{\tau_{ph}} = 0$$

- Trước khi phát xạ laser: $N_{ph} \approx 0$

$$\rightarrow \frac{I}{qV} - \frac{N_c}{\tau_c} = 0 \quad \rightarrow \quad N_c = \frac{I}{qV} \tau_c$$

Mật độ hạt tải tỉ lệ với dòng bơm

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính phát xạ P-I của LD:
- Khi phát xạ laser bắt đầu: $N_{ph} \neq 0$ $R_{sp} \approx 0$

→ Ta có: $G_N(N_c - N_T)N_{ph} - \frac{N_{ph}}{\tau_{ph}} = 0$

$$\rightarrow N_{ph} \left[G_N(N_c - N_T) - \frac{1}{\tau_{ph}} \right] = 0 \rightarrow N_c = N_T + \frac{1}{G_N \tau_p}$$

N_c không phụ thuộc I → đạt ngưỡng $N_c^{th} = N_T + \frac{1}{G_N \tau_p}$
 Tương ứng, dòng ngưỡng được xác định:

$$\frac{I_{th}}{qV} = \frac{N_c^{th}}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_c} \left[N_T + \frac{1}{G_N \tau_p} \right]$$

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

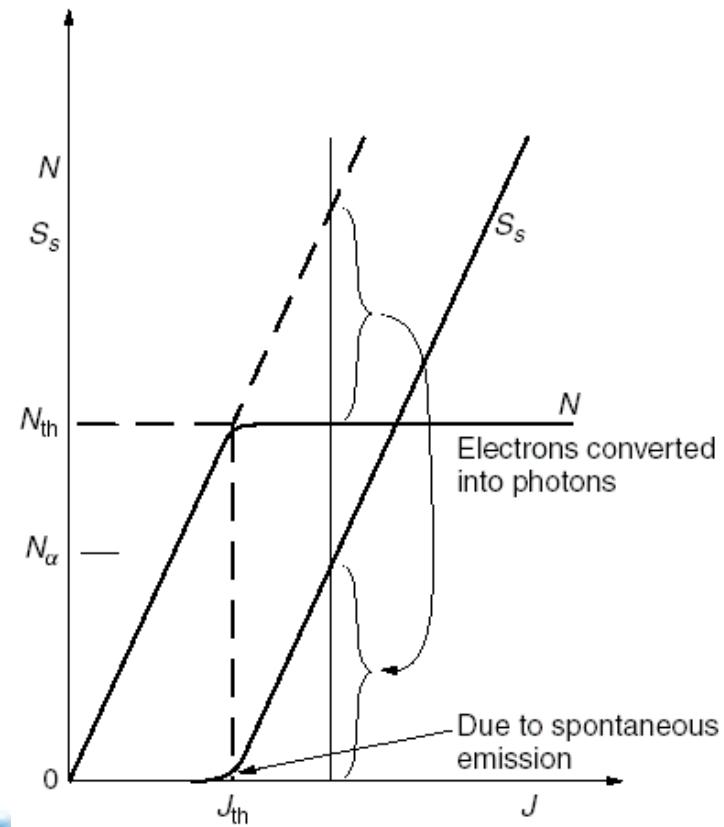
- Đặc tính phát xạ P-I của LD:
- Công suất phát xạ laser: xác định từ trạng thái tĩnh

$$\frac{I}{qV} - \frac{N_c}{\tau_c} = \frac{N_{ph}}{\tau_p} \rightarrow \frac{I}{qV} = \frac{N_{ph}}{\tau_p} + \frac{N_c}{\tau_c}$$

Khi phát xạ laser bắt đầu, N_c ngừng tăng và ở giá trị ngưỡng $N_c = N_c^{th}$

Mật độ photon được xác định:

$$N_{ph} = \frac{\tau_p}{qV} (I - I_{th})$$



Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính phát xạ P-I của LD:
- Công suất phát xạ laser:

$$P_e = h\nu \left(\frac{1}{2} v_g \alpha_{mir} \right) V N_{ph} \rightarrow P_e = \frac{h\nu}{2q} \frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}} (I - I_{th})$$

đối với laser $\eta_{int} \approx 100\%$

Độ dốc đường đặc tính P-I (Khi $I > I_{th}$):

$$\frac{dP_e}{dI} = \frac{h\nu}{2q} \eta_d \quad \eta_d = \frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}}. \text{ Hiệu suất lượng tử vi sai}$$

Hiệu suất lượng tử ngoài: $\eta_{ext} = \frac{\text{photon-emission rate}}{\text{electron-injection rate}} = \frac{2P_e/\hbar\omega}{I/q} = \frac{2q}{\hbar\omega} \frac{P_e}{I}$.
hay $\eta_{ext} = \eta_d (1 - I_{th}/I)$.

Hiệu suất lượng tử tổng: $\eta_{tot} = \frac{2P_e}{IV_o} = \frac{h\nu}{qV_o} \eta_{ext} \approx \frac{E_g}{qV_o} \eta_{ext}$

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính phát xạ P-I của LD:
- Ảnh hưởng của nhiệt độ:

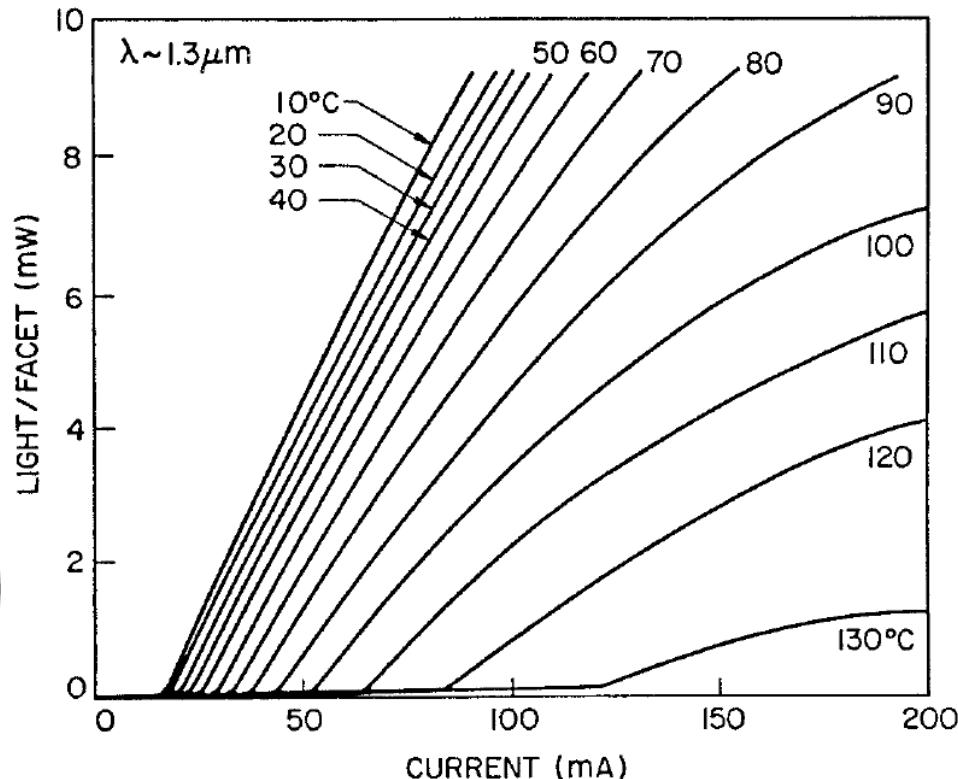
$$I_{th} = I_{th0} e^{T/T_0}$$

$$\eta = \eta_0 e^{-T/T'_0}$$

Thăng giáng công suất phát xạ theo nhiệt độ:

$$\frac{P(T + \Delta T)}{P(T)} = e^{-\Delta T/T'_0} \left(1 + \frac{1 - e^{\Delta T/T_0}}{m - 1} \right)$$

trong đó $m = \frac{I}{I_{th0} e^{T/T_0}} = \frac{I}{I_{th}}$



Nguồn Laser diode

- **Đặc tính của LD**

- Đặc tính điều chế của LD:
- Xét trạng thái động (phụ thuộc thời gian):

Phát xạ laser không xảy ra cho tới khi N_c đạt ngưỡng \rightarrow Có trễ bắt

$$\frac{dN_c}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_c}{\tau_c}$$

Xác định trễ bắt:

$$t_d = \int_0^{N_c^{th}} \frac{dN_c}{\frac{I}{qV} - \frac{N_c}{\tau_c}} \quad \text{hay} \quad t_d = \tau_c \ln \left(\frac{I}{I - I_{th}} \right)$$

Khi LD được phân cực tại $I = I_b \rightarrow t_d = \tau_c \ln \left(\frac{I - I_b}{I - I_{th}} \right)$

Nguồn Laser diode

- **Đặc tính của LD**

- Đặc tính điều chế của LD:
- Dao động hồi phục:

Khi laser bật có dao động chuyển tiếp dạng sin tần dần → Dao động hồi phục

Khi dòng bơm được đưa vào LD:

- Mật độ điện tử N_c bắt đầu tăng theo I
- Khi N_c đạt tới N_c^{th} , N_{ph} bắt đầu đáp ứng, nó mất thời gian để tích lũy trong hộp cộng hưởng. Trong thời gian tích lũy, N_c tăng quá N_c^{th} .
- Vì N_c tăng quá N_c^{th} , tốc độ tăng N_{ph} được gia tốc. Khi N_{ph} tăng vượt quá N_{ph}^s , I không bơm kịp với sự tiêu tốn $N_c \rightarrow N_c$ bắt đầu giảm. Khi N_c vẫn $> N_c^{th}$, N_{ph} vẫn tiếp tục tăng nhưng ở tốc độ chậm hơn. Tuy nhiên khi N_c giảm $< N_c^{th}$, N_{ph} bắt đầu giảm

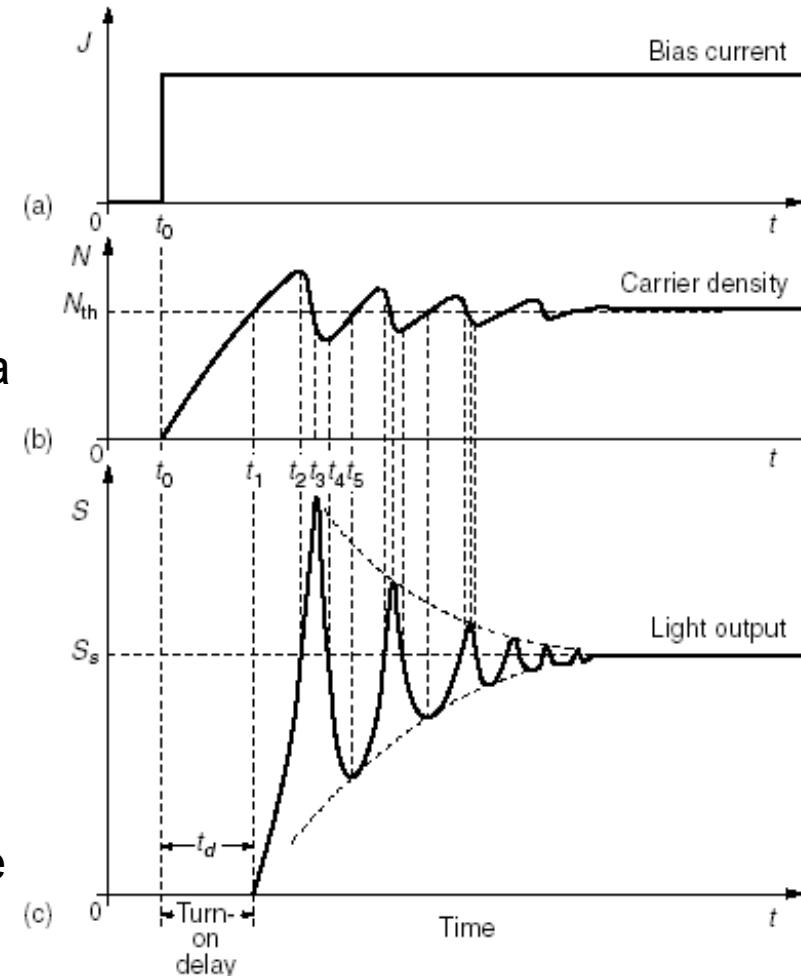
Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính điều chế của LD:
- Dao động hồi phục:

Khi dòng bơm được đưa vào LD:

- Khi N_{ph} giảm $< N_{ph}^s$, N_c bắt đầu tăng vì có ít điện tử hơn tham gia phát xạ kích thích.
- Khi N_c đạt tới N_c^{th} , N_{ph} bắt đầu tăng và chu kỳ dao động thứ hai bắt đầu.
- Trong chu kỳ thứ 2, N_{ph} không bắt đầu từ 0 và mất ít thời gian để đạt trạng thái tĩnh hơn chu kỳ đầu $\rightarrow N_c$ mất ít thời gian hơn để vượt N_c^{th} , \rightarrow biên độ dao động nhỏ hơn chu kỳ đầu



Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính điều chế của LD:
- Điều biến tín hiệu:

Đáp ứng LD đối với điều biến dòng có thể thu được từ phương trình tốc độ với 2 biến đổi:

- Độ khuyếch đại: $G = G_N(N - N_0)(1 - \varepsilon_{NL}P)$,

ε_{NL} - tham số khuyếch đại phi tuyền ($\sim 10^{-7}$)

- Biến đổi pha quang: $\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c \left[G_N(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right]$

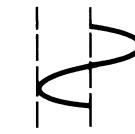
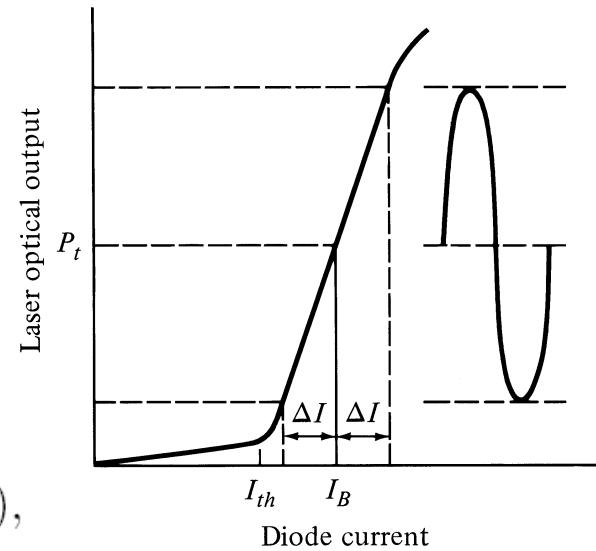
β_c – hệ số tăng cường độ rộng phổ ($\sim 4-8$)

Dòng điều biến giả sử có dạng: $I(t) = I_b + I_m \exp(j\omega_m t)$

Giải phương trình tốc độ \rightarrow Số lượng hạt tải và photon điều biến:

$$P(t) = P_b + p_m \exp(j\omega_m t)$$

$$N_c(t) = N_c^b + N_m \exp(j\omega_m t)$$



Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính điều chế của LD:
- Điều biến tín hiệu nhỏ:

Sự biến đổi công suất và mật độ hạt tải quanh giá trị tĩnh được cho là nhỏ: $|N_m| \ll N_c^b, |p_m| \ll P_b$ $I_m \ll I_b - I_{th}$

Giải các ptr tốc độ được tuvến tính hóa. công suất điều biến phụ thuộc tần số: $p_m(\omega_m) = \frac{P_b G_N I_m / q}{(\Omega_R + \omega_m - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega_m + i\Gamma_R)},$

trong đó tần số và tốc độ tắt dần của dao động hồi phục được xác định $\Omega_R = [G G_N P_b - (\Gamma_P - \Gamma_N)^2 / 4]^{1/2}, \quad \Gamma_R = (\Gamma_P + \Gamma_N) / 2,$
 $\Gamma_P = R_{sp} / P_b + \epsilon_{NL} G P_b, \quad \Gamma_N = \tau_c^{-1} + G_N P_b.$

Hàm truyền của LD:

$$H(\omega_m) = \frac{p_m(\omega_m)}{p_m(0)} = \frac{\Omega_R^2 + \Gamma_R^2}{(\Omega_R + \omega_m - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega_m + i\Gamma_R)}.$$

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

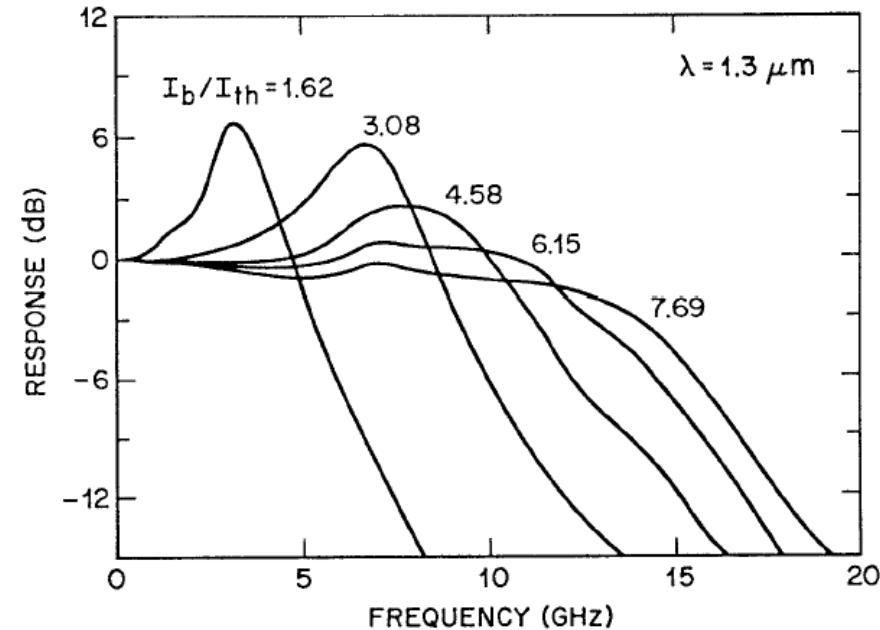
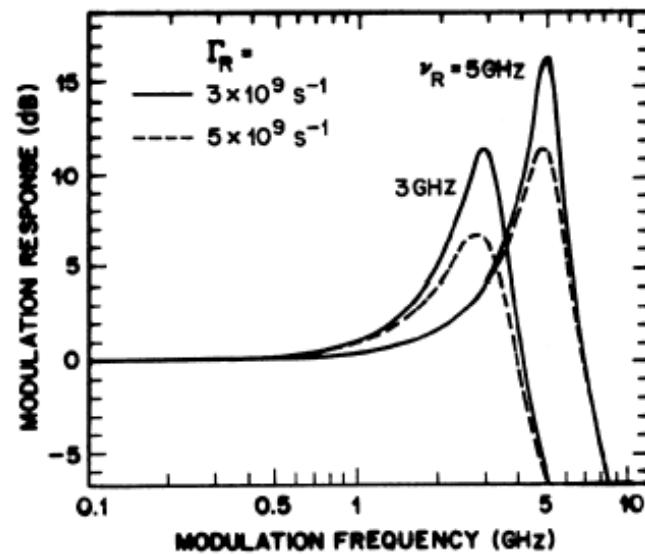
- Đặc tính điều chế của LD:

- Điều biến tín hiệu nhỏ:

Đáp ứng điều chế gần phẳng tại $\omega_m \ll \Omega_R$

Có đỉnh tại $\omega_m = \Omega_R$

Giảm nhanh tại $\omega_m \gg \Omega_R$



Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính điều chế của LD:

- Điều biến tín hiệu nhỏ:

Độ rộng băng tần điều biến 3dB:

$$f_{3\text{ dB}} = \frac{1}{2\pi} \left[\Omega_R^2 + \Gamma_R^2 + 2(\Omega_R^4 + \Omega_R^2 \Gamma_R^2 + \Gamma_R^4)^{1/2} \right]^{1/2}.$$

Hầu hết các LD có $\Gamma_R \ll \Omega_R \rightarrow$ gần đúng f3dB

$$f_{3\text{ dB}} \approx \frac{\sqrt{3}\Omega_R}{2\pi} \approx \left(\frac{3G_N P_b}{4\pi^2 \tau_p} \right)^{1/2} = \left[\frac{3G_N}{4\pi^2 q} (I_b - I_{\text{th}}) \right]^{1/2},$$

$$\text{trong đó } G \text{ thay bằng } 1/\tau_p \text{ và } \Omega_R \approx \left(\frac{G_N P_b}{\tau_p} \right)^{1/2} = \left[\frac{G_N}{qV} (I_b - I_{th}) \right]^{1/2}$$

Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính điều chế của LD:
- Điều biến tín hiệu lớn:

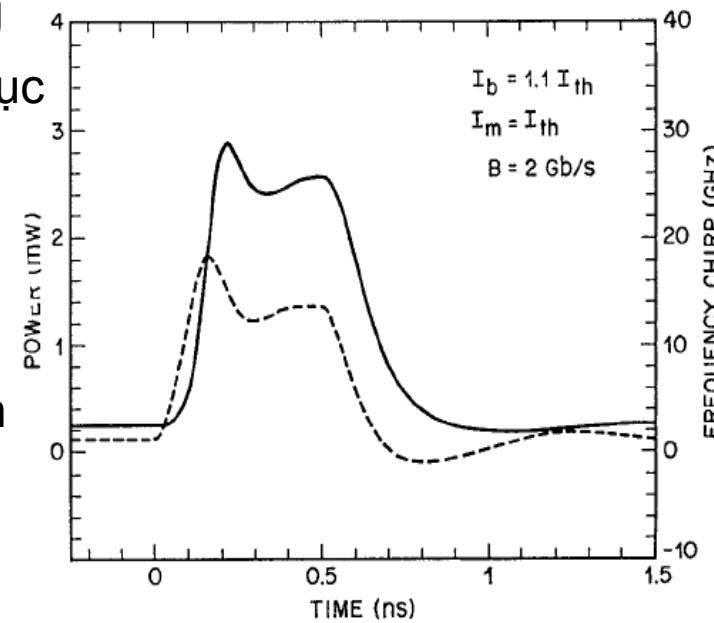
Hoạt động tín hiệu lớn: $I_m \gg I_b - I_{th} \Rightarrow$ Các phtr tốc độ phải được giải bằng phương pháp số \rightarrow

- ✓ Xung quang có thời gian lên và xuống
- ✓ Có đỉnh đầu xung và dao động hồi phục

Hiện tượng chirp tần:

$$\delta v(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\beta_c}{4\pi} \left[G_N(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right]$$

- ✓ Tần số tại đầu xung dịch về phía xanh
 - ✓ Tần số tại cuối xung dịch về phía đỏ
- \rightarrow Phổ tín hiệu bị mở rộng



Nguồn Laser diode

- **Đặc tính của LD**

- Đặc tính nhiễu của LD:
- Các nguồn nhiễu chính từ LD:
 - Nhiễu vì sự hồi tiếp quang bên ngoài
 - Nhiễu liên quan đến dao động hồi phục
 - Nhiễu vì nhảy mode
 - Nhiễu phần mode
 - Nhiễu vì phát xạ tự phát
 - Nhiễu vì thăng giáng do nhiệt độ và dòng bơm
- Nhiễu cường độ tương đối RIN
- Có 2 cơ chế sinh nhiễu cơ bản:
 - ✓ Phát xạ tự phát (chiếm ưu thế)
 - ✓ Nhiễu nổ (tái hợp điện tử - lỗ trống)



Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính nhiễu của LD:
- Nhiễu cường độ tương đối RIN

$$E_{\text{out}} = E_{\text{stimulated}} + \text{noise}$$

→ Intensity fluctuation + phase fluctuation /time

Intensity noise

random /time

Spectral linewidth

Phương trình tốc độ có tính đến nhiễu:

$$\frac{dP}{dt} = \left(G - \frac{1}{\tau_p} \right) P + R_{\text{sp}} + F_P(t),$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_c} - GP + F_N(t), \quad \text{F Langevin force}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c \left[G_N(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right] + F_\phi(t),$$

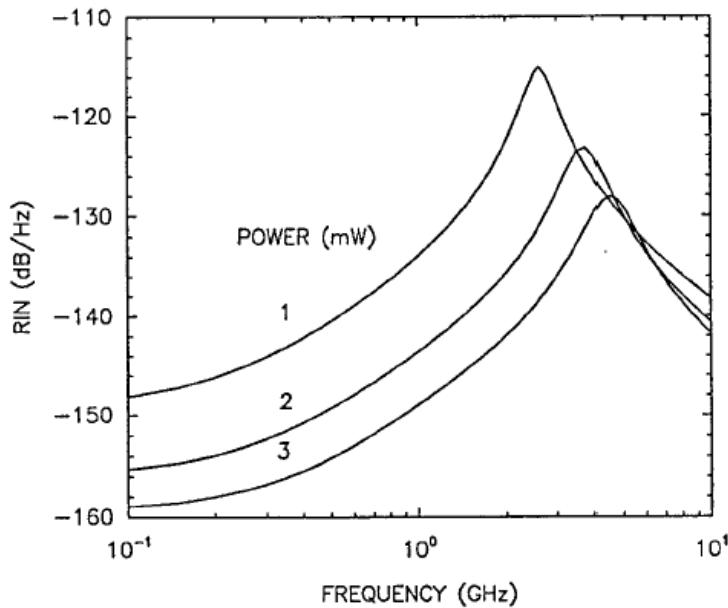
Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính nhiễu của LD:
- Nhiễu cường độ tương đối RIN

Hàm tự tương quan về cường độ: $C_{pp}(\tau) = \langle \delta P(t) \delta P(t + \tau) \rangle / \bar{P}^2$,

$\delta P(t) = P(t) - \langle P(t) \rangle$ Fluctuation in photon number



$$RIN(\omega) = F[C_{pp}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} C_{pp}(\tau) \exp(j\omega\tau) d\tau$$

$$RIN(\omega) = \frac{2R_{sp}\{(\Gamma_N^2 + \omega^2) + G_N\bar{P}[G_N\bar{P}(1 + N/\tau_c R_{sp}\bar{P}) - 2\Gamma_N]\}}{\bar{P}[(\Omega_R - \omega)^2 + \Gamma_R^2][(\Omega_R + \omega)^2 + \Gamma_R^2]},$$



Nguồn Laser diode

- Đặc tính của LD

- Đặc tính nhiễu của LD:
- Độ rộng phổ

The field spectrum $S(\omega) \sim$ autocorrelation function $\Gamma_{EE}(\tau)$

$$S(\omega) = F[\Gamma_{EE}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_{EE}(\tau) \exp(j(\omega - \omega_0)\tau) d\tau$$

$$\Gamma_{EE}(\tau) = \langle E^*(t)E(t + \tau) \rangle$$

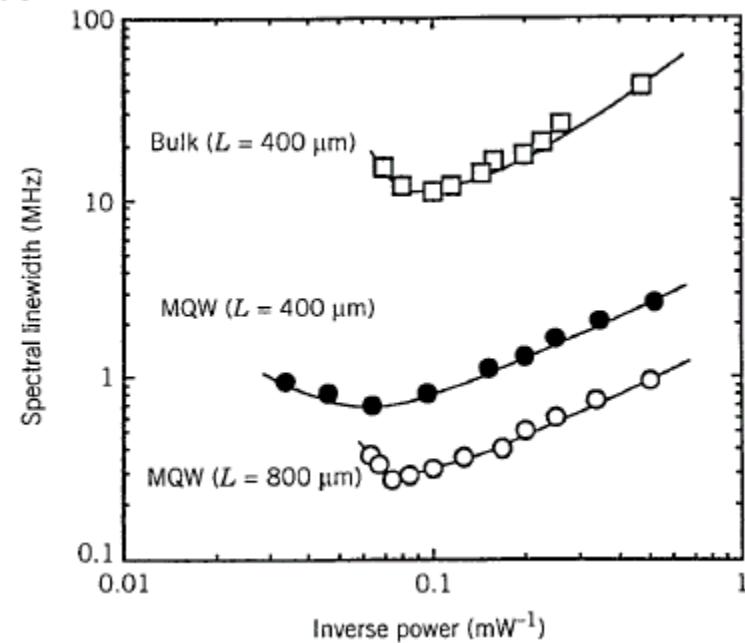
suppose $E(t) = \sqrt{P} \exp(-j\phi(t))$

Intensity fluctuation ignored

$$\Gamma_{EE}(\tau) = \langle \exp(-j\Delta\phi(\tau)) \rangle$$

$\Delta\phi(\tau)$ Gaussian random variable
Phase fluctuation

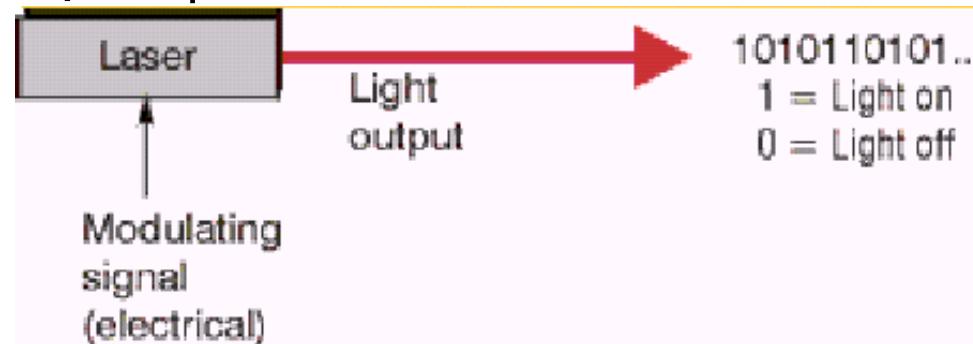
$$\Delta\nu = \frac{R_{sp}(1 + \zeta^2)}{4\pi \langle P \rangle}$$



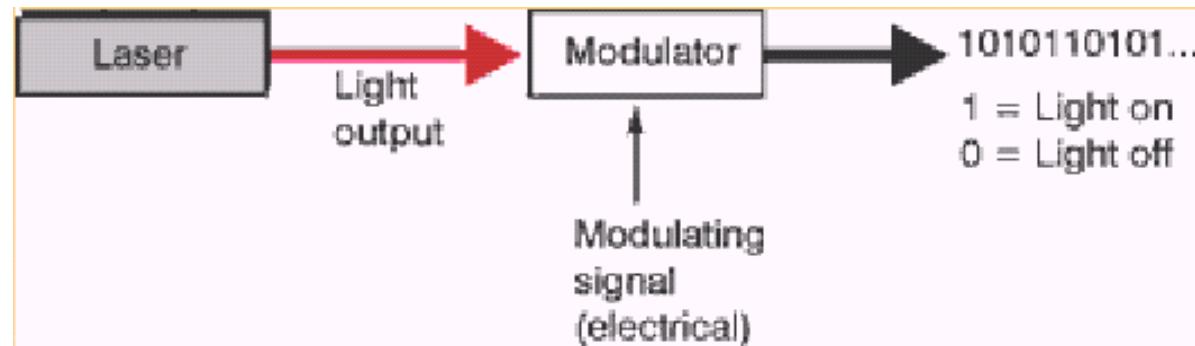
Thiết kế bộ phát quang

- **Bộ phát quang**

- Có 2 loại:
 - Điều biến trực tiếp:



- Điều biến ngoài:



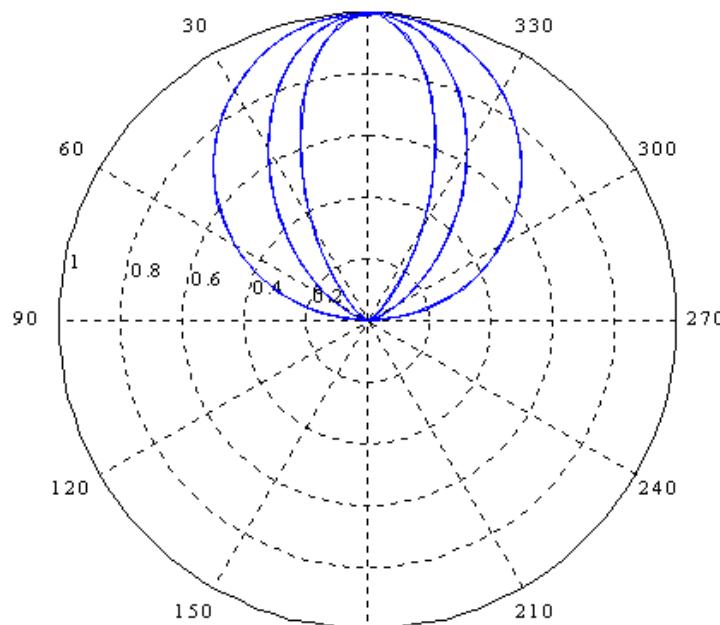
Thiết kế bộ phát quang

- Ghép nối nguồn quang – sợi

- Mẫu phát xạ:

 - Nguồn Lambert: $B(\theta, \phi) = B_0 \cos \theta$
 - Nguồn Lambert biến đổi: $B(\theta, \phi) = B_0 \cos^m \theta$
 - Mẫu phát xạ không đối xứng:

$$B(\theta, \phi) = \frac{1}{\left(\frac{\sin^2 \phi}{B_0 \cos^T \theta} + \frac{\cos^2 \phi}{B_0 \cos^L \theta} \right)}$$



Thiết kế bộ phát quang

- Ghép nối nguồn quang – sợi

- Hiệu suất ghép:
- Công suất ghép vào sợi:

$$P_f = \int_0^{r_u} \int_0^{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} B(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right) d\phi_s r dr$$

Khi nguồn nhỏ hơn lõi sợi: $r_u = r_s$

Khi nguồn lớn hơn lõi sợi: $r_u = a$

Giả sử nguồn Lambert:

$$P_f = \pi B_0 \int_0^{r_u} \int_0^{2\pi} (NA)^2 d\phi_s r dr$$

Thiết kế bộ phát quang

- Ghép nối nguồn quang – sợi

- Hiệu suất ghép:
- Đối với sợi SI: $P_f = \pi^2 B_0 N A^2 r_s^2$ khi $r_s < a$

Công suất phát xạ từ nguồn: $P_s = \pi^2 B_0 r_s^2$

Hiệu suất ghép: $\eta = N A^2$ khi $r_s < a$

Tương tự:

$$\eta = N A^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \text{ khi } r_s > a$$

- Đối với sợi GI:

$$P_f = \pi B_0 \int_0^{r_u} \int_0^{2\pi} (N A_{max})^2 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a} \right)^g} \right)^2 d\phi_s r dr$$

Thiết kế bộ phát quang

- Ghép nối nguồn quang – sợi

 - Hiệu suất ghép:

 - Đổi với sợi GI:

Hiệu suất ghép: $\eta = NA_{max}^2 \left(1 - \frac{2}{g+2} \left(\frac{r_s}{a} \right)^g \right)$ khi $r_s < a$

Tương tự:

$$\eta = NA_{max}^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \left(\frac{g}{g+2} \right) \text{ khi } r_s > a$$

 - Nguồn Lambert biến đổi: $\eta = \left(\frac{m+1}{2} \right) NA^2$ khi $r_s < a$

 - Ảnh hưởng của phản xạ:

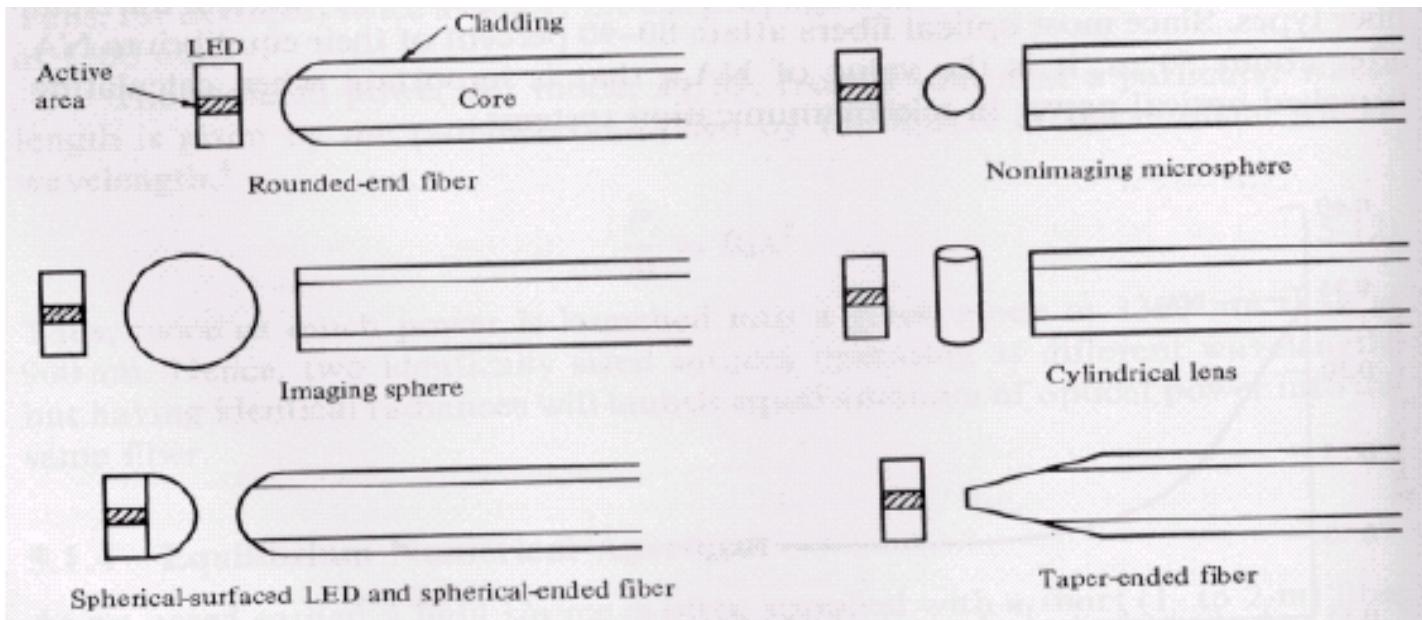
 - Sử dụng chất phôi hợp chiết suất
 - Cắt vát đầu sợi



Thiết kế bộ phát quang

- Ghép nối nguồn quang – sợi

- Nâng cao hiệu suất ghép bằng vi thấu kính:

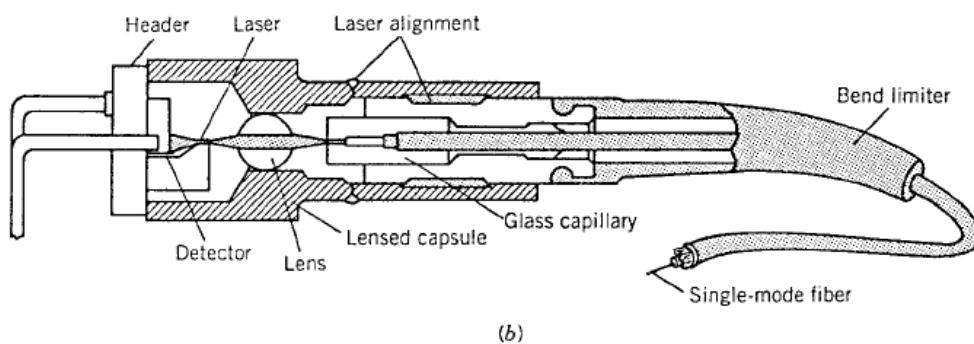
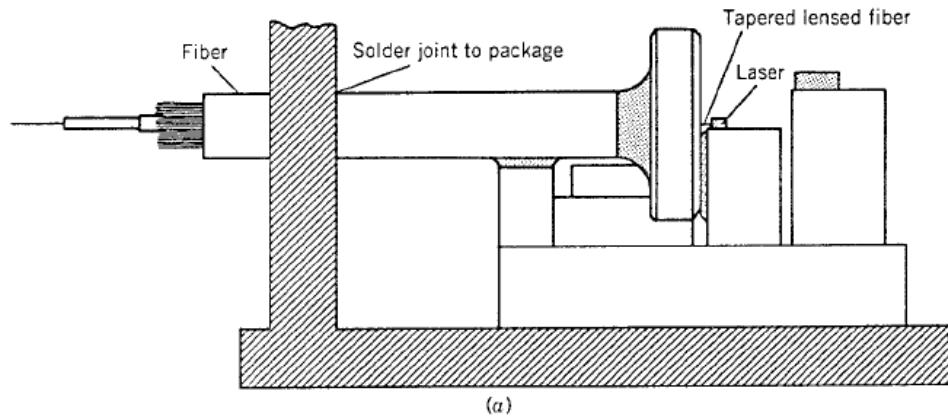


- Đối với LED:
 - ✓ SLED ~ 1%
 - ✓ ELED ~ 10 %

Thiết kế bộ phát quang

- Ghép nối nguồn quang – sợi

- Nâng cao hiệu suất ghép bằng vi thấu kính:
- Đối với LD: sử dụng vi thấu kính ~ 40 – 90 %



Thiết kế bộ phát quang

- Mạch kích thích nguồn quang

- Mạch kích thích sử dụng LED:

- Đối với tín hiệu analog:

Sử dụng transistor lưỡng cực, LED được kết nối với cực c hoặc cực e với một điện trở hạn chế dòng. Tín hiệu điều biến đưa vào cực b

Dòng điều biến: $i(t) = I_b + I_m \cdot \cos \omega t \Rightarrow P = P_b + P_m \cdot \cos \omega t$

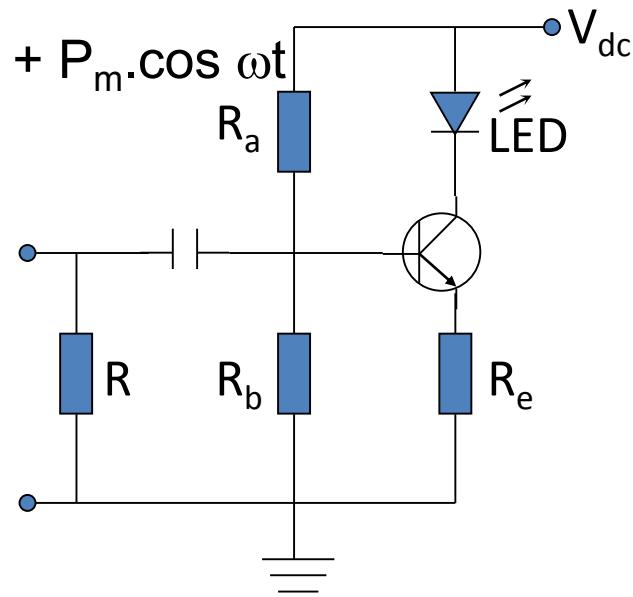
$m = I_m / I_b$ – độ sâu điều biến

$\Rightarrow m' = P_m / P_b$ – độ sâu điều biến quang

- Theo mạch: $I_b = \frac{\beta(V_1 - V_0)}{R_1 + (1 + \beta)R_e}$

$$R_1 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \quad V_1 = \frac{R_a}{R_a + R_b} V_{dc}$$

$$V_{dc} = i_c R_e + v_{CE} + v_d$$



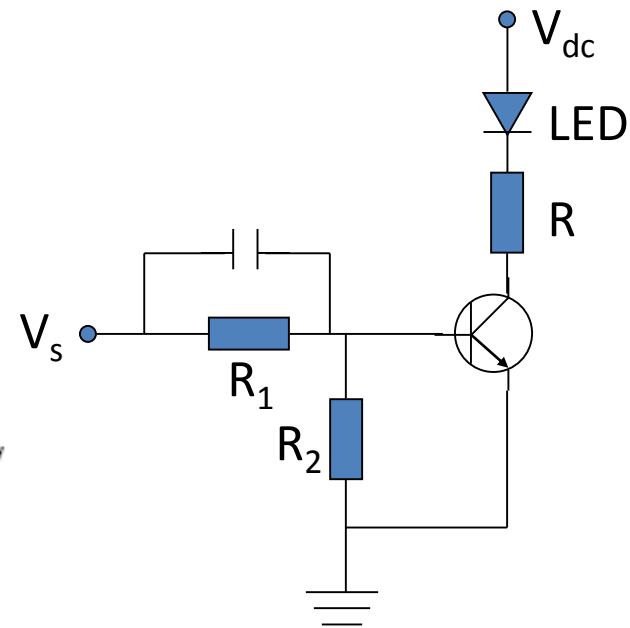
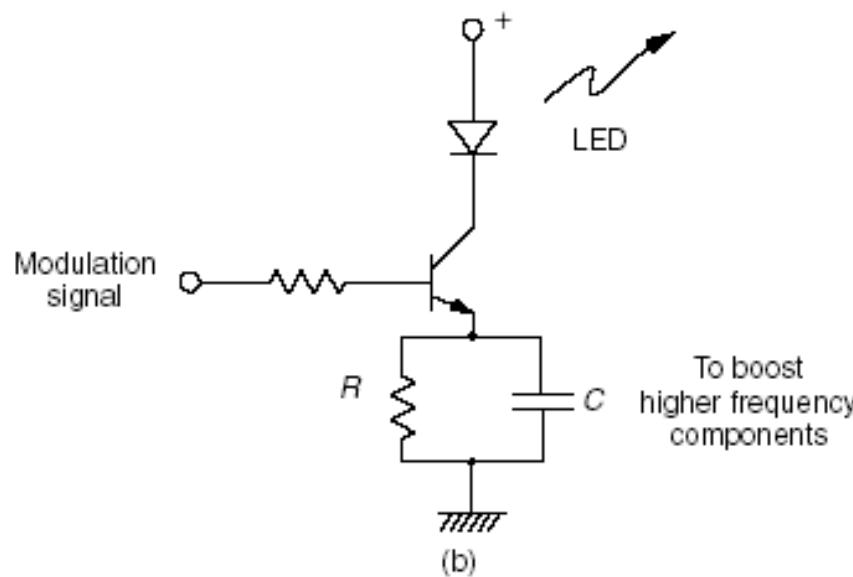
Thiết kế bộ phát quang

- Mạch kích thích nguồn quang

- Mạch kích thích sử dụng LED:

- Đối với tín hiệu số:

Không cần phân cực, sử dụng transistor lưỡng cực, LED có thể được mắc nối tiếp hoặc song song. Tụ C để tăng tốc độ điều biến



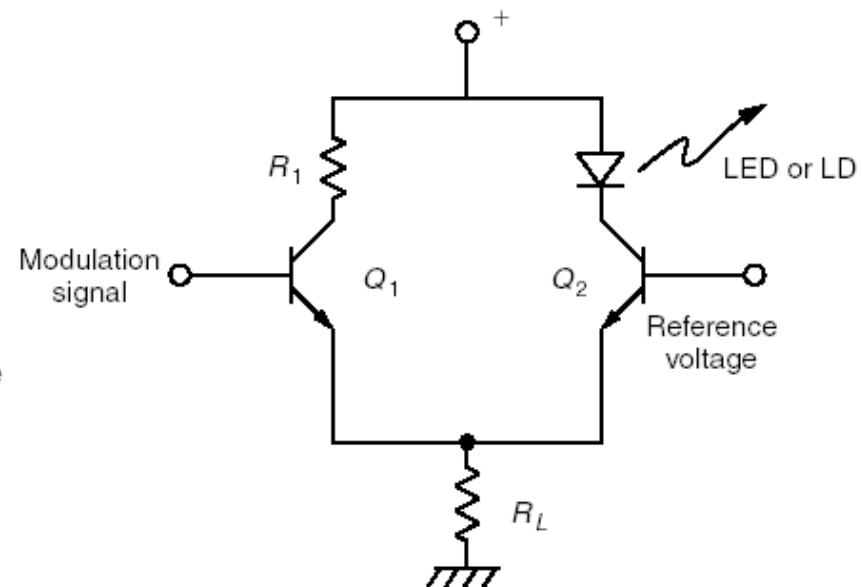
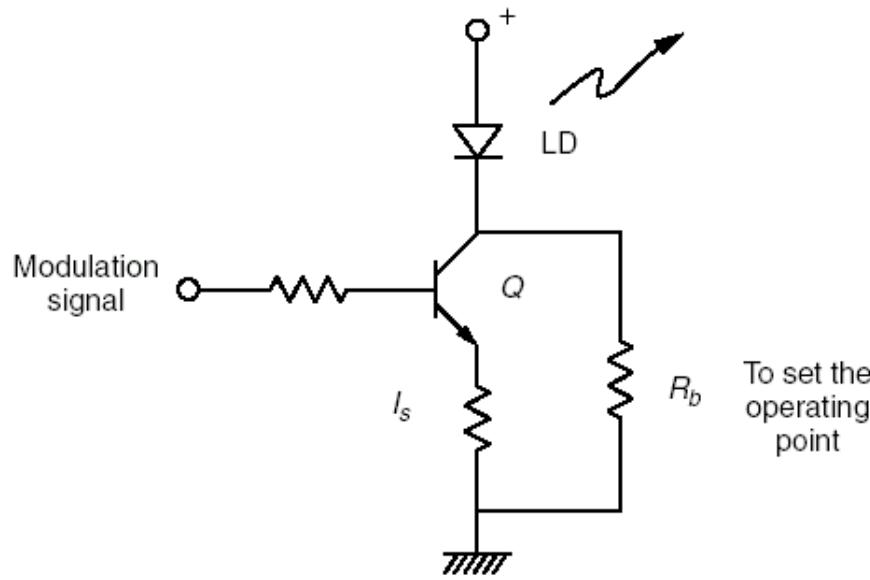
Thiết kế bộ phát quang

- Mạch kích thích nguồn quang

- Mạch kích thích sử dụng LD:

Giống của LED, tuy nhiên phải đảm bảo $I_b > I_{th}$ kể cả cho tín hiệu analog và tín hiệu số

Có thể sử dụng MESFET thay cho transistor lưỡng cực



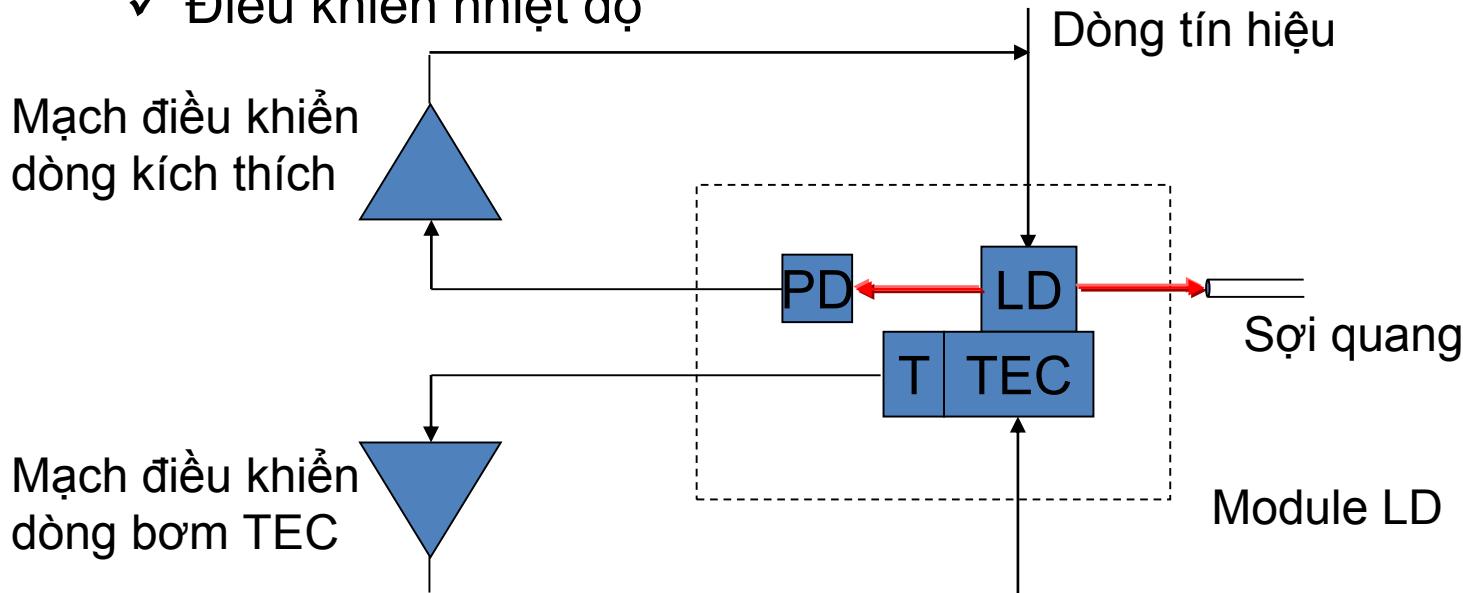
Thiết kế bộ phát quang

- Mạch kích thích nguồn quang

- Mạch kích thích sử dụng LD:

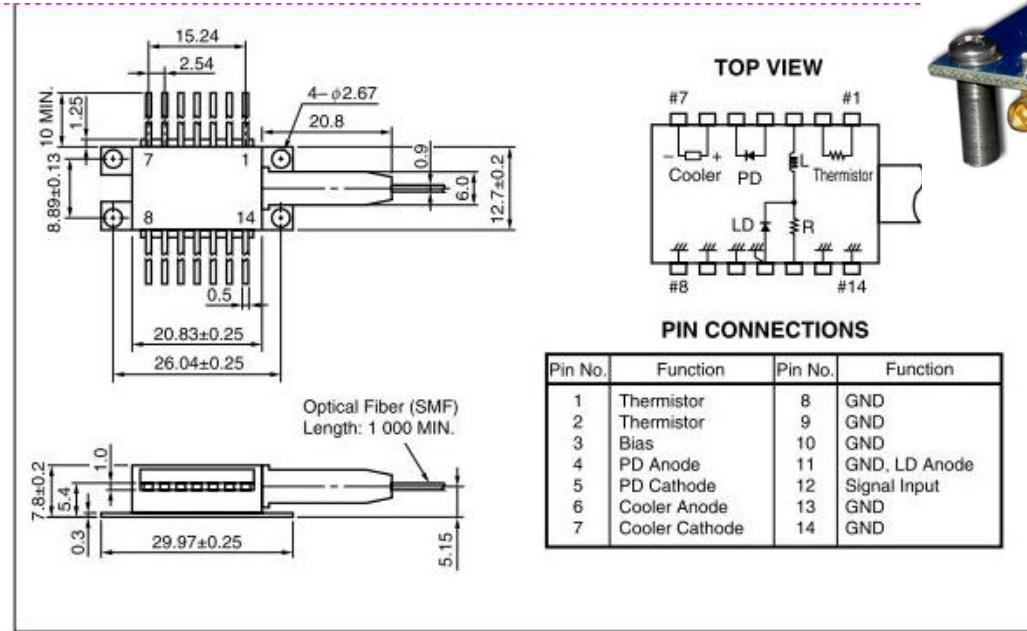
Khác với LED, các mạch kích thích LD còn có mạch vòng điều khiển ổn định công suất phát quang

- ✓ Điều khiển dòng (I_b)
 - ✓ Điều khiển nhiệt độ



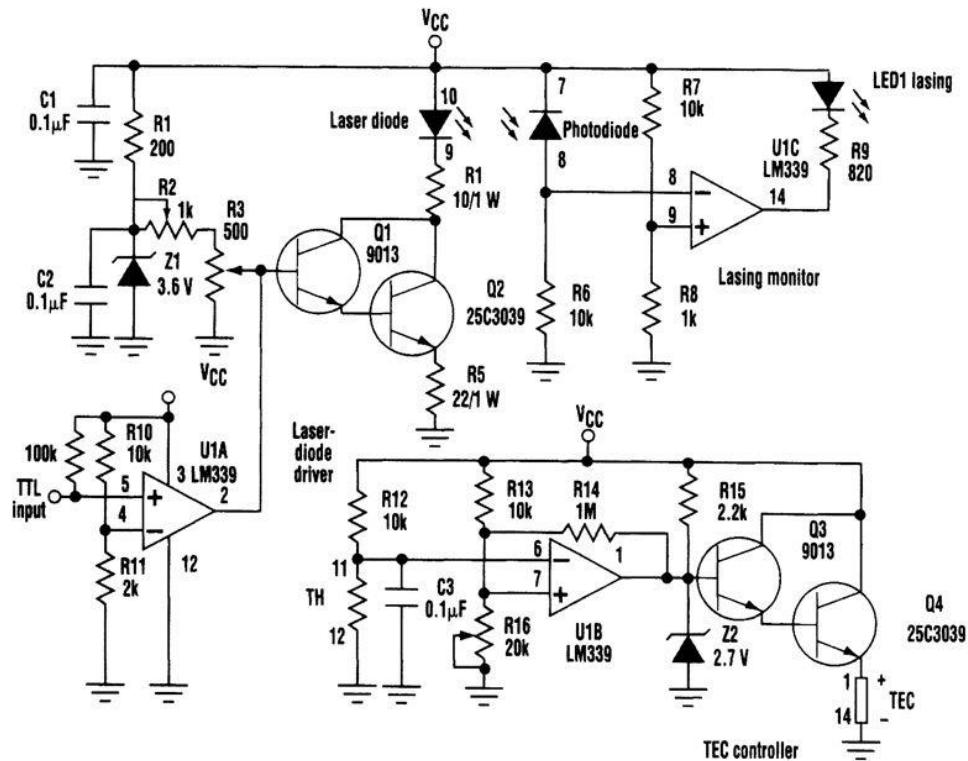
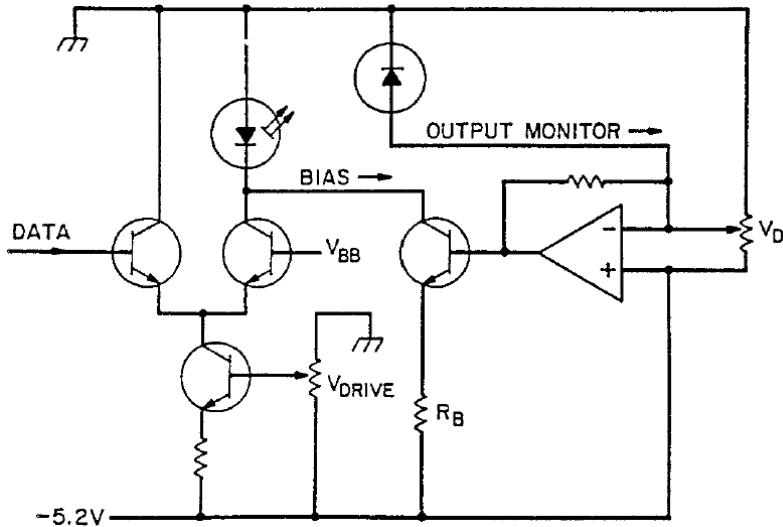
Thiết kế bộ phát quang

- Mạch kích thích nguồn quang
 - Mạch kích thích sử dụng LD:



Thiết kế bộ phát quang

- Mạch kích thích nguồn quang
 - Mạch kích thích sử dụng LD:



Note: The laser diode, photodiode, TH, and TEC come in one package (QLM5S876 laser-diode module) SeekIC.com





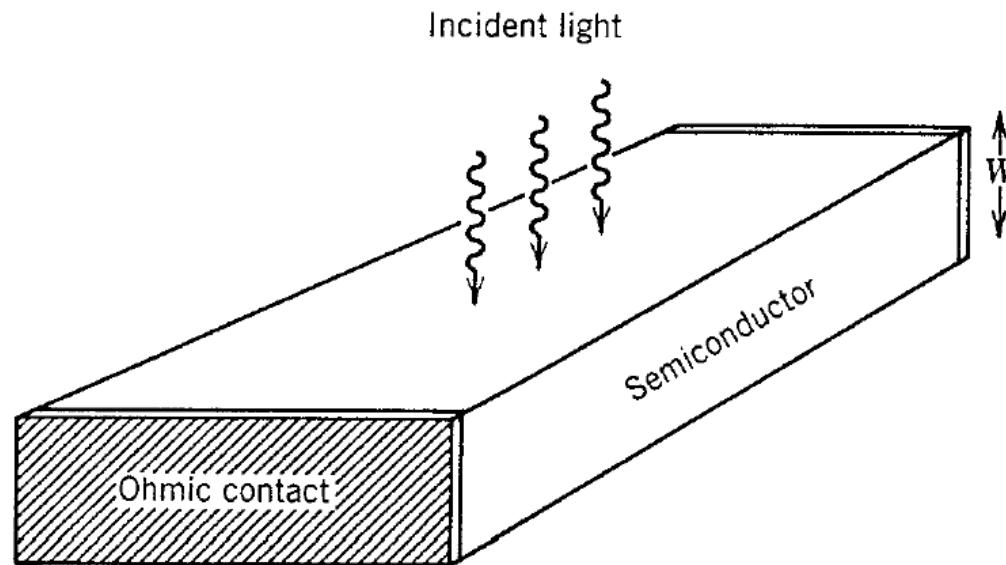
Chương 4

Bộ thu quang

Một số khái niệm cơ bản

• Đáp ứng nguồn thu

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



Một số khái niệm cơ bản

- Đáp ứng nguồn thu

- Dòng quang điện tỉ lệ trực tiếp với công suất quang vào:

$$I_p = RP_{\text{in}},$$

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

- Hiệu suất huy động tử:

$$\eta = \frac{\text{electron generation rate}}{\text{photon incidence rate}} = \frac{I_p/q}{P_{\text{in}}/hv} = \frac{hv}{q} R,$$

- Độ đáp ứng:

$$R = \frac{\eta q}{hv} \approx \frac{\eta \lambda}{1.24},$$

→ Hiệu suất chuyển đổi O/E

R tăng theo bước sóng



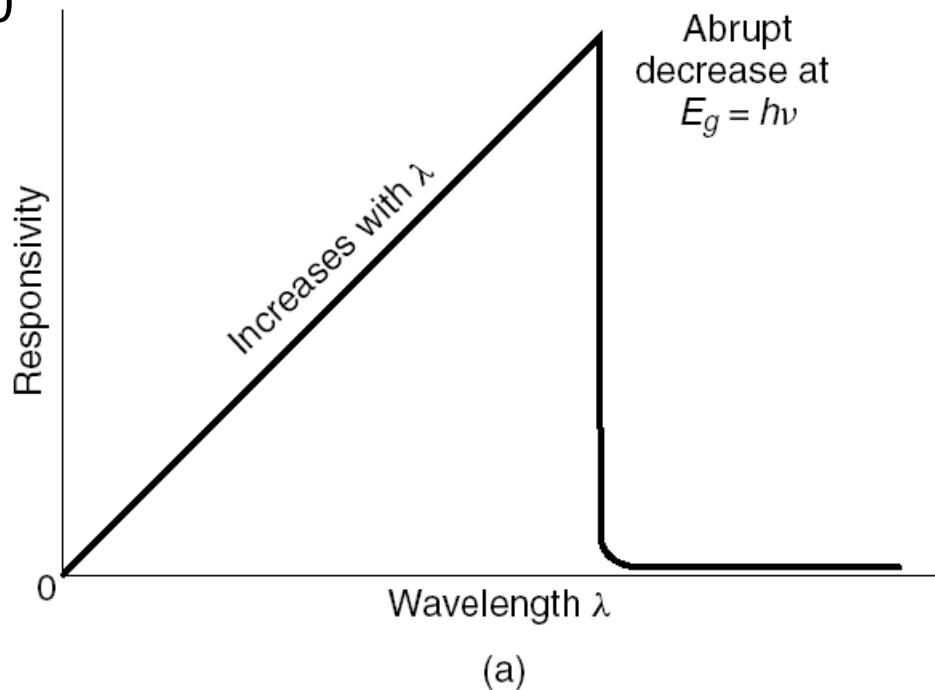
Một số khái niệm cơ bản

- Đáp ứng nguồn thu

- Điều kiện năng lượng:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g$$

Khi bước sóng tăng > giá trị tối hạn \rightarrow năng lượng photon $< E_g$
 $\rightarrow \eta$ giảm về 0



Một số khái niệm cơ bản

• Đáp ứng nguồn thu

- Sự phụ thuộc η vào λ : liên quan đến hệ số hấp thụ
Giả sử lớp bán dẫn bọc lớp chống phản xạ \Rightarrow công suất truyền qua lớp bán dẫn:

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

- Công suất bị hấp thụ:

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

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

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

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

Một số khái niệm cơ bản

- Đáp ứng nguồn thu

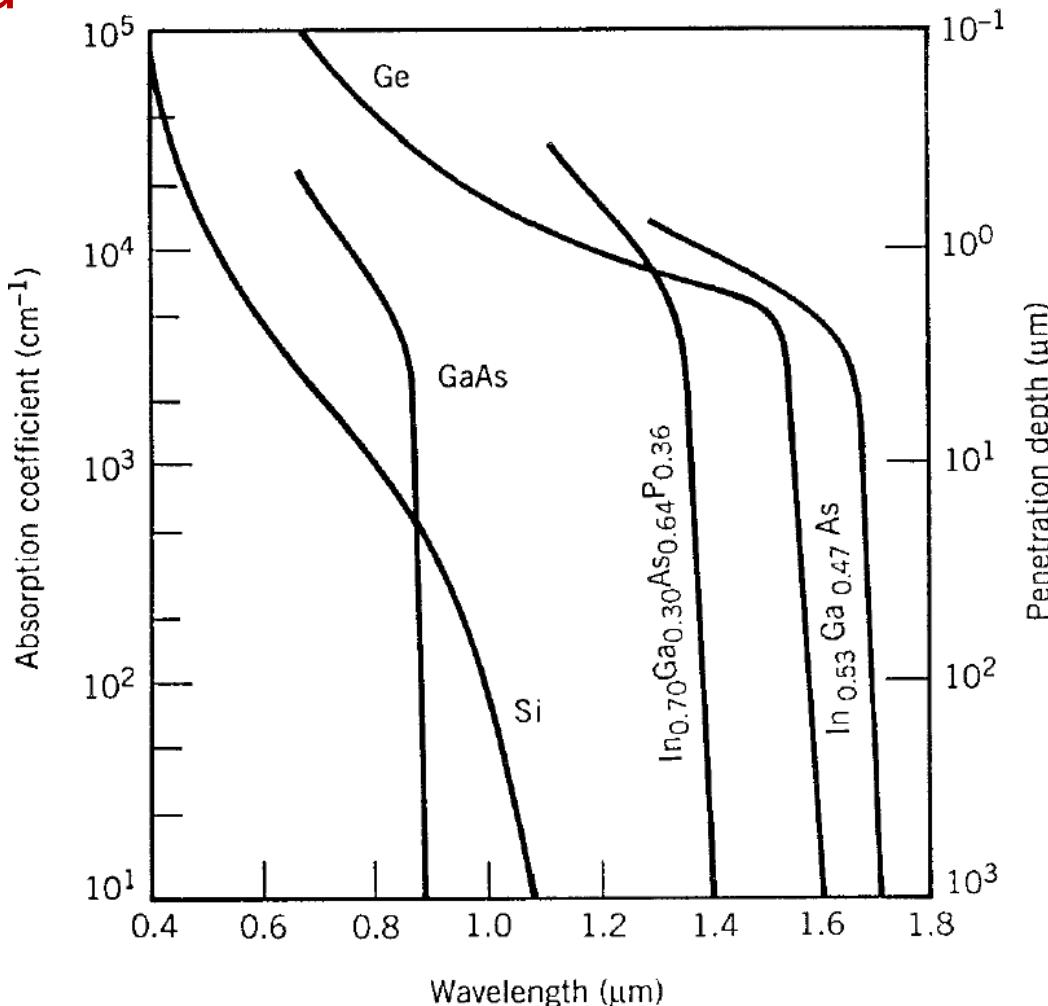
- Sự phụ thuộc α vào λ :

$$\alpha = 0 \text{ tại } \lambda = \lambda_c$$

α tăng khi λ giảm

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

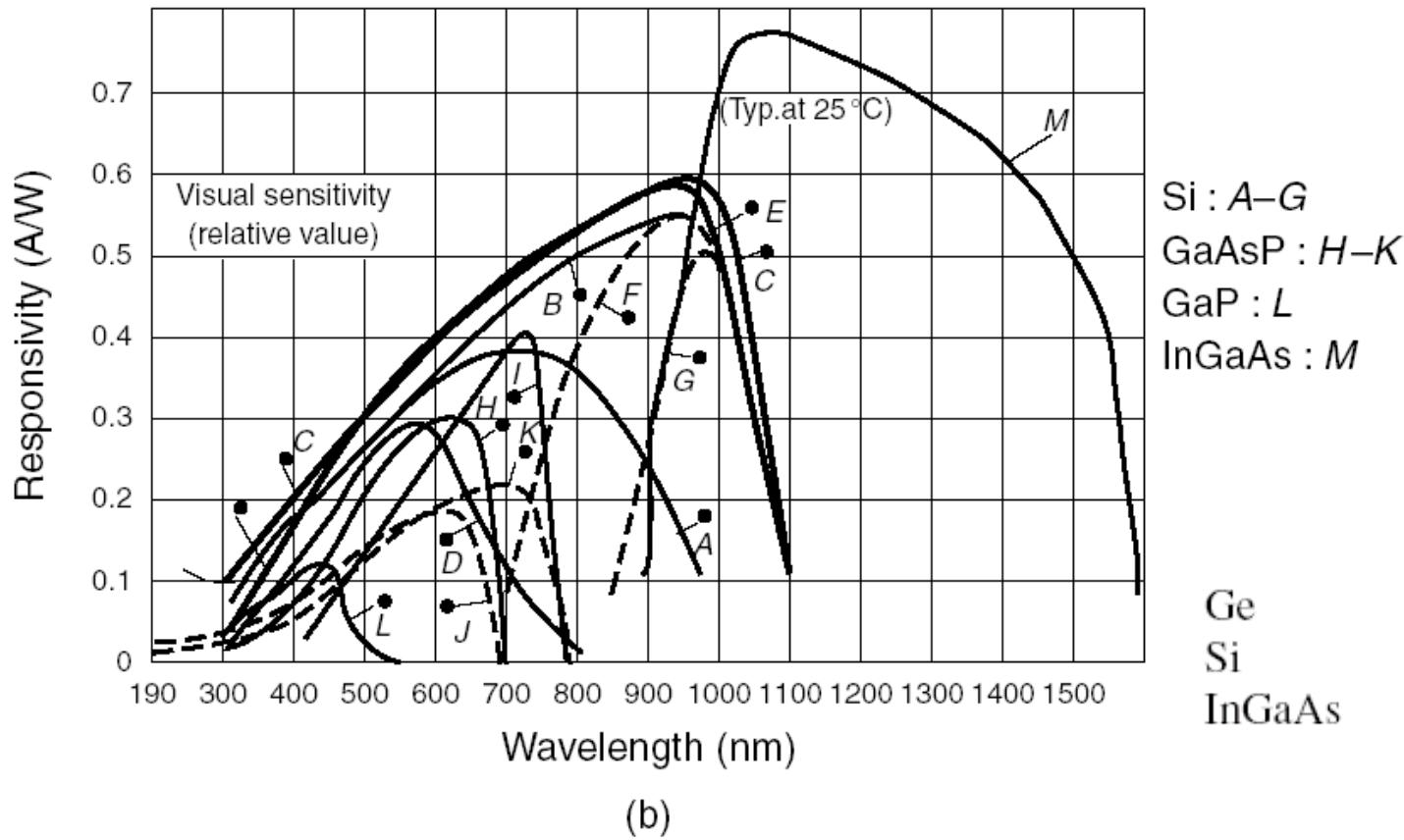
$$\eta \rightarrow 1 \text{ khi } W \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$$



Một số khái niệm cơ bản

- Đáp ứng nguồn thu

- Dạng phổ đáp ứng của một số vật liệu:



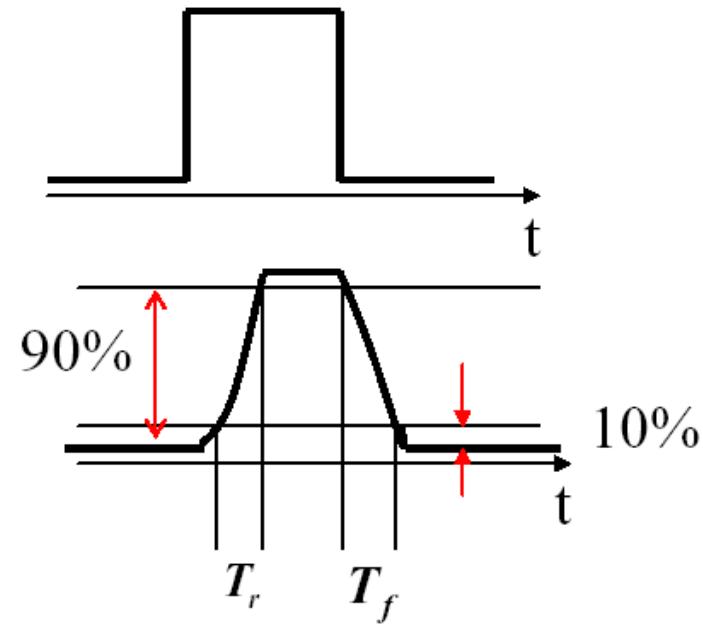
Một số khái niệm cơ bản

- Độ rộng băng tần nguồn thu

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

T_r phụ thuộc vào:

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





Một số khái niệm cơ bản

- Độ rộng băng tần nguồn thu

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

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

Điện áp đầu ra thay đổi:

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

R – điện trở, C – điện dung của mạch RC

- Thời gian lên:

$$T_r = (\ln 9)RC \approx 2.2\tau_{RC},$$

$\tau_{RC} = RC$ – hằng số thời gian của mạch RC



Một số khái niệm cơ bản

- Độ rộng băng tần nguồn thu

- Thời gian lên của photodiode:

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

τ_{tr} – thời gian chuyển tiếp, τ_{RC} – hằng số thời gian của mạch RC tương đương

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

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

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



Một số khái niệm cơ bản

- Độ rộng băng tần nguồn thu

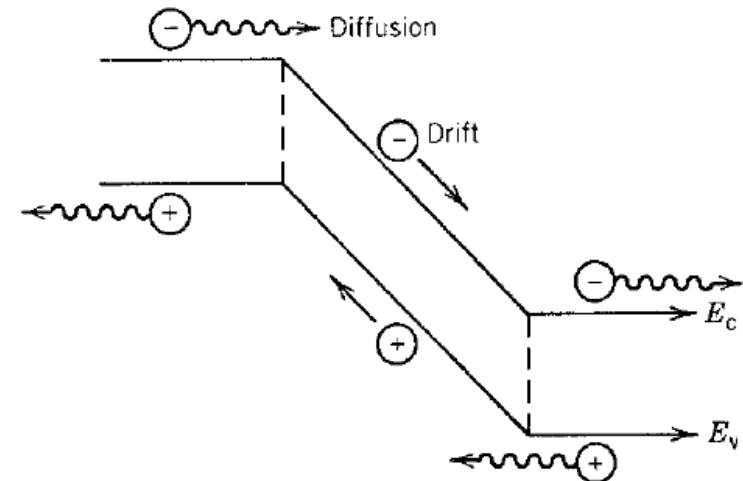
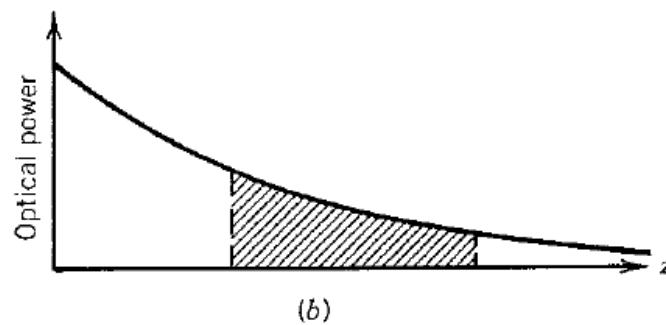
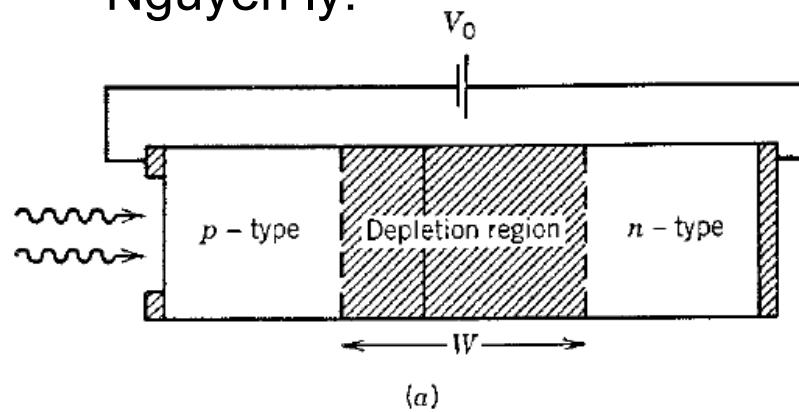
- Hằng số thời gian: giới hạn băng tần vì điện kí sinh
Giá trị τ_{tr} và τ_{RC} phụ thuộc vào cấu trúc PD và có thể biến đổi trên một dải rộng
- Độ rộng băng tần của PD:
$$\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}$$
- Để hoạt động ở 10 Gb/s trở lên: τ_{tr} và $\tau_{RC} < 10$ ps
- Bên cạnh đó, một tham số quan trọng của PD là dòng tối I_d (sinh ra khi không có tín hiệu quang đi vào)
- Một PD tốt $I_d < 10$ nA

Các loại diode thu quang



• Diode thu quang p-n

- Cấu trúc: tiếp giáp p-n phân cực ngược → vùng nghèo
Độ rộng vùng nghèo phụ thuộc vào nồng độ pha tạp.
- Nguyên lý:



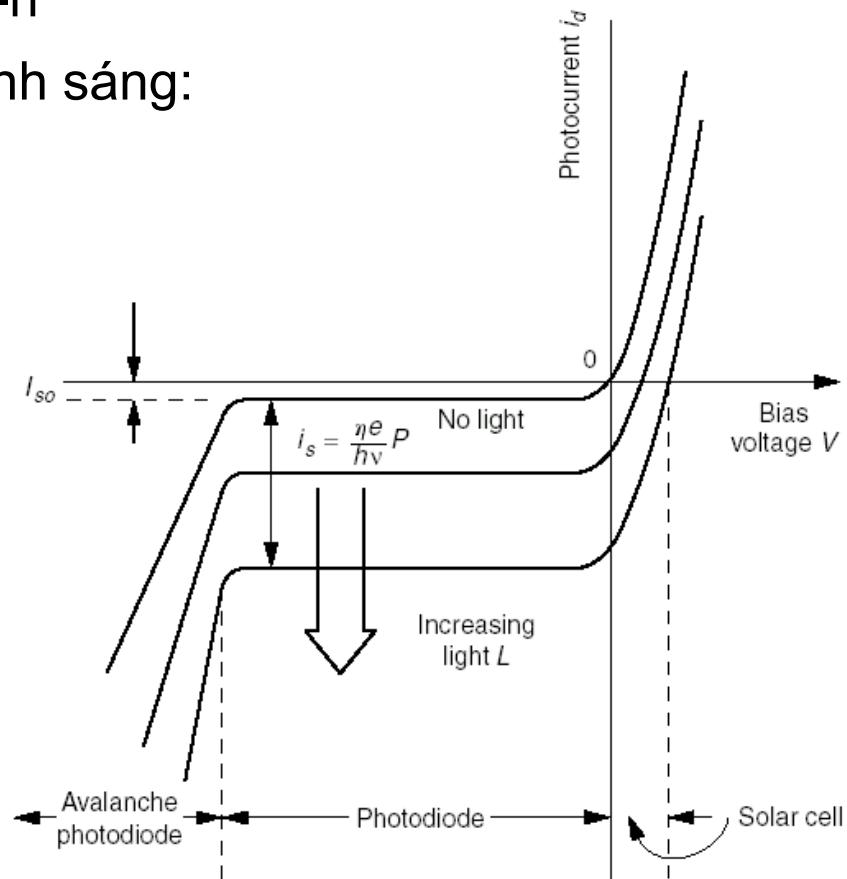
Các loại diode thu quang

- Diode thu quang p-n

- Đặc tính I-V của tiếp giáp p-n
- Dòng từ PD khi không có ánh sáng:

$$i_d = I_{so} (e^{eV/kT} - 1)$$

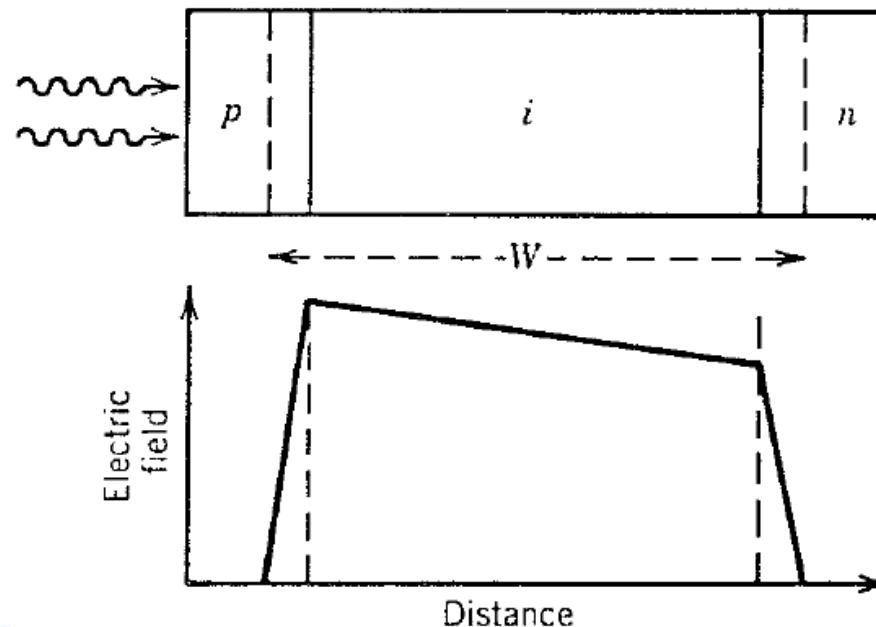
I_{so} - dòng bão hòa



Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

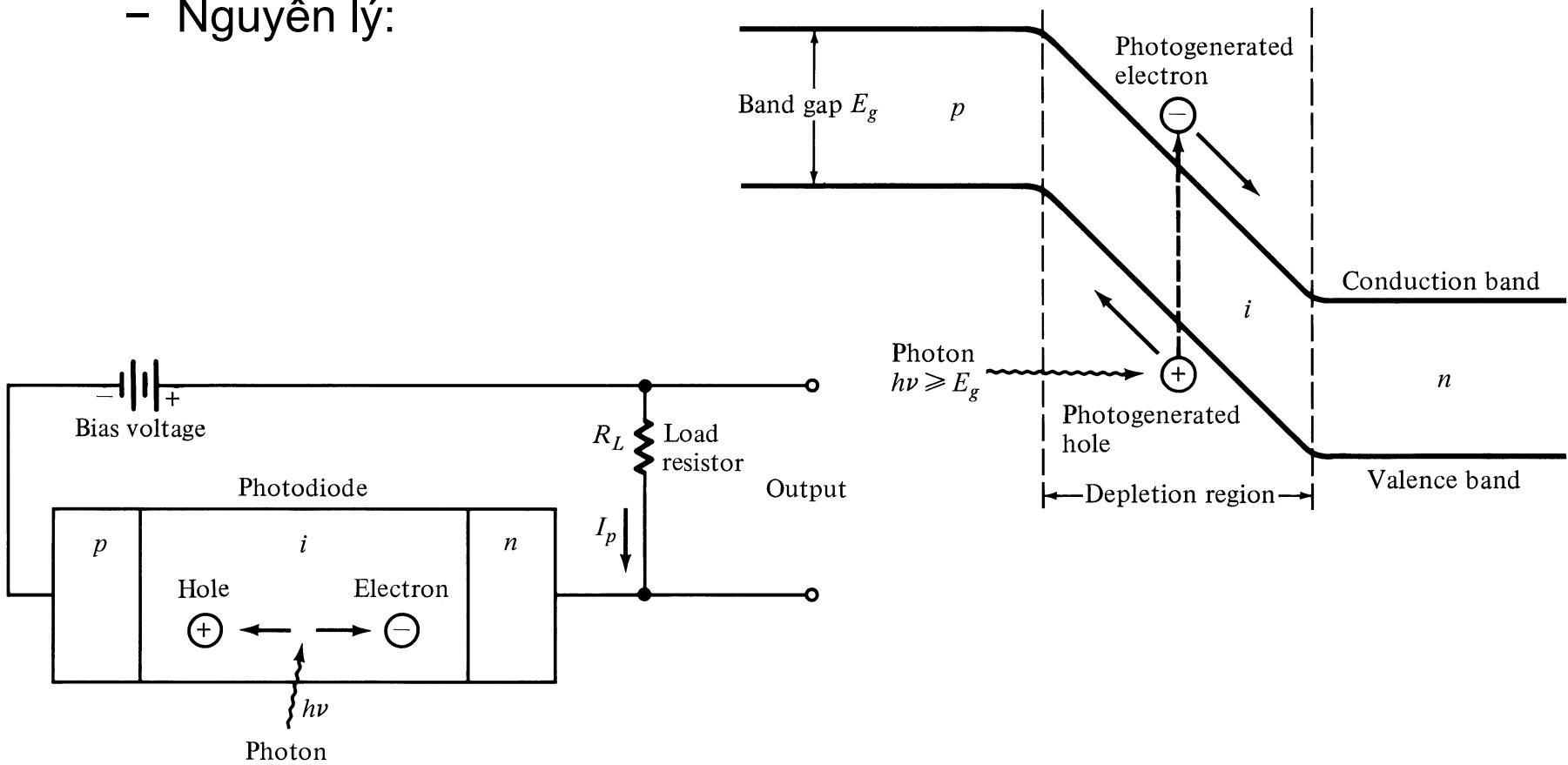
- Cấu trúc: gồm 3 lớp, lớp i được xen giữa lớp p và n
- Lớp i có điện trở cao \rightarrow hầu hết điện áp rơi trên vùng này \rightarrow thành phần trôi $>>$ thành phần khuyếch tán
- Độ rộng W được quyết định bởi độ dày lớp i



Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

- Nguyên lý:



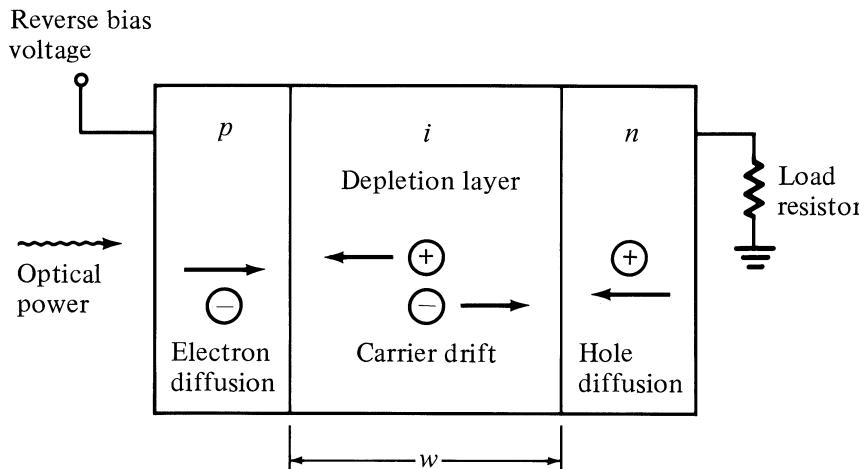
Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

- Các hạt tải sinh ra trong vùng nghèo (vùng tập trung điện trường lớn) trôi nhanh chóng về phía n hoặc p
- Các hạt tải sinh ra ngoài vùng nghèo:

Các điện tử sinh ra trong vùng p phải khuyếch tán tới biên vùng nghèo trước khi trôi về phía n

Các lỗ trống sinh ra trong vùng n phải khuyếch tán tới biên vùng nghèo trước khi trôi về phía p



Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

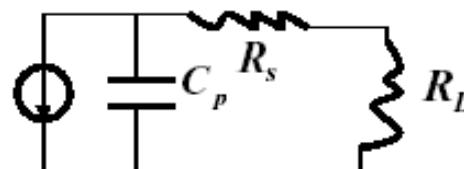
- Độ rộng băng tần thường bị giới hạn bởi thời gian chuyển tiếp
- Thời gian chuyển tiếp:

$$\tau_{tr} = W/v_d. \quad W - \text{độ rộng vùng nghèo} \quad v_d - \text{vận tốc trôi}$$

Vận tốc trôi phụ thuộc vào điện áp đặt vào, đạt được giá trị cực đại (vận tốc bão hòa) $\sim 10^5$ m/s

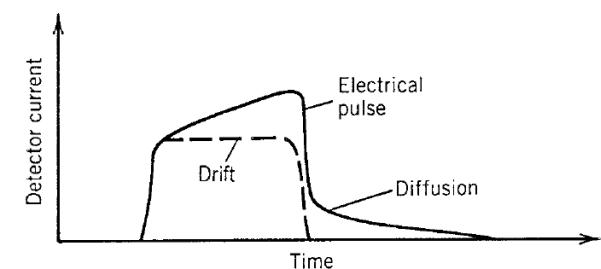
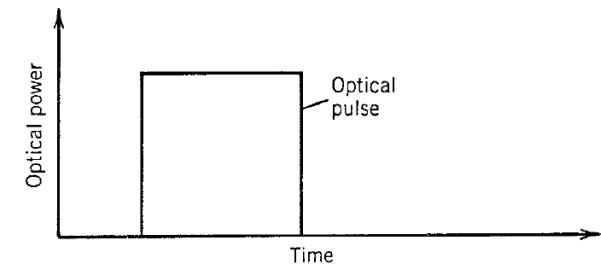
- Hằng số thời gian:

$$\tau_{RC} = (R_L + R_s)C_p,$$



R_L – điện trở tải, R_s – điện trở diode nối tiếp,
 C_p – điện dung ký sinh

- Khi có thành phần khuyếch tán \Rightarrow giới hạn băng tần
- Quá trình khuyếch tán: chậm \rightarrow gây méo đáp ứng thời gian của PD



Các loại diode thu quang



• Diode thu quang PIN

- Giảm quá trình khuyếch tán:
 - Giảm độ rộng vùng n và p
 - Tăng độ rộng vùng nghèo
- Độ rộng vùng nghèo cần được lựa chọn một cách thích hợp
- Đảm bảo không quá hẹp để hấp thụ hết các photon đi vào, đồng thời giảm thiểu thành phần khuyếch tán

$$w > \frac{1}{\alpha}$$

- Tăng w cũng làm giảm điện dung tiếp giáp \rightarrow giảm τ_{RC}

$$C = \frac{\varepsilon_s A}{w}$$

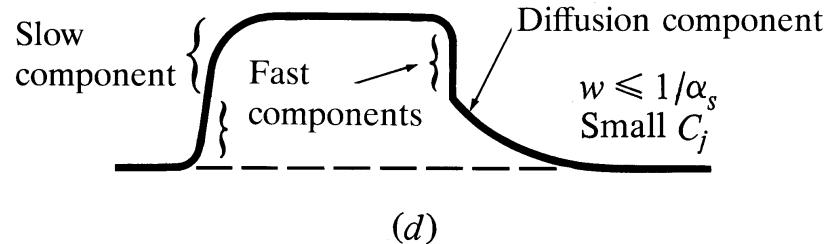
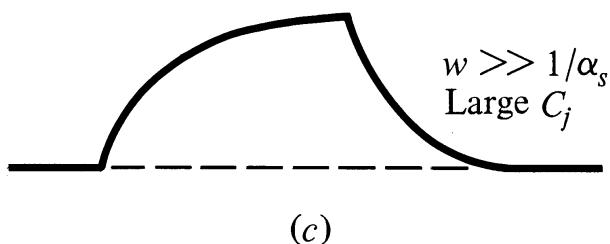
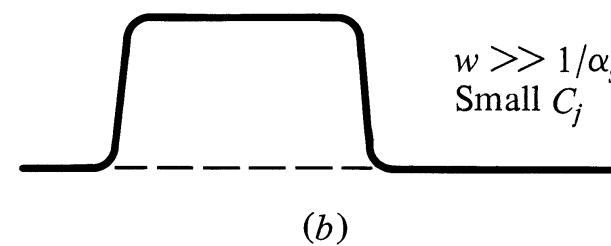
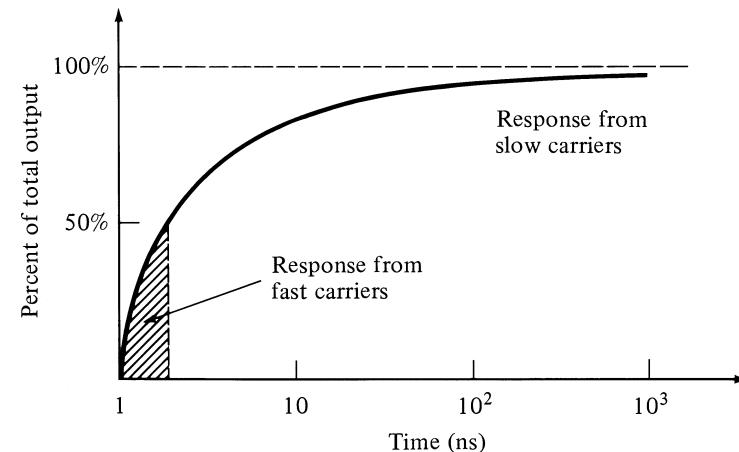
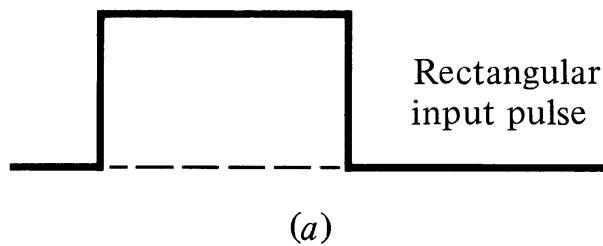
- W cũng không quá lớn \rightarrow tránh ảnh hưởng thời gian trôi

$$w \leq \frac{2}{\alpha}$$

Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

- Một số kiểu đáp ứng:

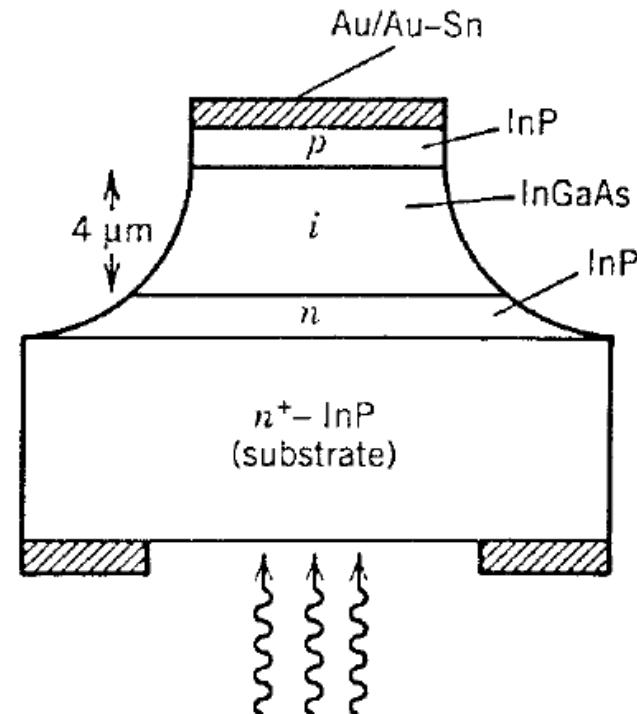
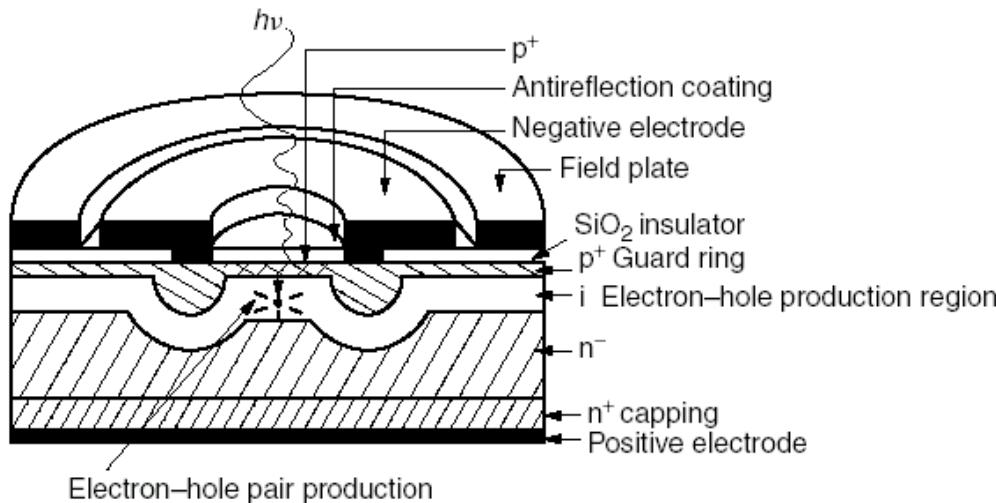


Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

 - Một số ví dụ:

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



Các loại diode thu quang

- Diode thu quang PIN

 - Nâng cao tính năng của PIN:

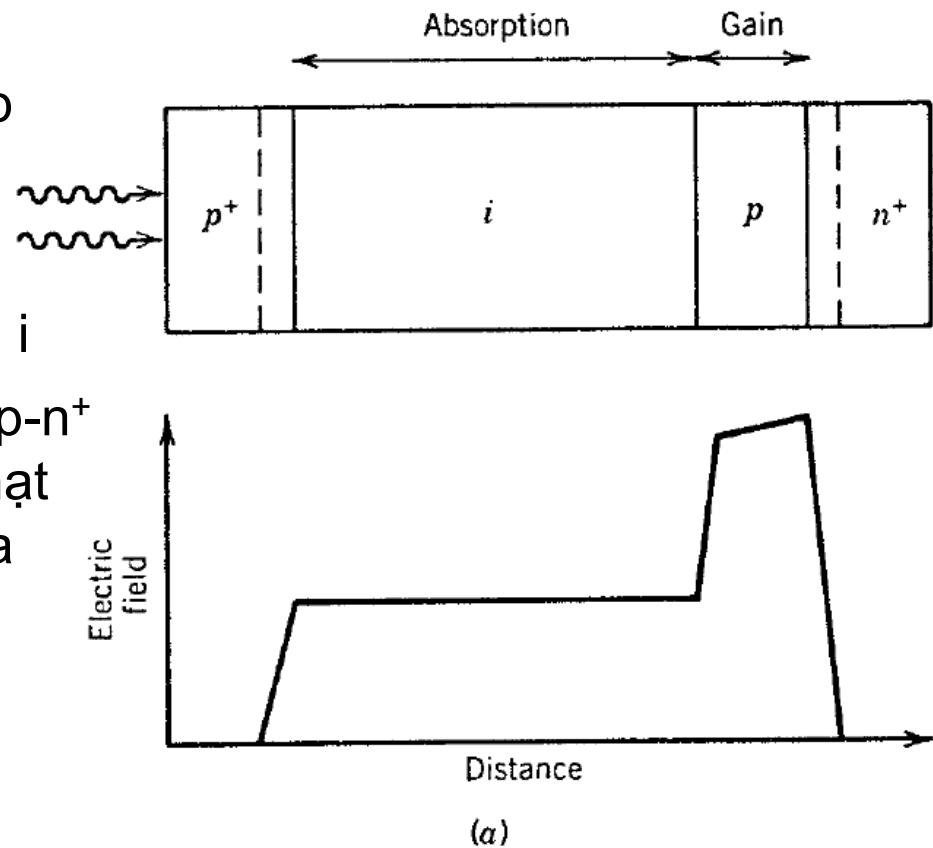
 - Cấu trúc dí thê kép → loại bỏ dòng khuyếch tán
 - Hộp cộng hưởng F-P → tăng hiệu suất lượng tử
 - Sử dụng ống dẫn sóng quang → tăng hiệu suất lượng tử, giảm điện dung ký sinh và điện trở nội nối tiếp

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

Các loại diode thu quang

- Diode thu quang APD

- Cấu trúc: gồm 4 lớp, bổ sung thêm 1 lớp giữa lớp i và n⁺
- Điện trường cao ở vùng tiếp giáp p-n⁺ → Vùng nhân
- Hoạt động:
 - Hấp thụ chủ yếu tại vùng i
 - Các e trôi qua i tới vùng p-n⁺ → Xảy ra quá trình nhân hạt tải (quá trình ion hóa do va chạm)

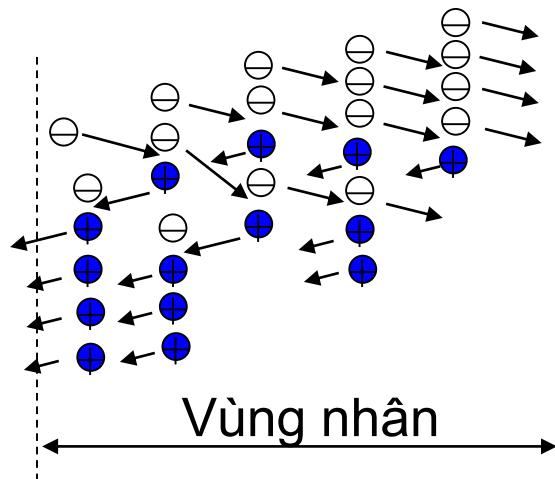


(a)

Các loại diode thu quang

- Diode thu quang APD

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



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

Các loại diode thu quang

- Diode thu quang APD

- Quá trình khuyếch đại dòng của APD:

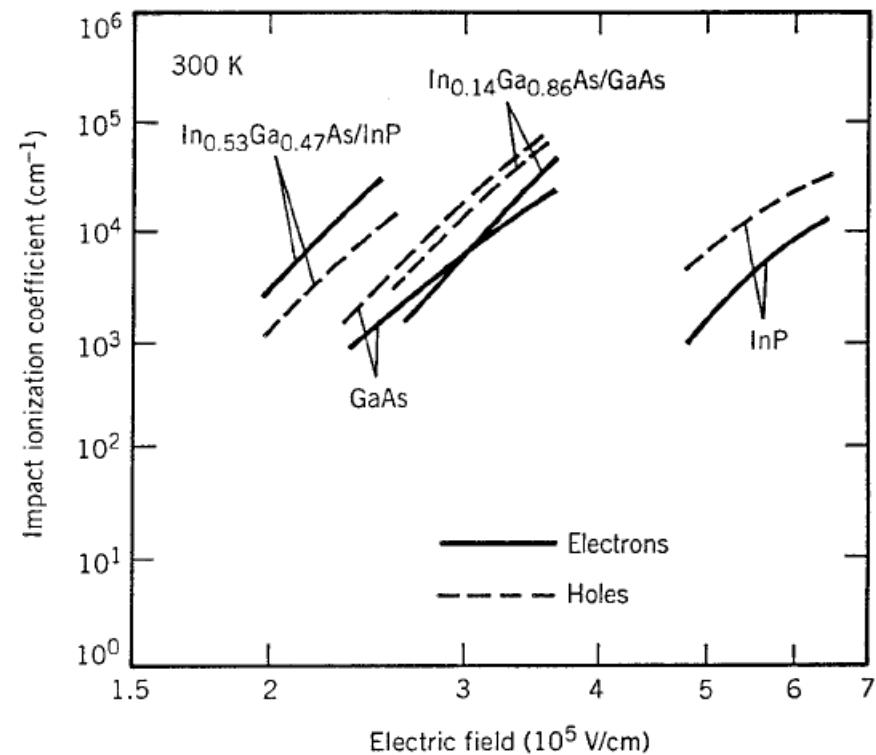
Phương trình tốc độ:

$$\frac{di_e}{dx} = \alpha_e i_e + \alpha_h i_h,$$

$$-\frac{di_h}{dx} = \alpha_e i_e + \alpha_h i_h,$$

Dòng tổng: $I = i_e(x) + i_h(x),$

$$\rightarrow di_e/dx = (\alpha_e - \alpha_h)i_e + \alpha_h I.$$



Các loại diode thu quang

- Diode thu quang APD

- Hệ số khuyếch đại dòng:

$$M = \frac{i_e(d)}{i_e(0)} = \frac{1 - k_A}{\exp(-(1 - k_A)\alpha_e d) - k_A} \quad k_A = \alpha_h / \alpha_e$$

Khi $\alpha_h = 0$ $M = \exp(\alpha_e d)$

Khi $\alpha_e = \alpha_h$ $M = (1 - \alpha_e d)^{-1}$

APD tốt thường chọn $\alpha_e \gg \alpha_h$ hoặc $\alpha_h \gg \alpha_e$

M là một hàm của điện áp phân cực và phải được chọn hợp lý

- Độ đáp ứng:

$$R_{APD} = MR = M(\eta q/hv),$$

- Sự phụ thuộc hệ số khuyếch đại theo tần số:

$$M(\omega) = M_0 [1 + (\omega \tau_e M_0)^2]^{-1/2},$$

τ_e – thời gian chuyển tiếp hiệu dụng

Các loại diode thu quang

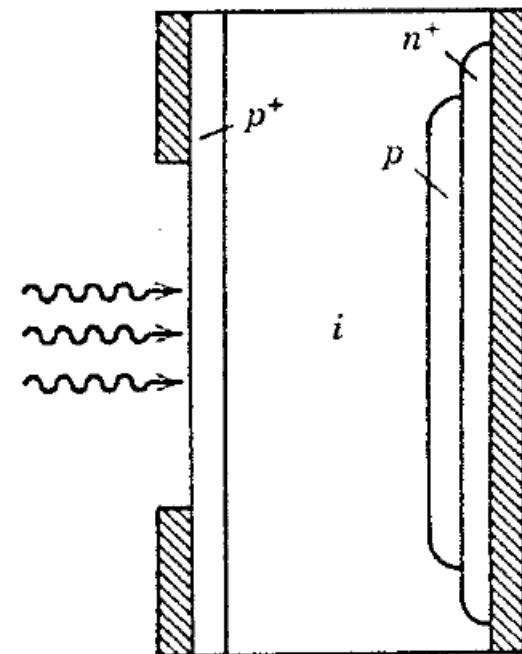
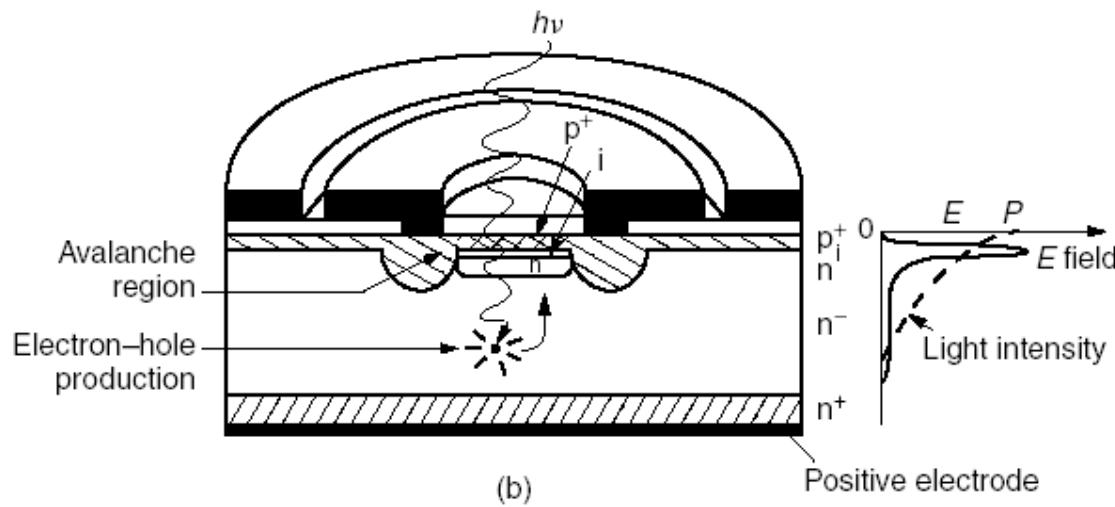
- Diode thu quang APD

- Sự phụ thuộc hệ số khuyếch đại theo tần số:

Khi $\alpha_e > \alpha_h$ $\tau_e = c_A k_A \tau_{tr}$ ($c_A \sim 1$)

Nếu $\tau_{RC} \ll \tau_{tr} \Rightarrow$ gần đúng $\Delta f = (2\pi \tau_e M_0)^{-1}$

- Một số ví dụ:



Các loại diode thu quang

- Diode thu quang APD

- Một số ví dụ:

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

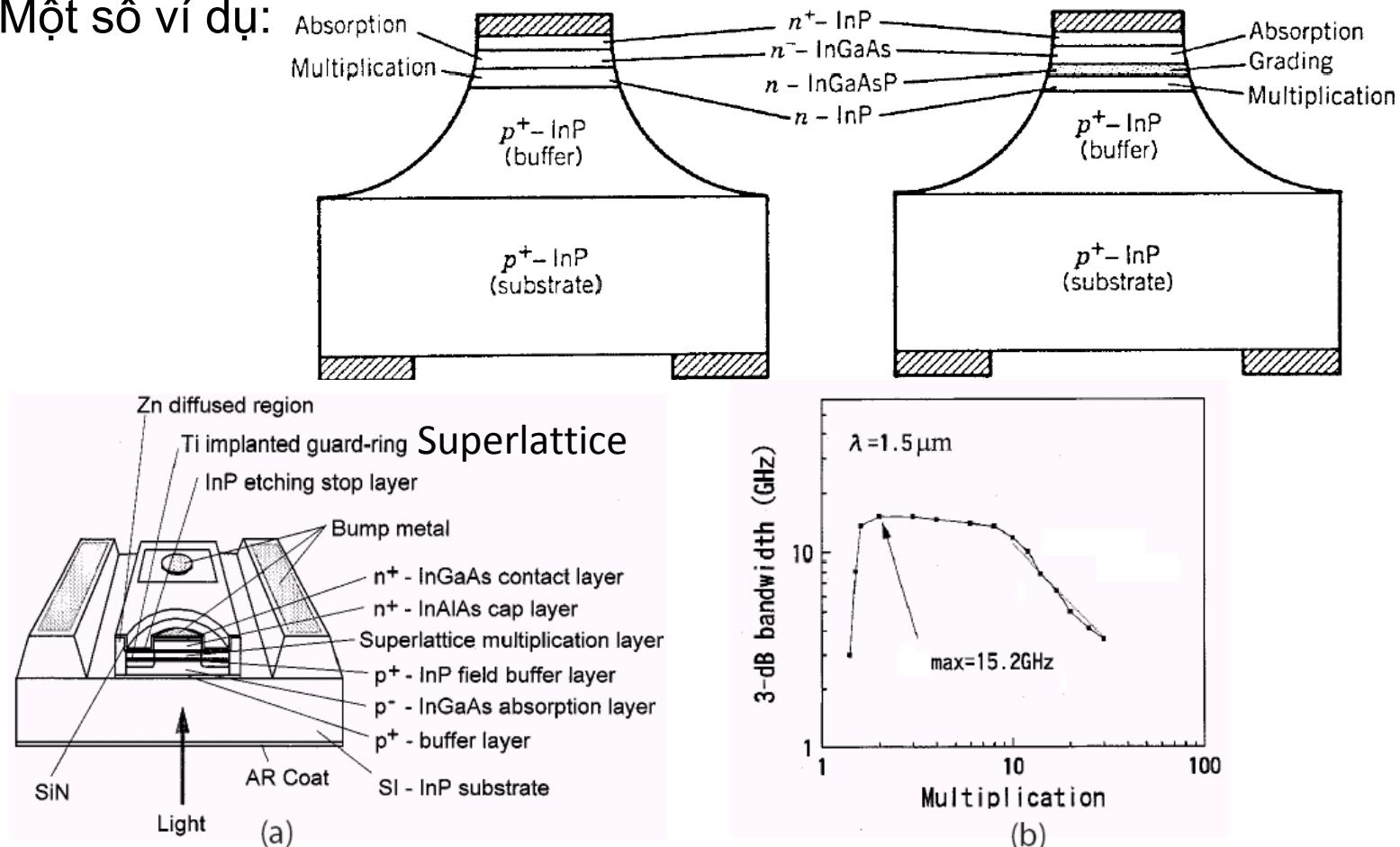
Nâng cao tính năng của APD:

- Cấu trúc vùng nhân và hấp thụ tách rời (SAM)
- Cấu trúc vùng nhân giảm dần và hấp thụ tách rời (SAGM)
- Cấu trúc siêu mạng

Các loại diode thu quang

- Diode thu quang APD

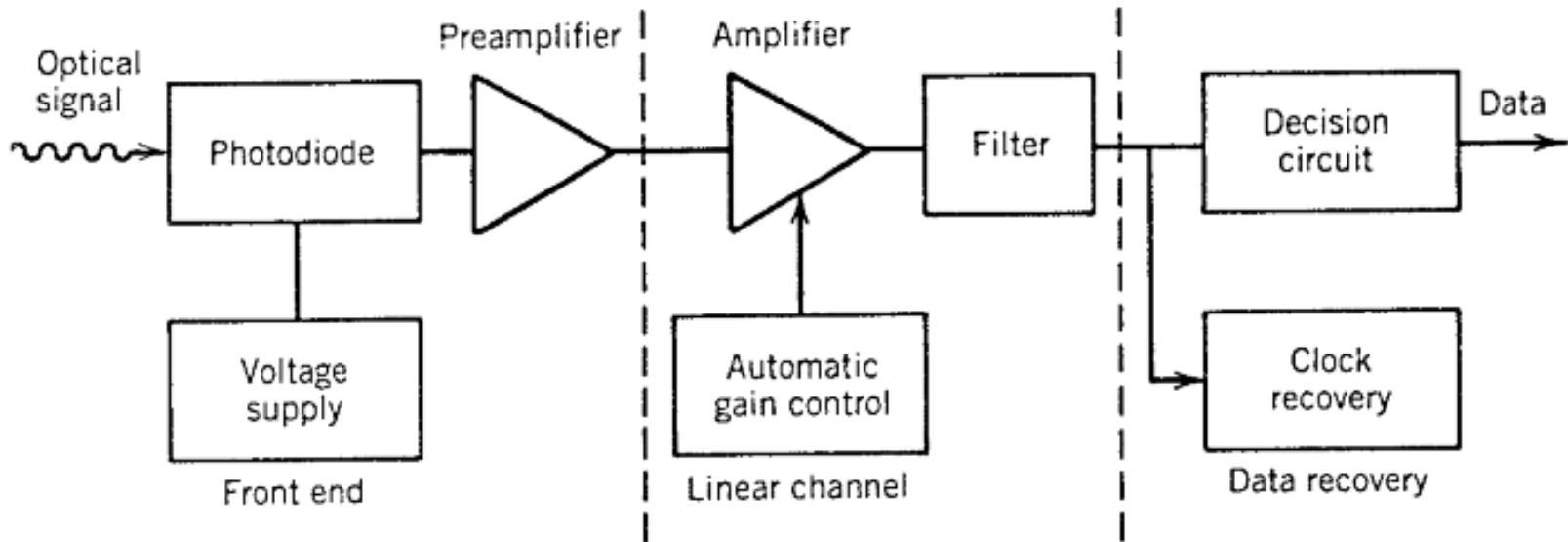
- Một số ví dụ:



Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ thu quang**

- Sơ đồ tổng quát:

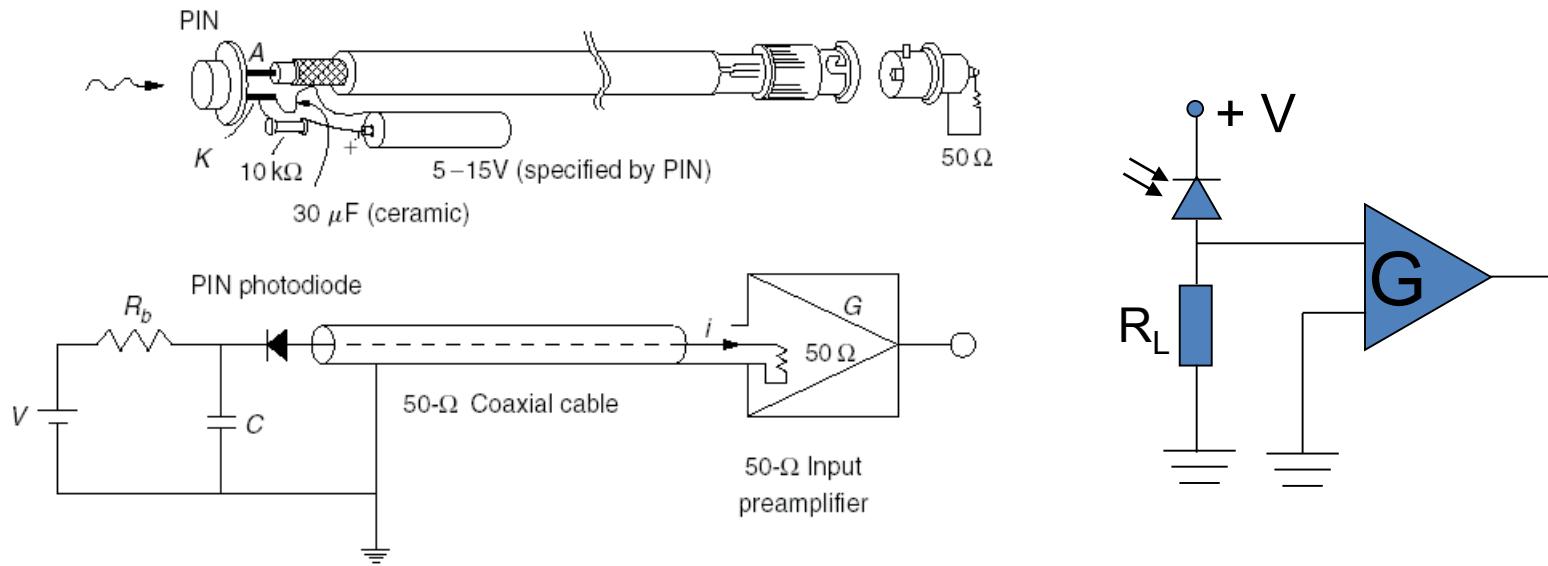


- Tiền khuỷuetch đại (Front end)
- Kênh tuyến tính (Linear channel)
- Khôi phục dữ liệu (Data recovery): đối với tín hiệu số

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại (Preamplifier)**

- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng thấp (Low-impedance pream.):



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

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

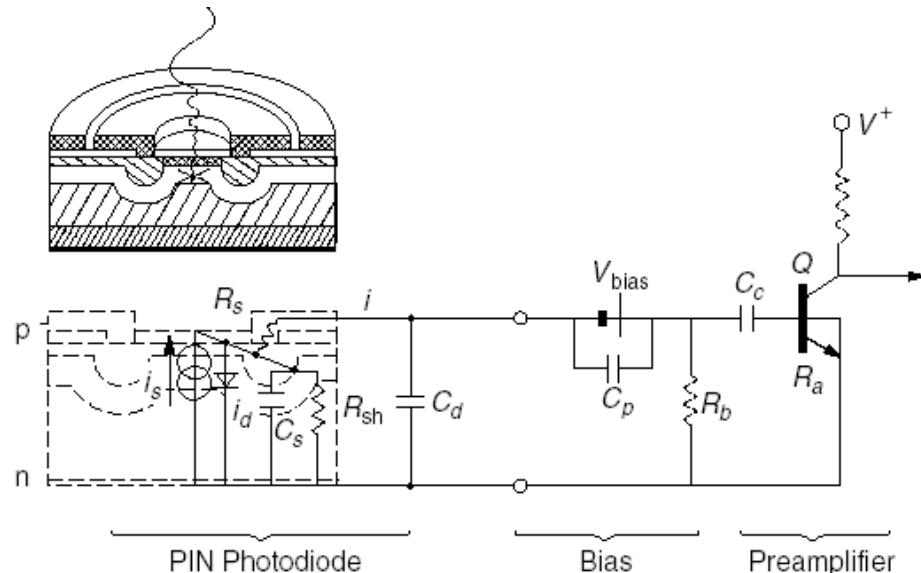
- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng thấp:
- Tần số cắt:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_L C}$$

- Mạch tương đương:

Điện áp đầu ra:

$$\begin{aligned} V &= \frac{R_L / j\omega C}{R_L + 1/j\omega C} i \\ &= \frac{R_L}{\sqrt{1 + (\omega R_L C)^2}} e^{j\phi} \cdot i \end{aligned}$$



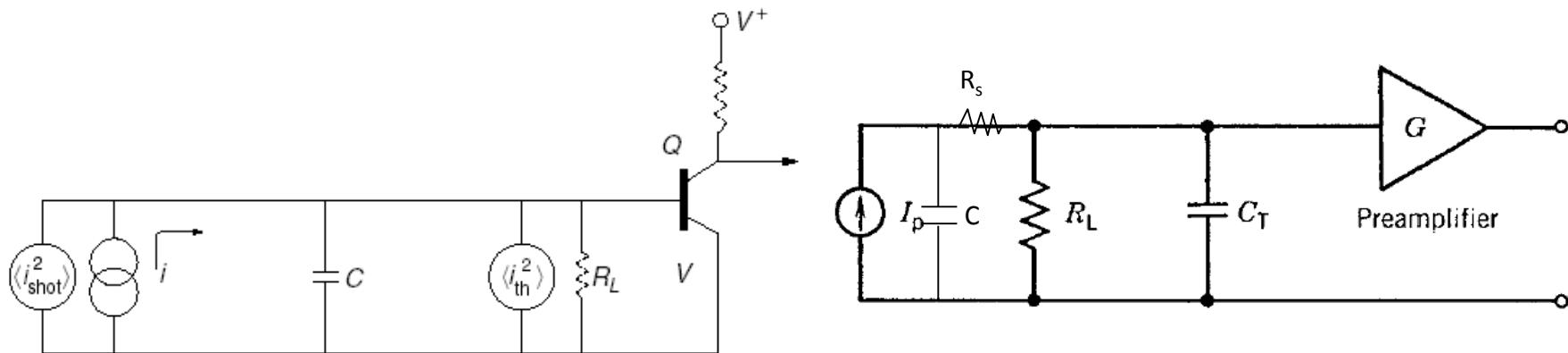
$$i = i_s - i_d \quad C = C_s + C_d$$

$$\tan \phi = -\omega R_L C \quad \frac{1}{R_L} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}$$

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng thấp:

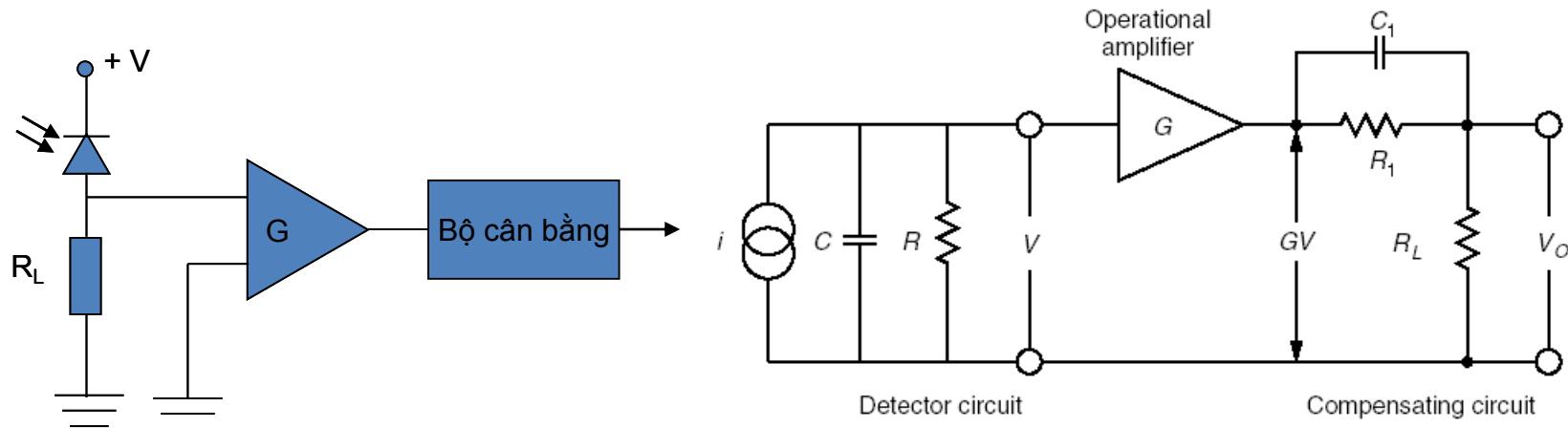


- Nhận xét:
 - ✓ Ưu điểm sử dụng cáp đồng trực dễ dàng kết nối
 - ✓ Độ nhạy thấp (điện áp đầu vào bộ khuyếch đại nhỏ)
 - ✓ Tại tần số cao, phản xạ tại tiếp giáp của diode với dây dẫn 50Ω làm suy giảm tính năng nghiêm trọng
 - ✓ Nhiêu nhiệt lớn (R_L nhỏ)

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng cao (High-impedance pream.):
 - Trở kháng tải cao → Giảm nhiễu nhiệt, tần số cắt của đáp ứng tần số nhỏ → Phải sử dụng thêm mạch cân bằng (mạch // R_1C_1)
 - Điện áp đầu ra được phân chia giữa trở kháng của mạch R_1C_1 và R_L
 - Mạch tương đương:



Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng cao:
- Tần số giới hạn: tần số trên đó điện kháng $1/\omega_1 C_1 < R_1 \rightarrow$ Khi $f > f_{c1}$, thế rơi trên R_L trở nên lớn so với ở mạch $R_1 C_1$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

- Điện áp đầu ra bộ khuyếch đại:

$$\begin{aligned} V_O &= VG \frac{R_L}{R_L + \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1}} \\ &= \frac{iGRR_L}{(1 + j\omega CR)} \cdot \frac{(1 + j\omega C_1 R_1)}{R_1 + R_L + j\omega C_1 R_1 R_L} \end{aligned}$$

G – hệ số khuyếch đại

i – dòng đầu vào

Thiết kế bộ thu quang

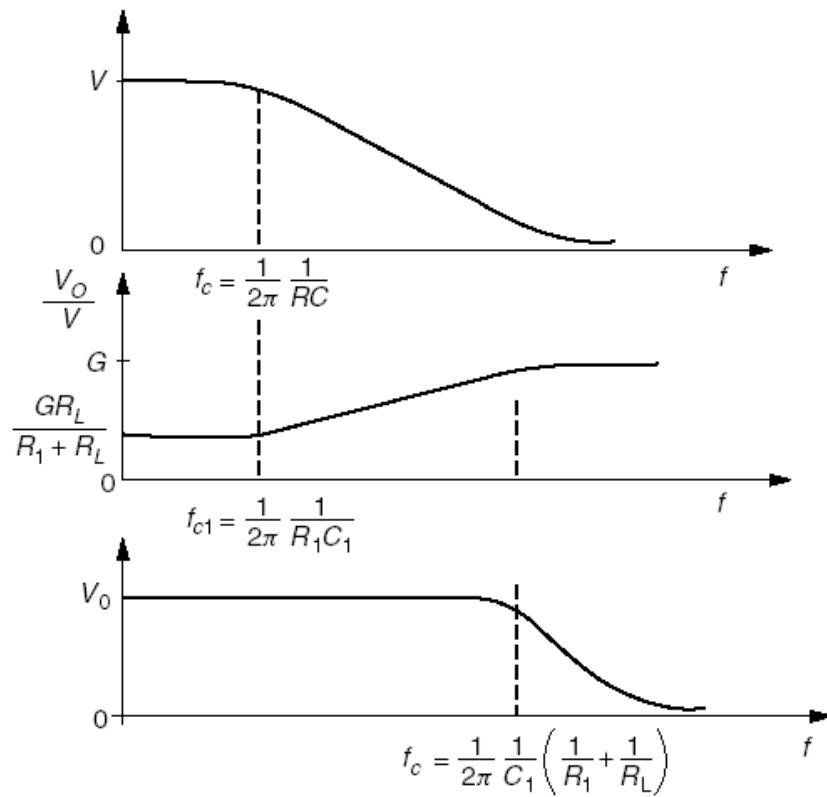
- Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng cao:
- Bù thích hợp được thực hiện khi mẫu số của hệ số thứ nhất triệt tiêu tử số của hệ số thứ 2:

$$R_1 C_1 = RC$$

- Tần số cắt toàn mạch:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L} \right)$$



Thiết kế bộ thu quang

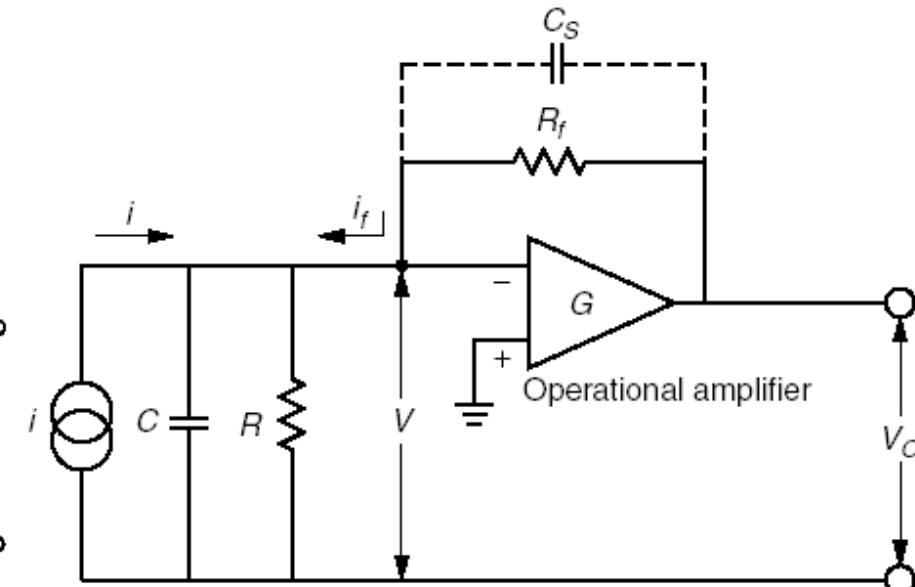
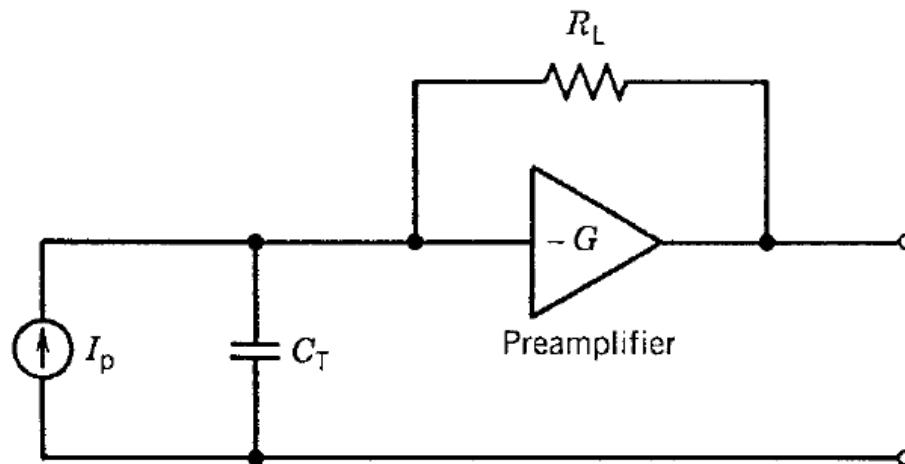
- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại trở kháng cao:
- Nhận xét:
 - ✓ Đảm bảo độ nhạy cao
 - ✓ Nhiễu nhiệt thấp
 - ✓ Nếu f_c mở rộng quá → tín hiệu V đưa vào bộ khuyếch đại thuật toán quá nhỏ → bị ảnh hưởng của nhiễu
 - ✓ Dải động bị giới hạn

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại chuyển trở kháng (Transimpedance pream.):
- Sử dụng mạch hồi tiếp âm:



- Các tham số của mạch được xác định:

$$i_f = \frac{V_o - V}{R_f}$$

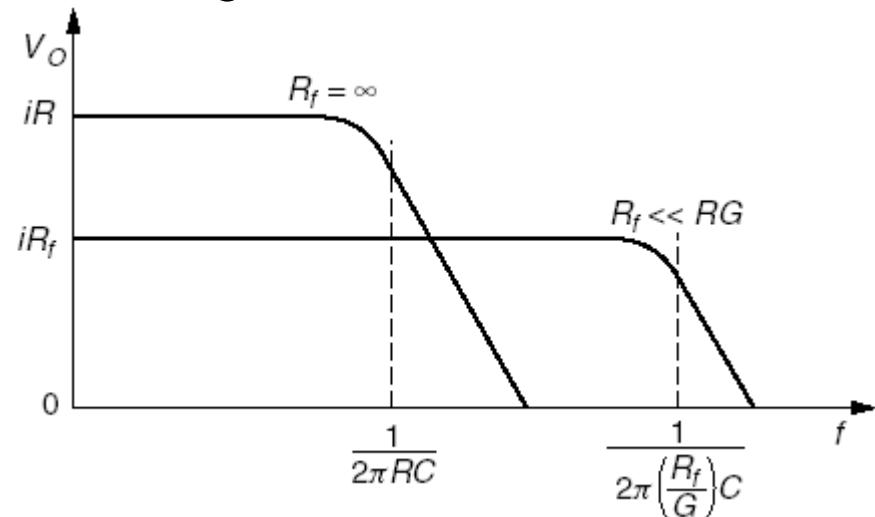
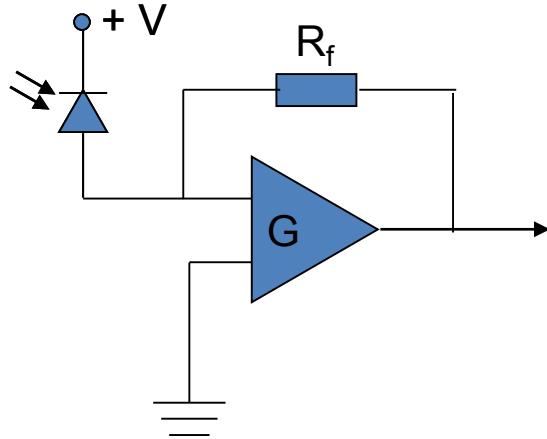
$$V = \frac{i + i_f}{1/R + j\omega C}$$

$$V_o = -GV$$

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại chuyển trở kháng:



- Hoạt động: V_0 tăng $\Rightarrow i_f$ tăng \Rightarrow tăng V qua R và C \Rightarrow giảm V_0
- Điện áp đầu ra:

$$V_O = -\frac{R_f i}{1 + \frac{1}{G} + \frac{R_f}{RG} + j\omega C \frac{R_f}{G}}$$

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại chuyển trở kháng:

- Điện áp đầu ra:

Khi chọn $G \gg 1$ and $RG \gg R_f \rightarrow V_O = -\frac{R_f i}{1 + j\omega C(R_f/G)}$

- Tần số cắt:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_f/G)C}$$

Nếu $R_f \ll RG \rightarrow f_c \gg \frac{1}{2\pi RC}$

- Nhận xét:

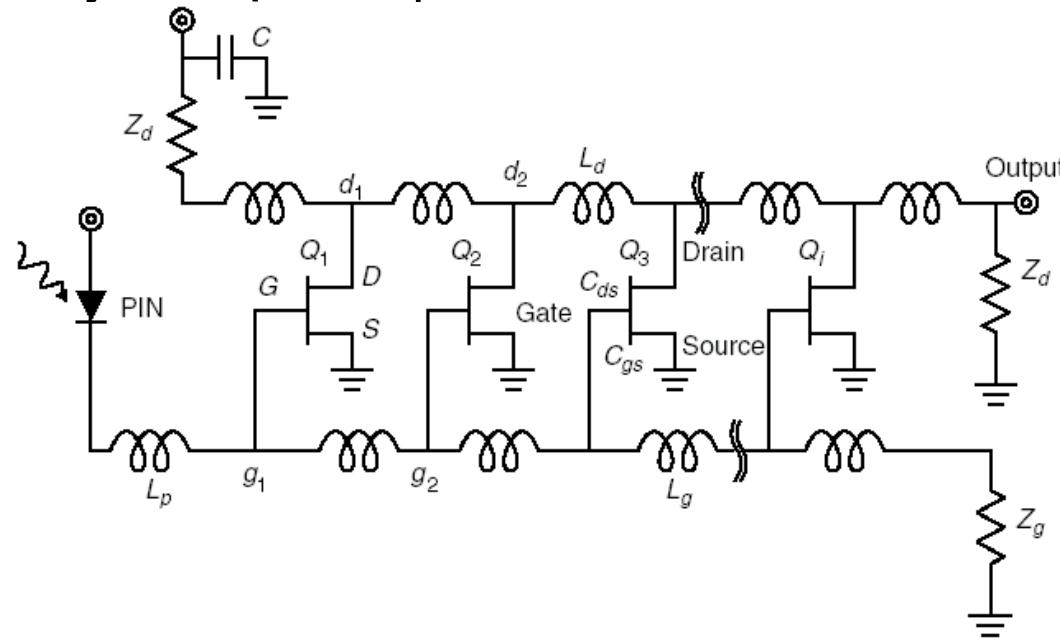
- ✓ Tín hiệu đầu ra lớn
- ✓ Đảm bảo độ rộng băng tần lớn không cần bộ cân bằng
- ✓ Giảm khả năng bão hòa bộ khuyếch đại \rightarrow tăng dải động

Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại tốc độ cao:
- Sử dụng HZ hoặc TZ với xem xét đặc biệt
- Sử dụng bộ khuyếch đại phân bố:

Các bộ khuyếch đại FET phân bố hình thành 2 đường truyền giả



Thiết kế bộ thu quang

- **Bộ tiền khuyếch đại**

- Bộ tiền khuyếch đại tốc độ cao:

Các cuộn cảm L_g kết nối với cổng của các FET và điện dung cổng-nguồn C_{gs} hình thành 1 đường truyền dẫn có trở kháng:

$$Z_g = \sqrt{L_g/C_{gs}},$$

Các cuộn cảm L_d kết nối với máng của các FET và các tụ điện máng-nguồn C_{ds} hình thành 1 đường truyền dẫn có trở kháng:

$$Z_d = \sqrt{L_d/C_{ds}}.$$

Đường truyền dẫn có trở kháng phối hợp với trở kháng đặc trưng của đường truyền để loại bỏ phản xạ ở tất cả các tần số

- Tần số cắt giới hạn băng tần của bộ thu:

$$f_{cg} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_g C_{gs}}} = \frac{1}{\pi Z_g C_{gs}}$$

Thiết kế bộ thu quang

• Kênh tuyển tính

- Bao gồm: bộ khuếch đại chính và bộ lọc thông thấp
- Hệ số khuếch đại được điều chỉnh tự động để giới hạn điện áp trung bình đầu ra tới một mức xác định (tương ứng với mức công suất quang trung bình đi vào bộ thu)
- Bộ lọc thông thấp tạo dạng xung điện → Mục đích: giảm nhiễu mà không gây ra ISI
- Độ rộng băng tần bộ lọc: $\Delta f < B$, → Độ rộng băng tần bộ thu thường được xác định bởi bộ lọc
- Điện áp đầu ra: $V_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} z_T(t-t')I_p(t')dt'$,
- Miền tần số $\tilde{V}_{\text{out}}(\omega) = Z_T(\omega)\tilde{I}_p(\omega)$,
 Z_T – trở kháng tổng, I_p – dòng quang điện đầu vào

Thiết kế bộ thu quang

- Kênh tuyến tính

- Trở kháng tổng được xác định bởi hàm truyền của các thành phần trong bộ thu: $Z_T(\omega) = G_p(\omega)G_A(\omega)H_F(\omega)/Y_{in}(\omega)$,
 Y_{in} – độ dẫn đầu vào; G_p , G_A , H_F – hàm truyền của bộ tiền khuyếch đại, bộ khuyếch đại chính và bộ lọc tương ứng
- Phổ xung chuẩn hóa đầu ra: $H_{out}(\omega) = H_T(\omega)H_p(\omega)$,
 H_T – hàm truyền tổng của kênh tuyến tính $H_T(\omega) = Z_T(\omega)/Z_T(0)$

ISI nhỏ nhất khi H_{out} tương ứng với hàm truyền của bộ lọc raised-cosine:

$$H_{out}(f) = \begin{cases} \frac{1}{2}[1 + \cos(\pi f/B)], & f < B, \\ 0, & f \geq B, \end{cases}$$

→ Đáp ứng xung: $h_{out}(t) = \frac{\sin(2\pi Bt)}{2\pi Bt} \frac{1}{1 - (2Bt)^2}$.

$h_{out}(t)$ tương ứng với dạng xung điện áp $V_{out}(t)$ thu được ở mạch quyết định

Thiết kế bộ thu quang

- Kênh tuyến tính

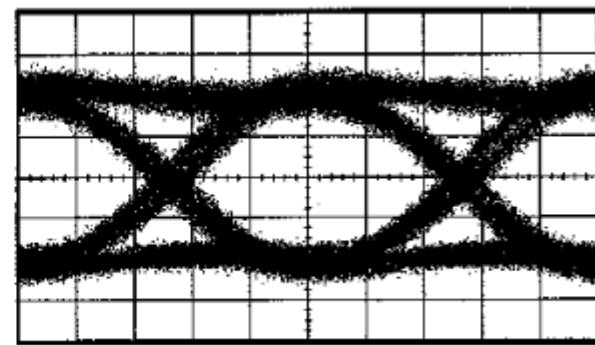
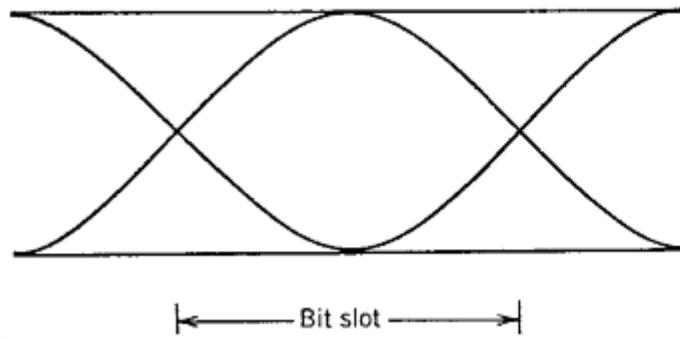
- Hàm truyền kênh tuyến tính:

$$H_T(f) = H_{\text{out}}(f)/H_p(f).$$

- Đối với luồng bit NRZ lý tưởng: $H_p(f) = B \sin(\pi f/B)/\pi f,$

$$\rightarrow H_T(f) = (\pi f/2B) \cot(\pi f/2B).$$

- Trong thực tế, dạng xung đầu vào không phải là xung vuông → luôn có ISI xảy ra



Thiết kế bộ thu quang

• Mạch quyết định

- Phần phục hồi dữ liệu bao gồm: mạch quyết định và mạch khôi phục đồng hồ
- Mạch khôi phục đồng hồ: tách thành phần phô $f = B$ từ tín hiệu thu được \rightarrow cung cấp thông tin về khe thời gian bit ($T_B = 1/B$) và đồng bộ cho mạch quyết định
 - Đối với tín hiệu RZ: sử dụng bộ lọc băng thông hẹp để tách
 - Đối với tín hiệu NRZ: lấy bình phương và tinh chỉnh tại $f = B/2$, qua bộ lọc thông cao.
- Mạch quyết định: so sánh đầu ra kênh tuyển tính với một mức ngưỡng tại thời điểm lấy mẫu \rightarrow quyết định đầu ra là bit 1 hoặc 0
Thời điểm lấy mẫu tốt nhất là điểm tại đó độ khác biệt mức tín hiệu giữa bit 1 và 0 đạt cực đại (Có thể thấy rõ qua mắt)

Nhiễu trong bộ thu quang

- **Nhiễu nổ**

- Nguyên nhân:

Quá trình lượng tử hóa điện tích thành các hạt q hoặc tương đương với quá trình lượng tử hóa năng lượng ánh sáng thành các hạt photon.



Flow of electron “beans” generates shot noise.

Nhiễu trong bộ thu quang

• Nhiễu nổ

- Các photon tới hoặc quá trình sinh các hạt tải bởi các photon là ngẫu nhiên được mô tả bởi thống kê Poisson:

Xác suất để một cặp hạt tải sinh ra trong khoảng dt:

$$\rho(t)dt = \frac{RP(t)}{q}dt$$

→ Tổng số hạt tải sinh ra trong khoảng thời gian $t \div t+T$ là một biến ngẫu nhiên.

- Số lượng hạt tải trung bình:

$$\bar{N} = \frac{\eta\lambda}{hc} \int_t^{t+T} P(t)dt = \frac{\eta\lambda}{hc} E$$

trong đó E – năng lượng tổng của xung trong khoảng thời gian $t \div t+T$

Nhiễu trong bộ thu quang

- **Nhiễu nổ**

- Xác suất để n cặp hạt tản sinh ra trong khoảng thời gian T:

$$P(N = n) = \frac{\bar{N}^n e^{-\bar{N}}}{n!} = \frac{\bar{N}^n e^{-\frac{n\lambda E}{hc}}}{n!}$$

- Nhiễu nổ là sự biến đổi ngẫu nhiên của dòng điện tử được sinh ra tại các thời điểm khác nhau:
- Dòng quang điện sinh ra: $I(t) = I_p + i_s(t)$,
trong đó $I_p = RP$ là dòng quang điện trung bình, $i_s(t)$ là thành phần thăng giáng dòng liên quan đến nhiễu nổ
- Hàm tự tương quan của $i_s(t)$:

$$\langle i_s(t)i_s(t + \tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} S_s(f) \exp(2\pi if\tau) df,$$

Nhiễu trong bộ thu quang

- **Nhiễu nổ**

- Mật độ phô của nhiễu nổ là không đổi và được xác định:

$$S_s(f) = qI_p$$

- Phương sai nhiễu:

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

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

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

trong đó Δf là độ rộng băng tần nhiễu hiệu dụng

I_p – dòng trung bình đầu ra photodiode, σ_s – dòng nhiễu rms

Nhiễu trong bộ thu quang

- **Nhiễu nổ**

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

$$I = I_p + I_b + I_d$$

trong đó I_p – dòng quang điện sinh ra do ánh sáng tới, I_b – dòng sinh ra do bức xạ nền, I_d – dòng tối sinh ra khi không có bức xạ ánh sáng tín hiệu đi vào.

- Đối với APD: quá trình nhân thác cũng đóng góp nhiều

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

trong đó F_A - hệ số nhiễu trội, là hàm của M và phụ thuộc vào vật liệu, dạng cường độ trường E và tốc độ ion hóa của các hạt tại.

Nhiễu trong bộ thu quang

- Nhiễu nồng

- Hệ số nhiễu trội:

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

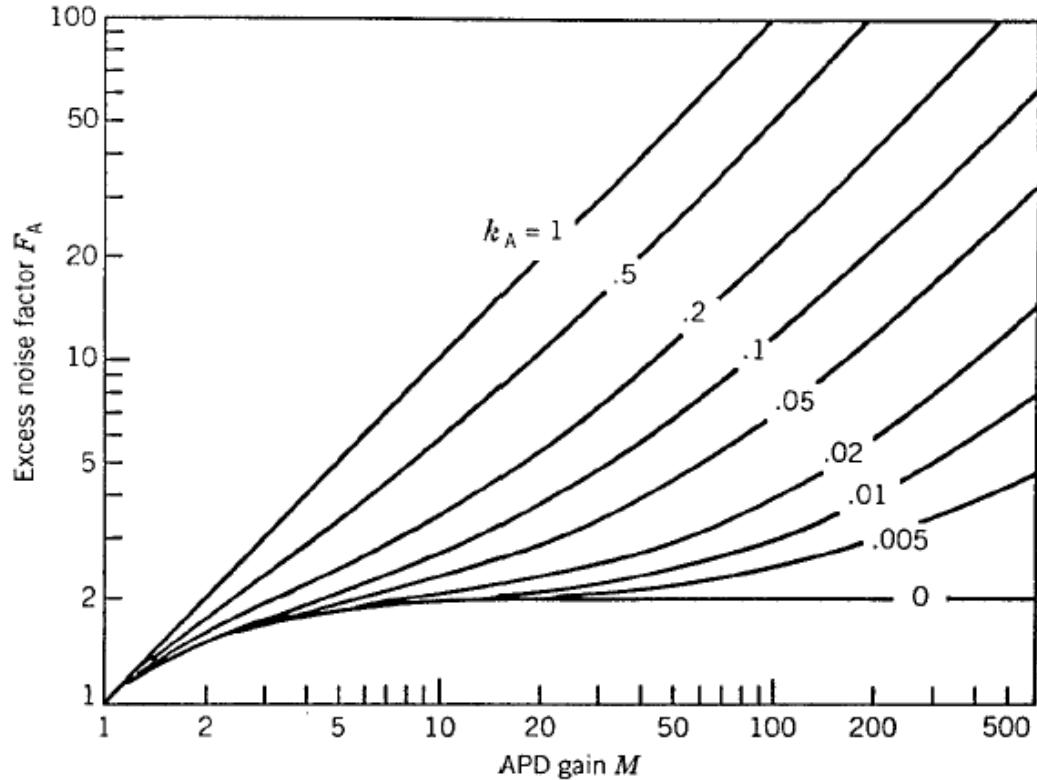
Gần đúng:

$$F_A \approx M^x$$

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

Ge: $x \sim 1$

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



Nhiễu trong bộ thu quang

• Nhiễu nhiệt

- Tại một nhiệt độ xác định: các điện tử chuyển động ngẫu nhiên trong vật dẫn (điện trở) → gây ra thăng giáng dòng (thành phần nhiễu bỗ xung gọi là nhiễu nhiệt – nhiễu Johnson)
- Dòng quang điện sinh ra: $I(t) = I_p + i_s(t) + i_T(t)$,
 i_T – sự thăng giáng dòng gây ra bởi nhiễu nhiệt
- Mật độ phỗ nhiễu:

$$S_T(f) = 2k_B T / R_L,$$

k_B – hằng số Boltzman, T – nhiệt độ tuyệt đối (K), R_L – điện trở tải

- Phương sai nhiễu nhiệt:

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



Nhiễu trong bộ thu quang

• Nhiễu nhiệt

- Bộ thu quang chứa nhiều thành phần điện khác nhau → bỗ xung nhiễu nhiệt.
- Nhiễu bộ khuyếch đại: chủ yếu nhiễu nhiệt, lượng nhiễu bỗ xung phụ thuộc vào kiểu bộ tiền khuyếch đại và bộ khuyếch đại sử dụng.
- Nhiễu nhiệt ở các bộ khuyếch đại khác nhau được đặc trưng qua đại lượng F_n – hình ảnh nhiễu bộ khuyếch đại:

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

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

Nhiễu trong bộ thu quang

- **Nhiễu tổng**

- Dòng nhiễu tổng: cộng các đóng góp của nhiễu nổ và nhiễu nhiệt.
- Các thành phần $i_s(t)$ và $i_T(t)$ là quá trình ngẫu nhiên độc lập thống kê gần đúng dạng Gauss.
- Phương sai dòng nhiễu tổng:
$$\sigma^2 = \langle (\Delta I)^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_T^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f + (4k_B T / R_L)F_n\Delta f.$$

Nhiễu trong bộ thu quang

- Tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR)

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

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

- Đối với các bộ thu sử dụng PIN:

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

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

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

- Giới hạn bởi nhiễu nổ ($\sigma_T^2 \ll \sigma_s^2$): khi công suất quang thu lớn

$$\text{SNR} = \frac{RP_{\text{in}}}{2q\Delta f} = \frac{\eta P_{\text{in}}}{2hv\Delta f}.$$

Nhiễu trong bộ thu quang

- Tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR)

- Đối với các bộ thu sử dụng APD:

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

$$\Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{\left(\frac{\eta e}{h\nu}P_s M\right)^2}{2eB(I_s + I_d)M^{(2+x)} + 4kTB/R_L}$$

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

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

- Giới hạn bởi nhiễu nổ ($\sigma_T^2 \ll \sigma_s^2$): khi công suất quang thu lớn

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

- Độ khuyếch đại tối ưu của APD: tại đó SNR đạt cực đại

$$k_A M_{\text{opt}}^3 + (1 - k_A) M_{\text{opt}} = \frac{4k_B T F_n}{q R_L (R P_{\text{in}} + I_d)}.$$

Nhiễu trong bộ thu quang

- Công suất nhiễu tương đương (NEP)

- Công suất thu nhỏ nhất được yêu cầu để SNR = 1

$$P_{s \min} = \frac{hv}{\eta e} \sqrt{2eI_dM^x + \frac{4kT}{M^2R_L}} \sqrt{B} \quad \text{Trong đó: } I_p \ll I_d$$

- Công suất thu nhỏ nhất trên 1 đơn vị băng tần được yêu cầu để SNR = 1: $P_{s \min} = \text{NEP} \cdot \sqrt{B}$

$$\text{NEP} = \frac{hv}{\eta e} \sqrt{2eI_dM^x + \frac{4kT}{M^2R_L}} \quad \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$$

- Khi bỏ qua I_d và $M = 1$:

$$\text{NEP} = \frac{P_{\text{in}}}{\sqrt{\Delta f}} = \left(\frac{4k_BTF_n}{R_L R^2} \right)^{1/2} = \frac{hv}{\eta q} \left(\frac{4k_BTF_n}{R_L} \right)^{1/2}$$

Tính năng bộ thu quang

- Tỉ số lỗi bit (BER)

- Tính năng bộ thu được đặc trưng bởi độ nhạy bộ thu
- Bộ thu có độ nhạy cao hơn là bộ thu đòi hỏi công suất quang thu nhỏ hơn nhưng vẫn đảm bảo tính năng yêu cầu.
- Đối với hệ thống số: tính năng thể hiện qua tỉ số lỗi bit – xác suất lỗi tại mạch quyết định bộ thu

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{Bt}$$

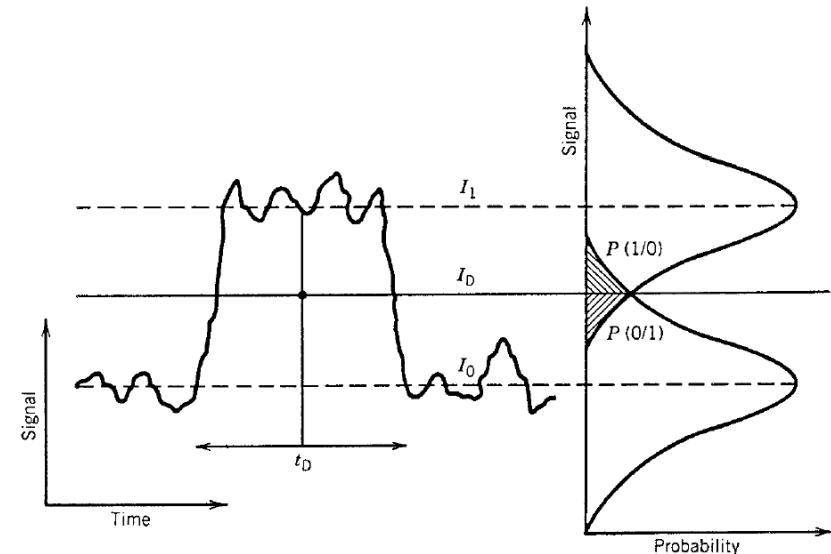
- Tín hiệu đầu vào mạch quyết định có giá trị được lấy mẫu thăng giáng xung quanh giá trị trung bình I₁ hoặc I₀
 - I₁ - Dòng trung bình tương ứng với bit 1
 - I₀ - Dòng trung bình tương ứng với bit 0

Tính năng bộ thu quang

- Tỉ số lỗi bit (BER)

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

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = p(1)P(0|1) + p(0)P(1|0)$$



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

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

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

Khi các bit 1 và 0 có xác suất xuất hiện như nhau \rightarrow

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



Tính năng bộ thu quang

- Tỉ số lỗi bit (BER)

- $P(0/1)$ & $P(1/0)$ phụ thuộc vào hàm mật độ xác suất $p(I)$
- Gần đúng các dòng nhiễu là biến ngẫu nhiên Gauss ta có:

$$P(0|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left[-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)$$

$$P(1|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left[-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right)$$

trong đó:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy.$$

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

- BER phụ thuộc vào ngưỡng quyết định I_D .

Tính năng bộ thu quang

- Tỉ số lỗi bit (BER)

- Tối ưu I_D để BER nhỏ nhất

$$\frac{(I_D - I_0)^2}{2\sigma_0^2} = \frac{(I_1 - I_D)^2}{2\sigma_1^2} + \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)$$

- Gần đúng : $Q = \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1} = \frac{I_D - I_0}{\sigma_0} \quad \rightarrow \quad I_D = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

- Trong giới hạn nhiễu nhiệt $\sigma_1 \approx \sigma_0$ ($\sigma_t \gg \sigma_s$) :

$$I_D = \frac{I_1 + I_0}{2}$$

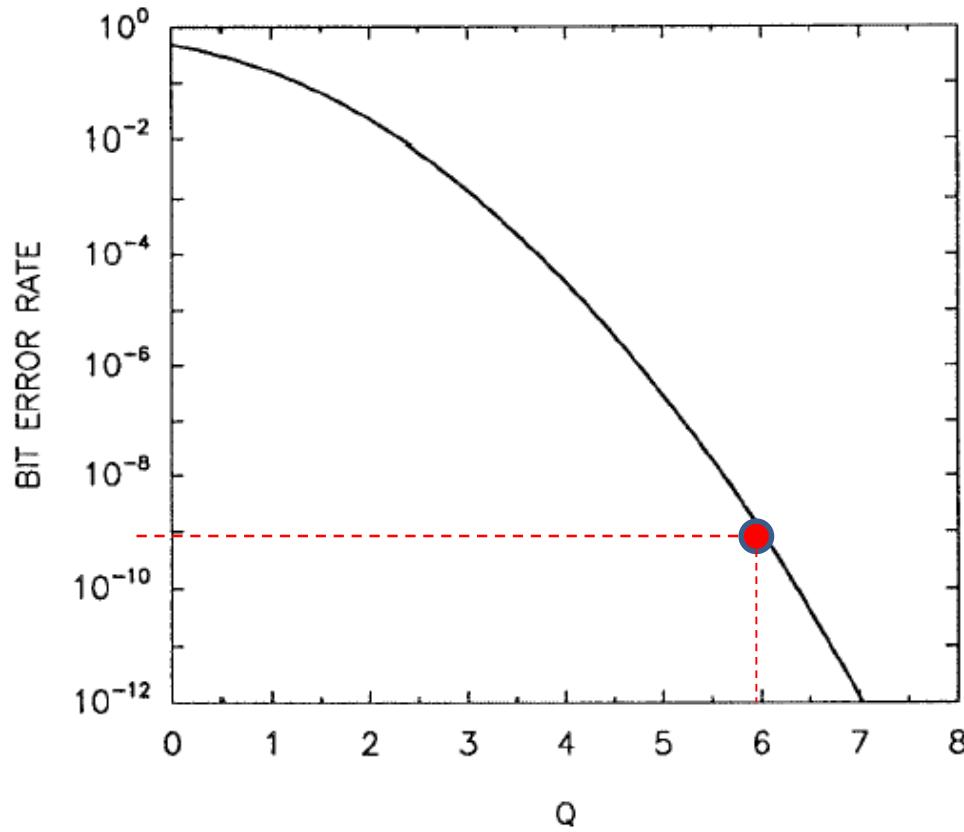
- Tại ngưỡng tối ưu: $BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$

Tính năng bộ thu quang

- Tỉ số lỗi bit (BER)

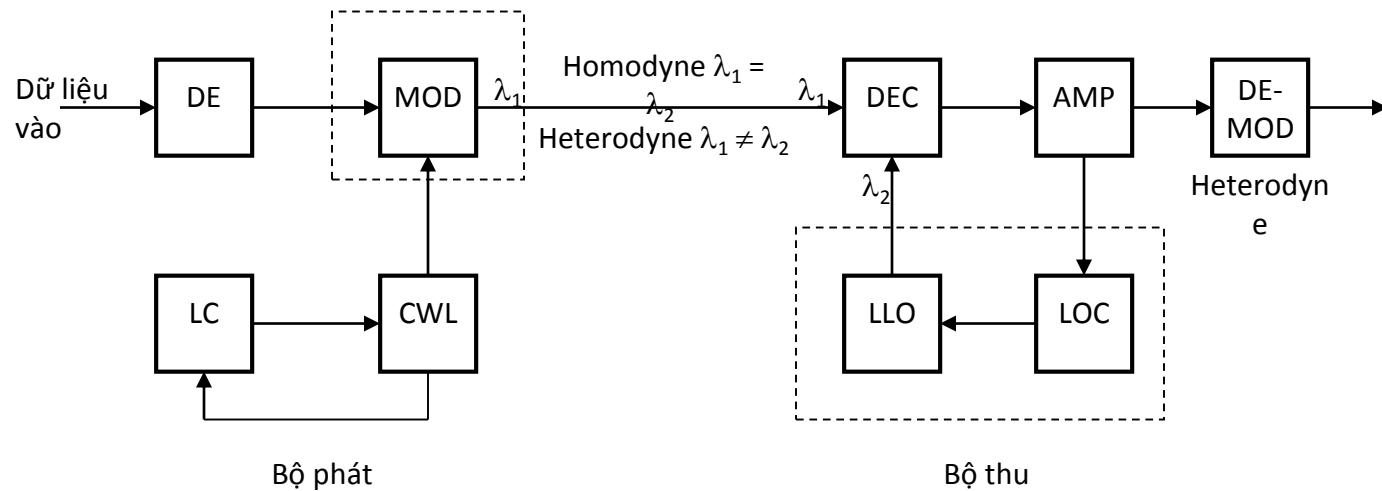
- Gần đúng ($Q > 3$) :

$$BER \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q}$$



Bộ thu quang coherent

- Nguyên lý và sơ đồ khối tổng quát



Chức năng các khối:

- DE** (Drive Electronic): khối này thực hiện khuếch đại tín hiệu ngõ vào nhằm tạo tín hiệu có mức phù hợp với các khối phía sau.
- CWL** (Continuous Wave Laser): đây là bộ dao động quang sử dụng laser bán dẫn có độ rộng phổ hẹp phát ra ánh sáng liên tục có bước sóng λ1.

Bộ thu quang coherent

- Nguyên lý và sơ đồ khối tổng quát

- LC (laser control): khối này nhằm ổn định bước sóng phát ra của bộ dao động quang.
- MOD (Modulator): đây là khối điều chế quang, sử dụng kỹ thuật điều chế ngoài để tạo ra tín hiệu điều chế dạng ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying) hay PolSK (Polarization Shift Keying).
- LLO (Laser Local Oscillator): đây là bộ dao động nội tại bộ thu sử dụng laser bán dẫn tạo ra tín hiệu quang có bước sóng λ_2 .
- DEC (Detector): khối này thực hiện hai tính năng, đầu tiên sử dụng coupler FBT cộng tín hiệu thu được (λ_1) và tín hiệu tại chổ (λ_2). Sau đó đưa tín hiệu tổng tới photodiode để thực hiện tách sóng trực tiếp theo qui luật bình phương.
- LOC (Local Oscillator control): khối này nhằm điều khiển pha và tần số của tín hiệu dao động nội ổn định.
- AMP (Amplifier): khối này khuếch đại tín hiệu điện sau khi tách sóng quang.
- DEMOD (Demodulator): khối này chỉ cần thiết khi bộ thu hoạt động ở chế độ heterodyne.

Bộ thu quang coherent

- Tách sóng homodyne

- Trường tín hiệu:

$$E_s = A_s \exp[-i(\omega_0 t + \phi_s)],$$

- Trường tín hiệu dao động nội:

$$E_{\text{LO}} = A_{\text{LO}} \exp[-i(\omega_{\text{LO}} t + \phi_{\text{LO}})],$$

- Công suất quang đi vào PD: $P = |E_s + E_{\text{LO}}|^2.$

$$P(t) = P_s + P_{\text{LO}} + 2\sqrt{P_s P_{\text{LO}}} \cos(\omega_{\text{IF}} t + \phi_s - \phi_{\text{LO}}),$$

$$P_s = A_s^2, \quad P_{\text{LO}} = A_{\text{LO}}^2, \quad \omega_{\text{IF}} = \omega_0 - \omega_{\text{LO}}.$$

- Tách sóng homodyne:

$$I(t) = R_d(P_s + P_{\text{LO}}) + 2R_d\sqrt{P_s(t)P_{\text{LO}}} \cos(\phi_s - \phi_{\text{LO}}).$$

Dòng tín hiệu homodyne: $I_p(t) = 2R_d\sqrt{P_s(t)P_{\text{LO}}}.$



Bộ thu quang coherent

- Tách sóng heterodyne

- Dòng quang điện:

$$I(t) = R_d(P_s + P_{\text{LO}}) + 2R_d\sqrt{P_s P_{\text{LO}}} \cos(\omega_{\text{IF}}t + \phi_s - \phi_{\text{LO}}).$$

- Thành phần AC:

$$I_{\text{ac}}(t) = 2R_d\sqrt{P_s P_{\text{LO}}} \cos(\omega_{\text{IF}}t + \phi_s - \phi_{\text{LO}}).$$

- Sự cải thiện SNR thấp hơn 2 lần so với homodyne
 - Thiết kế bộ thu đơn giản hơn

Bộ thu quang coherent

- Tỉ số SNR

$$SNR = \frac{\langle I_p^2(t) \rangle}{\sigma^2} = \frac{\kappa \cdot 2R^2 \bar{P}_s P_{lo}}{2q(RP_{lo} + I_d)\Delta f + \sigma_T^2}$$

$\kappa = 1$ Heterodyne detection

$\kappa = 2$ Homodyne detection

– Nếu $P_{lo} \gg \frac{\sigma_T^2}{2qR\Delta f}$ và I_d là nhỏ →

$$SNR \approx \frac{\kappa R \bar{P}_s}{q \Delta f} = \frac{\kappa \eta \bar{P}_s}{hv \Delta f}$$

$$\Delta f = B / 2 \quad SNR = 2\kappa\eta N_p$$

BER trong hệ thống TTQ coherent

- So sánh độ nhạy các bộ thu quang coherent

Trong thực tế do ảnh hưởng của nhiễu nhiệt, nhiễu dòng tối ... →

$\bar{N}_p > 1000$ trong thu trực tiếp.

Đối với các bộ thu coherent: $\bar{N}_p < 100$

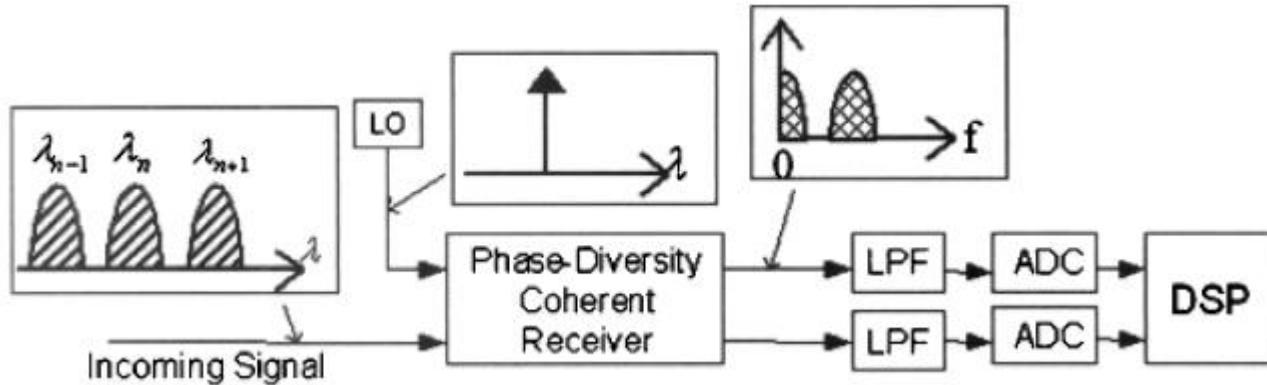
Modulation Format	Bit-Error Rate	N_p	\bar{N}_p
ASK heterodyne	$\frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\eta N_p/4})$	72	36
ASK homodyne	$\frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\eta N_p/2})$	36	18
PSK heterodyne	$\frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\eta N_p})$	18	18
PSK homodyne	$\frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{2\eta N_p})$	9	9
FSK heterodyne	$\frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\eta N_p/2})$	36	36
Direct detection	$\frac{1}{2}\exp(-\eta N_p)$	20	10

Các yếu tố ảnh hưởng

- Nhiễu pha
- Nhiễu cường độ
- Không tương xứng về phân cực
- Các yếu tố khác

Bộ thu quang coherent số

- Bộ thu quang coherent số
 - Cấu trúc: Bộ thu quang coherent, bộ chuyển đổi A/D, bộ xử lý tín hiệu số
 - Pha sóng mang được ước tính trong miền số
 - Các méo dạng tín hiệu trên đường truyền do tán sắc hoặc phi tuyến có thể được bù bằng DSP





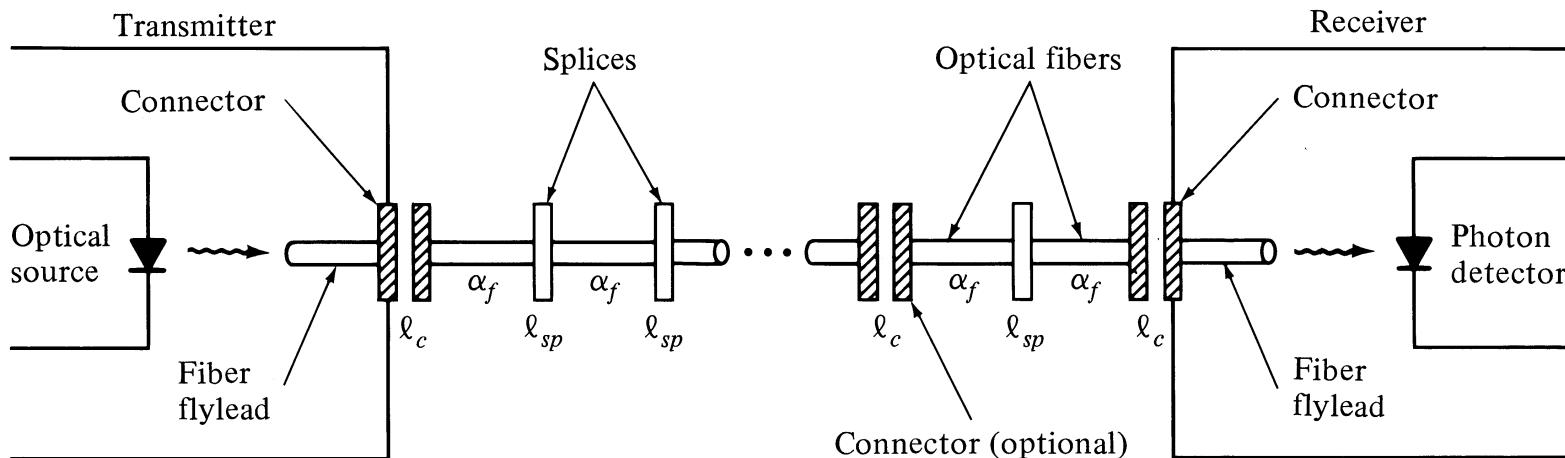
Chương 5

Hệ thống thông tin quang

Một số vấn đề về thiết kế

- Quỹ công suất quang

- Xác định lượng suy hao hoặc khoảng cách tối đa cho phép



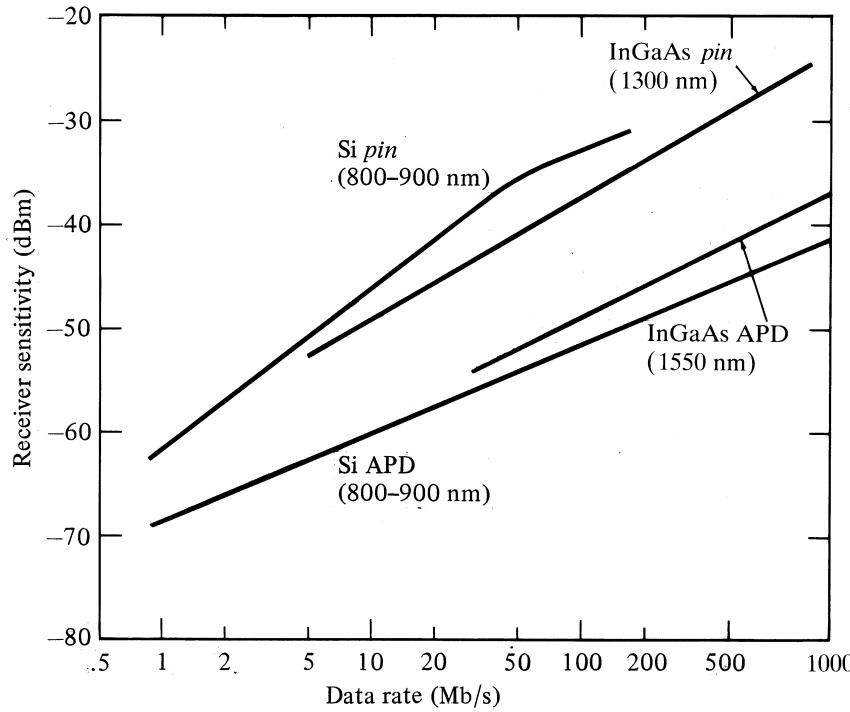
$$\bar{P}_{\text{tr}} = \bar{P}_{\text{rec}} + C_L + M_s,$$

$$C_L = \alpha_f L + \alpha_{\text{con}} + \alpha_{\text{splice}},$$

Một số vấn đề về thiết kế

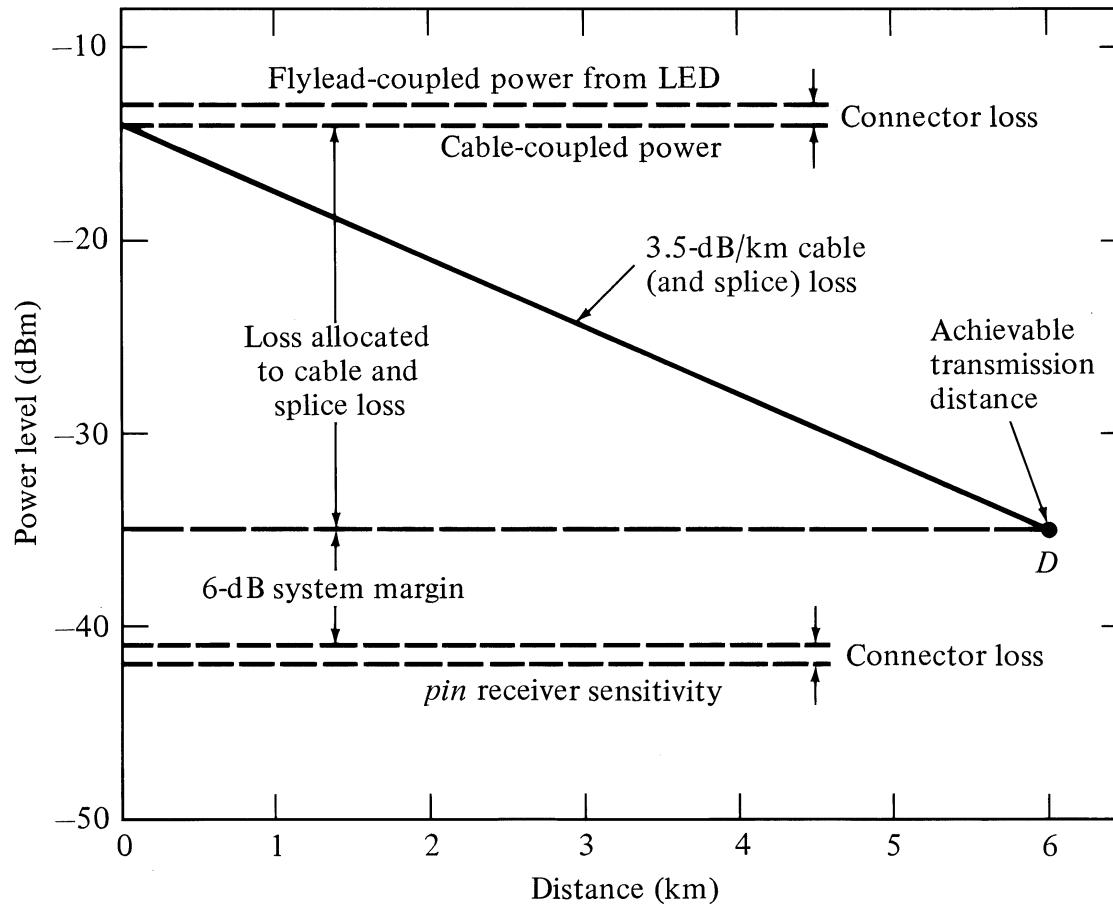
- Quỹ công suất quang

- Độ nhạy bộ thu và tốc độ:



Một số vấn đề về thiết kế

- Quỹ công suất quang



Một số vấn đề về thiết kế

- Quỹ thời gian lên

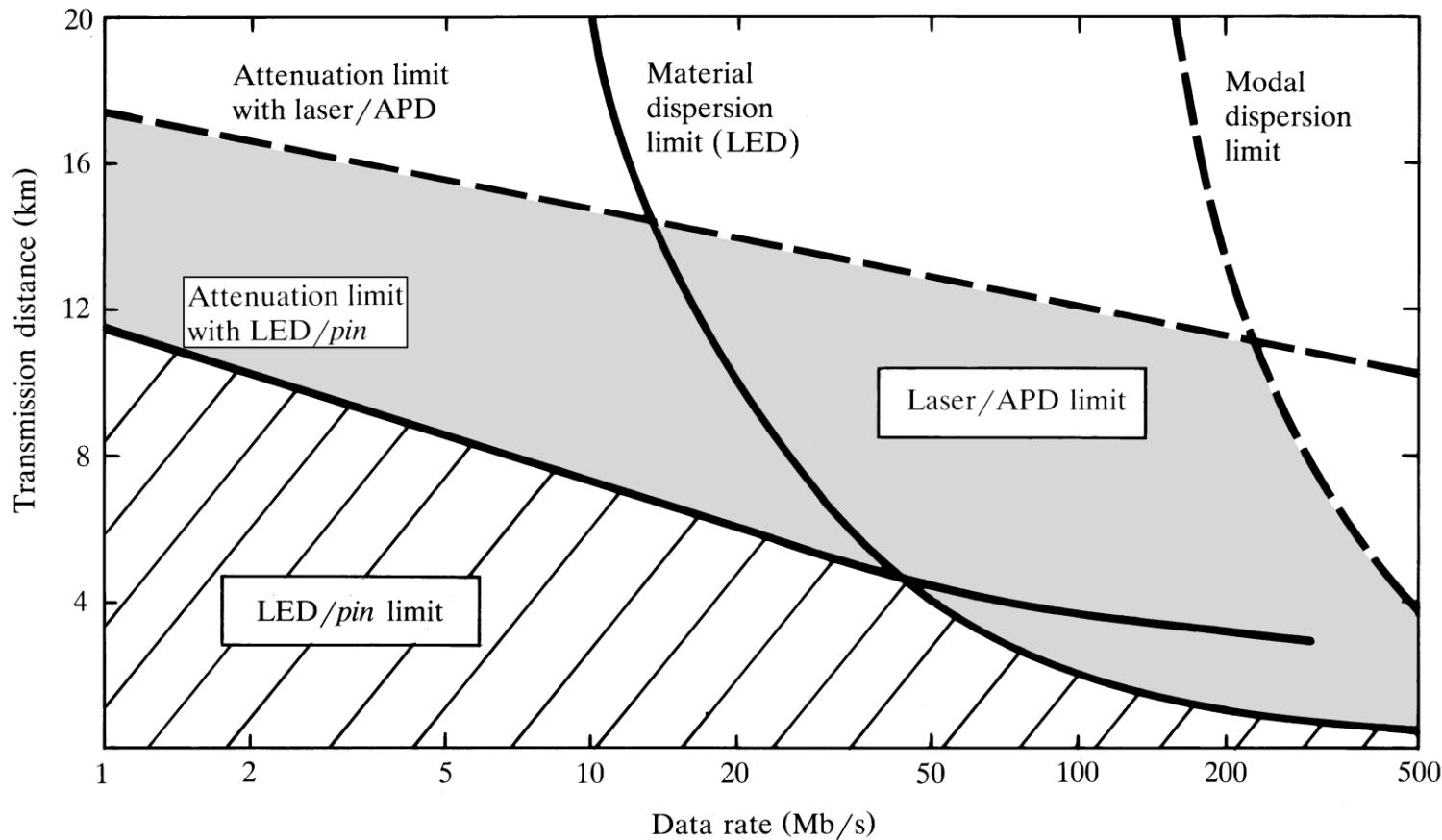
- Thời gian lên của hệ thống: $T_r = \frac{2.2}{2\pi\Delta f} = \frac{0.35}{\Delta f}$.
 - Hệ thống thiết kế cần đảm bảo: $T_r \leq \begin{cases} 0.35/B & \text{for RZ format,} \\ 0.70/B & \text{for NRZ format.} \end{cases}$
 - Thời gian lên tổng cộng: $T_r^2 = T_{\text{tr}}^2 + T_{\text{fiber}}^2 + T_{\text{rec}}^2$,
- $$T_{\text{fiber}}^2 = T_{\text{modal}}^2 + T_{\text{GVD}}^2. \quad T_{\text{GVD}} \approx |D|L\Delta\lambda,$$
- Ví dụ: Hệ thống 2 Gbit/s có L = 20 km sử dụng sợi đơn mode dùng nguồn LD tại 1,55 μm có độ rộng phổ = 0.5 nm. Biết $T_{\text{tr}} = 25 \text{ ps}$.

$$T_{\text{GVD}} = 170 \text{ ps} \quad T_{\text{rec}} = 250 \text{ ps}$$

$$T_r = 303 \text{ ps} < 350 \text{ ps}$$

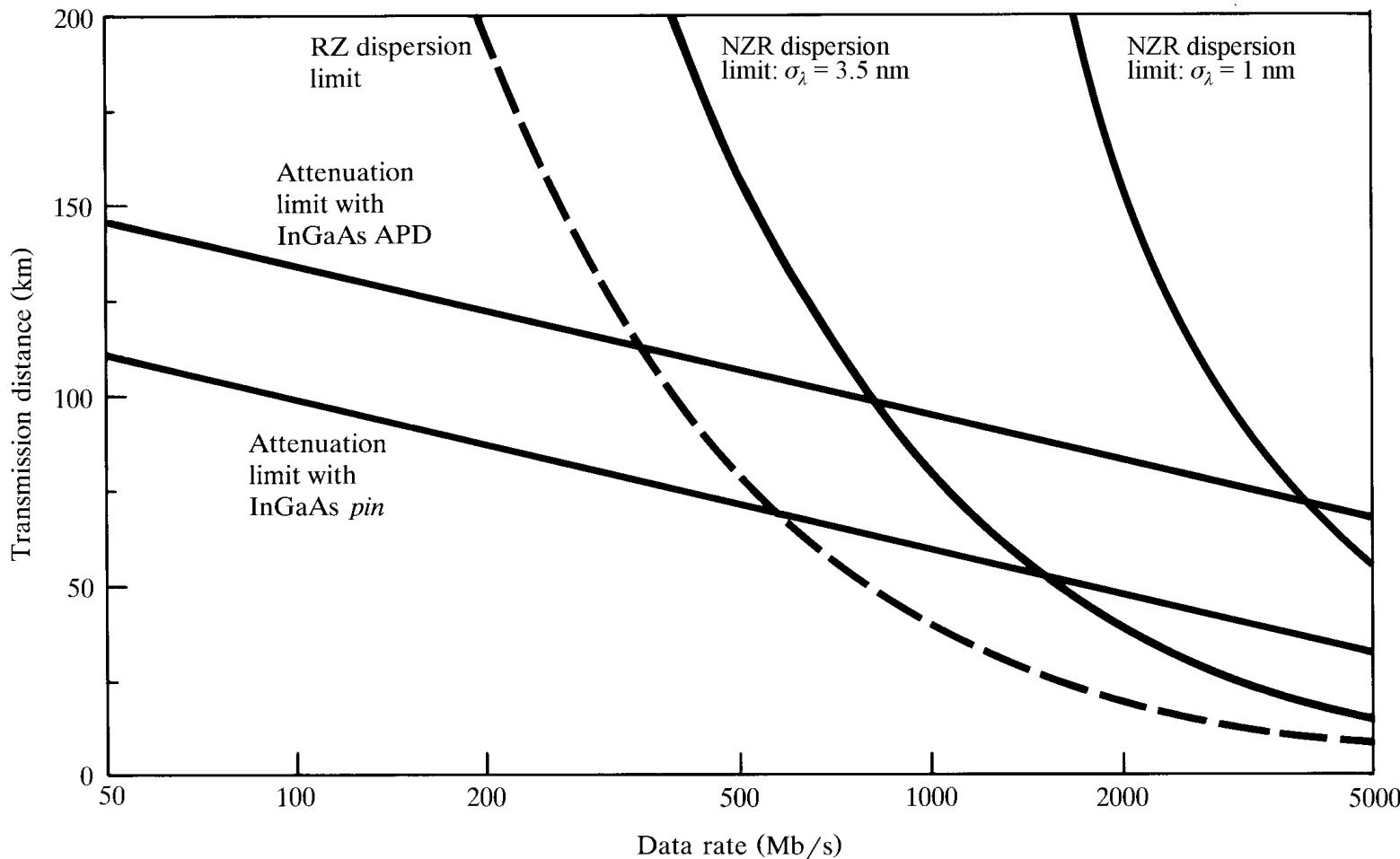
Một số vấn đề về thiết kế

• Giới hạn hệ thống



Một số vấn đề về thiết kế

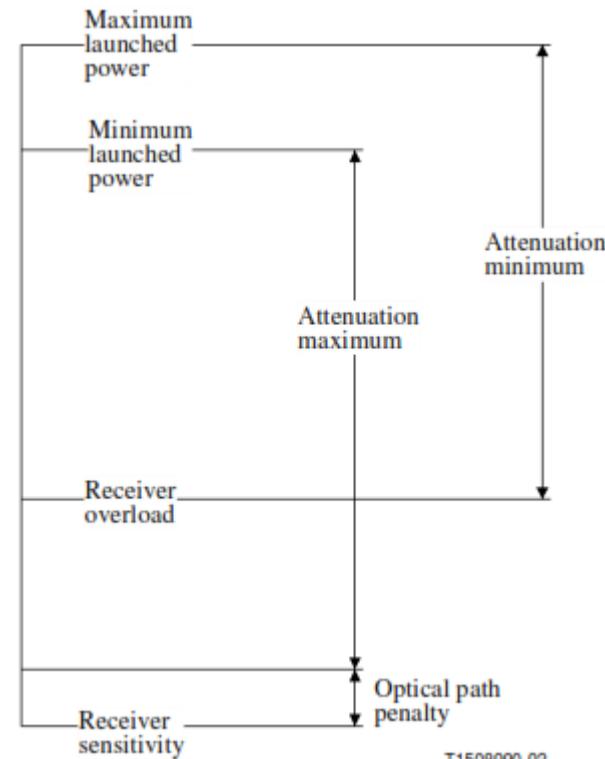
• Giới hạn hệ thống



Một số vấn đề về thiết kế

Table 4/G.957 – Parameters specified for STM-16 optical interfaces

	Unit	Values					
Digital signal Nominal bit rate	kbit/s	STM-16 according to Recommendation G.707 2 488 320					
Application code (Table 1)		I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3
Operating wavelength range	nm	1266 ^{a)} -1360	1260 ^{a)} -1360	1430-1580	1280-1335	1500-1580	1500-1580
Transmitter at reference point S		MLM	SLM	SLM	SLM	SLM	SLM
Source type							
Spectral characteristics:							
– maximum RMS width (σ)	nm	4	–	–	–	–	–
– maximum –20 dB width	nm	–	1	< 1 ^{b)}	1	< 1 ^{b)}	< 1 ^{b)}
– minimum side mode	dB	–	30	30	30	30	30
– suppression ratio							
Mean launched power:							
– maximum	dBm	–3	0	0	+3	+3	+3
– minimum	dBm	–10	–5	–5	–2	–2	–2
Minimum extinction ratio	dB	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
Optical path between S and R							
Attenuation range ^{c)}	dB	0-7	0-12	0-12	10-24 ^{c)}	10-24 ^{c)}	10-24 ^{c)}
Maximum dispersion	ps/nm	12	NA	b)	NA	1200-1600 ^{b),d)}	b)
Minimum optical return loss of cable plant at S, including any connectors	dB	24	24	24	24	24	24
Maximum discrete reflectance between S and R	dB	–27	–27	–27	–27	–27	–27
Receiver at reference point R							
Minimum sensitivity ^{c)}	dBm	–18	–18	–18	–27	–28	–27
Minimum overload	dBm	–3	0	0	–9	–9	–9
Maximum optical path penalty	dB	1	1	1	1	2	1
Maximum reflectance of receiver, measured at R	dB	–27	–27	–27	–27	–27	–27



T1508990-92



Một số vấn đề về thiết kế

Table 3/G.957 – Parameters specified for STM-4 optical interfaces

	Unit	Values							
		STM-4 according to Recommendation G.707 622 080							
Digital signal Nominal bit rate	kbit/s								
Application code (Table 1)		I-4		S-4.1	S-4.2	L-4.1		L-4.2	L-4.3
Operating wavelength range	nm	1261 ^{a)} -1360		1293-1334/ 1274-1356	1430-1580	1300-1325/ 1296-1330	1280-1335	1480-1580	1480-1580
Transmitter at reference point S									
Source type		MLM	LED	MLM	SLM	MLM	SLM	SLM	SLM
Spectral characteristics:									
– maximum RMS width (σ)	nm	14.5	35	4/2.5	–	2.0/1.7	–	–	–
– maximum –20 dB width	nm	–	–	–	1	–	1	< 1 ^{b)}	1
– minimum side mode suppression ratio	dB	–	–	–	30	–	30	30	30
Mean launched power:									
– maximum	dBm	–8		–8	–8	+2		+2	+2
– minimum	dBm	–15		–15	–15	–3		–3	–3
Minimum extinction ratio	dB	8.2		8.2	8.2	10		10	10
Optical path between S and R									
Attenuation range ^{c)}	dB	0-7		0-12	0-12	10-24		10-24	10-24
Maximum dispersion	ps/nm	13	14	46/74	NA	92/109	NA	b)	NA
Minimum optical return loss of cable plant at S, including any connectors	dB	NA		NA	24	20		24	20
Maximum discrete reflectance between S and R	dB	NA		NA	–27	–25		–27	–25
Receiver at reference point R									
Minimum sensitivity ^{c)}	dBm	–23		–28	–28	–28		–28	–28
Minimum overload	dBm	–8		–8	–8	–8		–8	–8
Maximum optical path penalty	dB	1		1	1	1		1	1
Maximum reflectance of receiver, measured at R	dB	NA		NA	–27	–14		–27	–14