Chương 6
LINH KIỆN CỦA HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG

6.1. Hệ thống truyền dẫn quang

6.1.1. Sơ đồ khối của các hệ thống thông tin

Sơ đồ khối cơ bản nhất của hệ thống thông tin điện và quang được mô tả trên hình 6-1a,b. Trong hình:

Nguồn tín hiệu: các dạng thông tin thông thường như tiếng nói, hình ảnh, số liệu, văn bản...

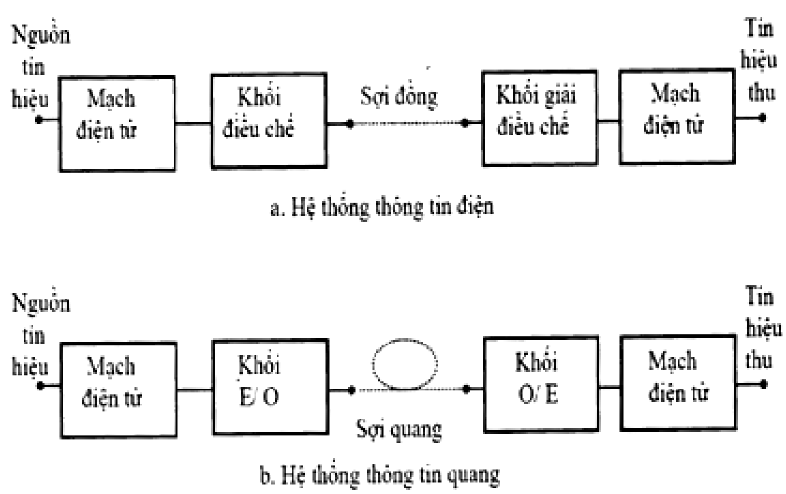
Mạch điện tử: có nhiệm vụ xử lý nguồn thông tin để tạo ra các tín hiệu điện dưới dạng analog hoặc digital.

Khối E/O: mạch biến đổi điện - quang có nhiệm vụ điều biến tín hiệu điện thành cường độ bức xạ ánh sáng để phát đi (biến đổi tín hiệu điện thành tín hiệu quang).

Sợi quang có nhiệm vụ truyền dẫn tín hiệu quang từ nơi phát đến nơi thu.

Khối O/E: mạch biến đổi quang - điện còn gọi là bộ thu quang có nhiệm vụ tiếp nhận ánh sáng từ sợi quang đưa đến và biến đổi trở lại thành tín hiệu điện như tín hiệu điện đã phát đi.

Tải tin: Trong hệ thống điện thì tải tin là các sóng điện từ cao tần, trong hệ thống quang tải tin là ánh sáng và cũng là sóng điện từ song có tần số rất cao ($10^{14} \div 10^{15}$ Hz) do vậy tải tin quang rất thuận lợi cho tải các tín hiệu băng rộng.

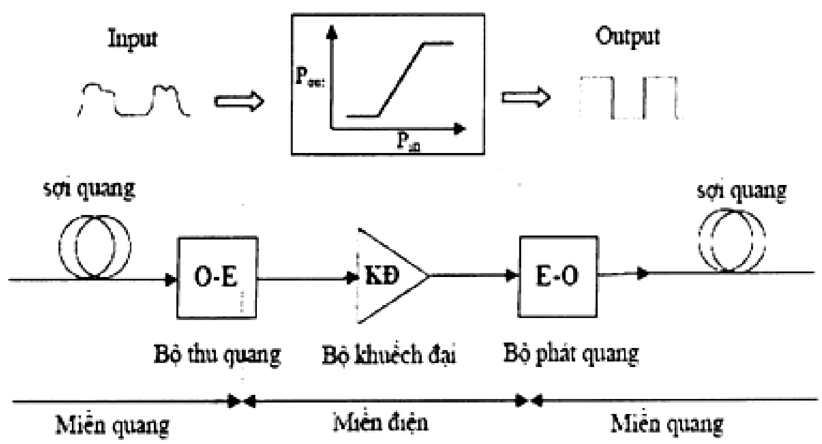


Hình 6.1. Hệ thống truyền dẫn quang

6.1.2. Trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater)

Suy hao của sợi quang là nguyên nhân giới hạn cự ly truyền của các hệ thống thông tin quang. Đối với các hệ thống truyền dẫn quang cự ly dài, giới hạn về suy hao được khắc phục bằng cách sử dụng các trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater). Trong các trạm lặp quang điện này (xem hình 1.1), quá trình khuếch đại tín hiệu quang được thực hiện qua nhiều bước. Đầu tiên, tín hiệu quang sẽ được biến đổi thành dòng điện bởi các bộ thu quang (optical receiver) sử dụng linh kiện tách sóng quang như PIN hay APD. Dòng quang điện thu được sẽ được tái tạo lại dạng xung, định thời và khuếch đại bởi các mạch phục hồi tín hiệu và mạch khuếch đại. Sau đó, tín hiệu điện sẽ được biến đổi thành tín hiệu quang thông qua các nguồn quang trong bộ phát quang (optical transmitter) và được truyền đi trong sợi quang.

Như vậy, quá trình khuếch đại tín hiệu được thực hiện trên miền điện.



Hình 6.2. Cấu trúc của một trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater)

Các trạm lặp quang điện đã được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền dẫn quang một bước sóng như hệ thống truyền dẫn quang SDH. Tuy nhiên, khi sử dụng cho các hệ thống truyền dẫn quang đa bước sóng như hệ thống WDM, rất nhiều trạm lặp quang điện cần được sử dụng để khuếch đại và tái tạo các kênh quang có bước sóng khác nhau. Điều này làm tăng độ phức tạp cũng như tăng giá thành của hệ thống truyền dẫn quang WDM.

6.1.3. Ưu điểm của hệ thống truyền dẫn quang

So với hệ thống thông tin điện , hệ thống thông tin quang có một số ưu điểm sau:

+ Sợi quang nhỏ, nhẹ hơn dây kim loại, dễ uốn cong, tốn ít vật liệu.

+ Sợi quang chế tạo từ thuỷ tinh thạch anh không bị ảnh hưởng của nước, axit, kiềm nên không bị ăn mòn. Đồng thời, sợi là chất điện môi nên cách điện hoàn toàn, tín hiệu truyền trong sợi quang không bị ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tới và cũng không gây nhiễu ra môi trường xung quanh.

+ Đảm bảo bí mật thông tin, không sợ bị nghe trộm.

+ Khả năng truyền được rất nhiều kênh trong một sợi quang có đường kính rất nhỏ. Tiêu hao nhỏ và không phụ thuộc tần số nên cho phép truyền dẫn băng rộng và tốc độ truyền lớn hơn nhiều so với sợi kim loại.

+ Giá thành rất rẻ.

6.2. Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM

6.2.1. Sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất

Như đã biết, theo lý thuyết dải năng lượng của vật chất, thì thông thường các hạt đều tồn tại ở mức cơ bản (E_k) vì mức này có năng lượng thấp nhất nên cũng bền vững nhất. Chỉ cần kích thích một năng lượng nào đó, ví dụ như quang năng, điện năng, nhiệt năng... thì các hạt ở mức cơ bản sẽ di chuyển lên mức năng lượng cao hơn, gọi là các mức kích thích (E_i). Các hạt chỉ tồn tại ở các mức kích thích một thời gian rất ngắn khoảng 10^{-8} giây rồi nó lại dịch chuyển về các mức năng lượng thấp hơn và phát ra ánh sáng, hay còn gọi là các photon. Photon phát ra theo định luật bảo toàn năng lượng:

$$h\nu = E_i - E_k$$

và ta có tần số bức xạ của ánh sáng tính theo công thức

$$\nu = \frac{E_i - E_k}{h}$$

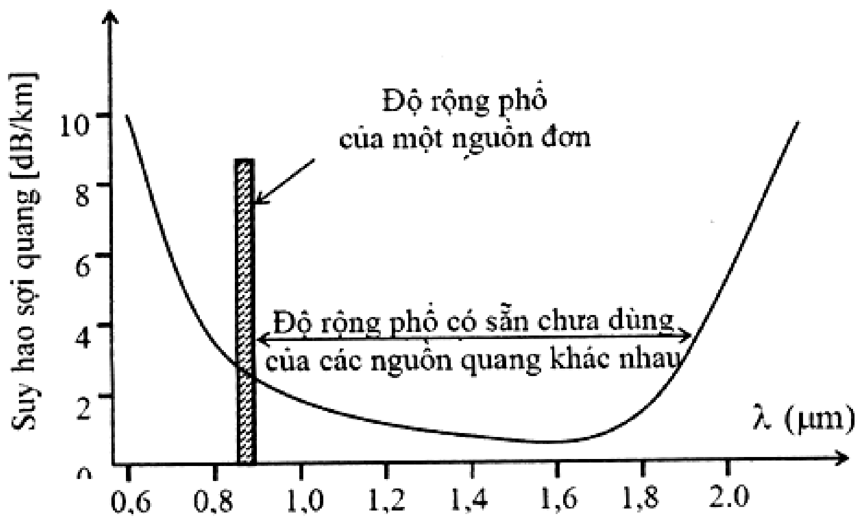
Trong đó:

- ν - tần số bức xạ của ánh sáng ($\nu = c/\lambda$).
- h - hằng số Plank ($h = 6,625.10^{-34}$ J.s $= 4,16.10^{-15}$ eV.s).
- c - vận tốc của ánh sáng ($c = 3.10^8$ m/s).
- λ - độ dài bước sóng của bức xạ ánh sáng phát ra.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\frac{E_i - E_k}{h}} = \frac{1240}{(E_i - E_k)}\left[\frac{\text{eV.nm}}{\text{eV}}\right] = \frac{1240}{E_G}\left[\frac{\text{eV.nm}}{\text{eV}}\right]$$

6.2.2. Khái niệm về kỹ thuật thông tin quang WDM

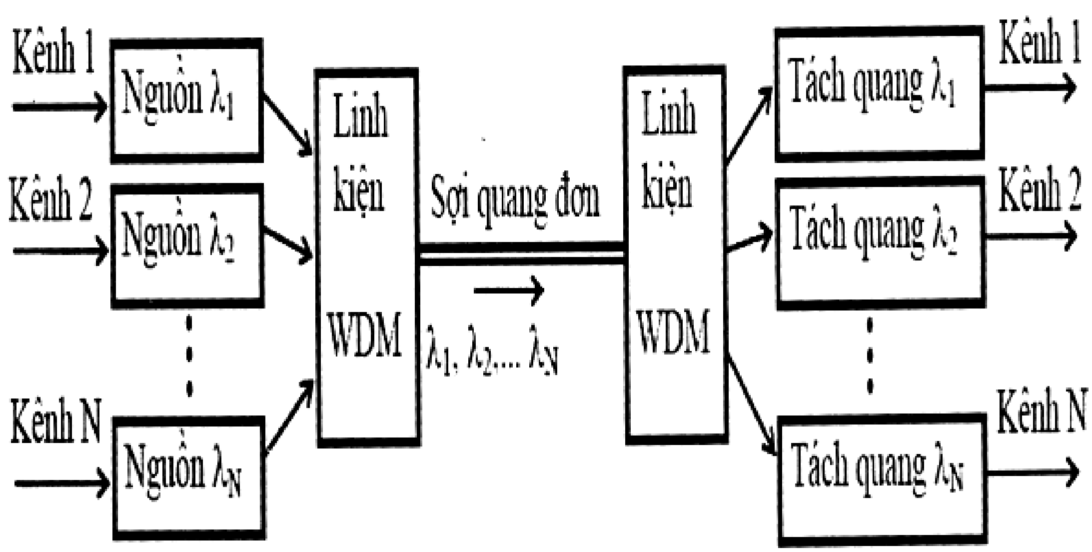
Bộ lọc quang liên quan đến kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng - WDM. Vì mỗi một nguồn sáng đơn sắc có độ rộng phổ hẹp, nên trong truyền dẫn nó chỉ sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của một sợi quang. Ghép kênh phân chia theo bước sóng sẽ tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.



Hình 6.3. Một nguồn quang đơn sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của phổ có sẵn của sợi quang ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.

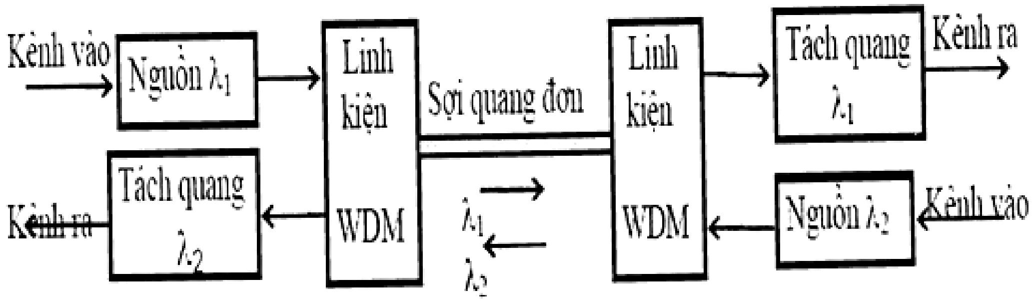
Ta thấy có rất nhiều vùng hoạt động phổ có thể thêm vào. Một cách lý tưởng, sự tăng đột biến dung lượng thông tin của một sợi quang có thể đạt được bằng việc truyền dẫn đồng thời các tín hiệu quang trên cùng một sợi quang từ nhiều nguồn ánh sáng khác nhau có các bước sóng đỉnh bức xạ đặt cách nhau một cách chính xác. Bởi mỗi nguồn sáng hoạt động tại một bước sóng đỉnh khác nhau, tính toàn vẹn của các tin tức độc lập từ mỗi nguồn được duy trì để việc chuyển đổi tuần tự sang tín hiệu điện ở đầu thu. Đây là cơ sở của ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM).

Hai cơ cấu WDM khác nhau mô tả trong hình sau:



Hình 6.4. Hệ thống WDM đơn hướng kết hợp N tín hiệu độc lập để truyền trên 1 sợi quang đơn.

Trong hình trên, linh kiện WDM đơn hướng được sử dụng để kết hợp các bước sóng mang tín hiệu khác nhau trên một sợi quang đơn tại một đầu và để tách chúng vào bộ tách quang thích hợp tại đầu kia.



Hình 6.5. Hệ thống WDM hai hướng, trong đó, hai bước sóng hoặc nhiều hơn được truyền đồng thời trong các hướng ngược nhau trên cùng một sợi quang.

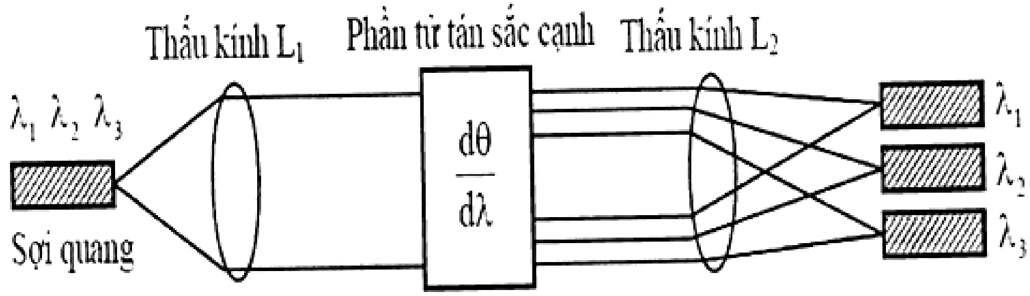
Sơ đồ hệ thống WDM hai hướng được mô tả trong hình trên.

Sơ đồ này gồm việc gửi tin tức trong một hướng tại một bước sóng λ_1 và đồng thời trong hướng ngược lại tại bước sóng λ_2.

Trong các hệ thống thông tin quang trong hai hình trên, các bộ ghép kênh phân chia theo bước sóng có hai loại được sử dụng rộng rãi nhất là các linh kiện tán sắc cạnh như các lăng kính hoặc các cách tử, và các bộ lọc màng mỏng hoặc các linh kiện tích hợp quang đơn mốt.

6.2.3. Bộ lọc quang bằng các linh kiện tán sắc (hay bộ ghép kênh tán sắc cạnh)

Sơ đồ của một bộ ghép kênh tán sắc cạnh được mô tả trong hình 6.6 đối với hệ thống 3 bước sóng sử dụng, ở đó $d\theta / d\lambda$ là độ tán sắc cạnh của linh kiện.



Hình 6.6. Sơ đồ biểu diễn một phần tử WDM tán sắc cạnh cho 3 bước sóng. Nhiều bước sóng có thể kết hợp hoặc phân chia với loại linh kiện này.

Khi linh kiện sử dụng như một bộ phận kênh, ánh sáng từ sợi quang đi ra được chuẩn trực bằng thấu kính L_1 (gọi là thấu kính chuẩn trực) và đi qua phần tử tán sắc cạnh và nó được phân chia thành các kênh có bước sóng đi vào các chùm tia có định hướng không gian khác nhau. Thấu kính L_2 (thấu kính hội tụ) sẽ hội tụ các tia đầu ra vào các sợi quang thu thích hợp hoặc các bộ tách quang thích hợp.

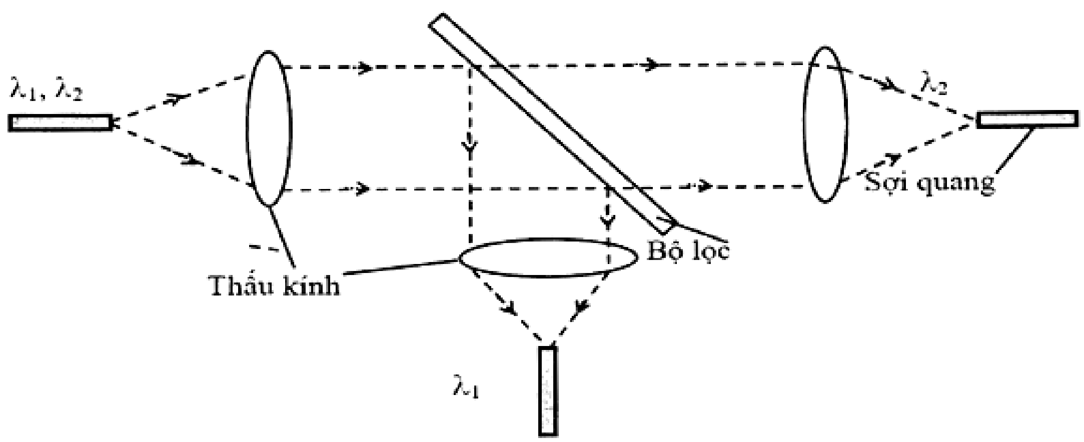
6.3. Bộ lọc quang màng mỏng

Trong phần này chúng ta sẽ nghiên cứu về bộ lọc quang màng mỏng. Hoạt động của một phần tử ghép kênh loại bộ lọc được mô tả trong hình 6.7 cho hoạt động của hai bước sóng.

Các bộ lọc được thiết kế để truyền ánh sáng cho một bước sóng cụ thể và để hoặc hấp thụ, hoặc phản xạ tất cả các bước sóng khác.

Các bộ lọc loại phản xạ thường được sử dụng vì tổn hao của các bộ lọc loại hấp thụ có xu hướng tăng cao hơn (cao hơn 1dB).

Bộ lọc phản xạ gồm một tấm kính phẳng, bên trên nó nhiều lớp màng mỏng chất cách điện khác nhau được lắng đọng tuỳ theo tính chọn lọc của bước sóng. Các bộ lọc này có thể sử dụng nối tiếp thành chuỗi để phân chia thêm các kênh bước sóng. Sự phức tạp cũng tăng theo số lượng các bộ lọc nối tiếp và sự tăng tổn hao tín hiệu cũng xảy ra với việc tăng thêm các bộ ghép kênh nối tiếp. Nhìn chung chỉ nên hạn chế hoạt động đến 2 hoặc 3 bộ lọc (có nghĩa là hoạt động 3 hoặc 4 kênh).

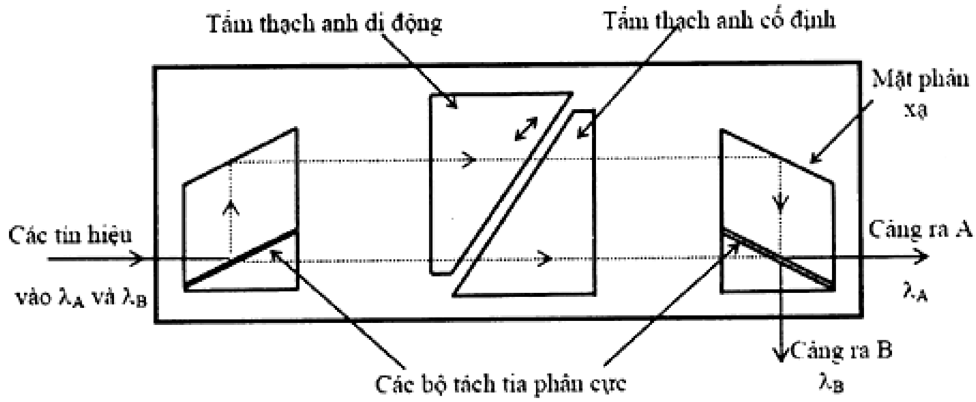


Hình 6.7. Bộ lọc màng mỏng nhiều lớp phản xạ sử dụng cho WDM.

Linh kiện này trong suốt tại bước sóng λ_2 và phản xạ tại bước sóng λ_1.

Trong thiết kế các hệ thống WDM, cần phải chú ý làm giảm đến mức thấp nhất các yếu tố gây ra sự giảm sút phẩm chất ngoài biên của đường truyền. Trên đây là các linh kiện WDM thụ động, độ chọn lọc bước sóng của chúng được cố định. Người ta cũng phát minh ra các phần tử WDM tích cực, các phần tử này được chuyển một cách tích cực hoặc được điều chỉnh theo bước sóng. Giữa các phần tử WDM tích cực là nguồn đa bước sóng và các tổ hợp tách quang, các laser có khả năng điều chỉnh bước sóng, và các bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng.

Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng (a wavelengthtunable-filter)



Hình 6.8. Ví dụ về bộ lọc điều chỉnh bước sóng. Một tấm thạch anh di động thay đổi độ dài tuyến đường đi qua tinh thể để thay đổi phổ ra hình sin.

Trong phương pháp này, các tín hiệu tin tức khác nhau được gửi vào các kênh tần số riêng của độ rộng băng B. Bằng việc sử dụng một bộ lọc với dải thông có độ rộng B mà nó có thể điều chỉnh trên khoảng tần số của các kênh này, người ta có thể chọn được kênh theo yêu cầu.

Ở đây, một phần tử đa cấp lưỡng chiết suất cấu tạo từ hai ống dẫn sóng bằng thạch anh (a birefringent multiple - order element) được đặt giữa hai bộ tách tia phân cực (polarizing beam splitters).

Công suất ra P của ánh sáng tại các cảng ra A và B liên hệ với công suất vào P_0 bằng công thức

$$P = \frac{P_0}{2}\left(1 \pm \cos\frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}\right)$$

Trong đó:

- Δn : độ chênh lệch giữa chiết suất thông thường và chiết suất khác thường của vật liệu lưỡng chiết.
- λ : độ dài bước sóng.
- Dấu $\pm$ liên quan đến các cảng A (dấu +) và cảng B (dấu -).

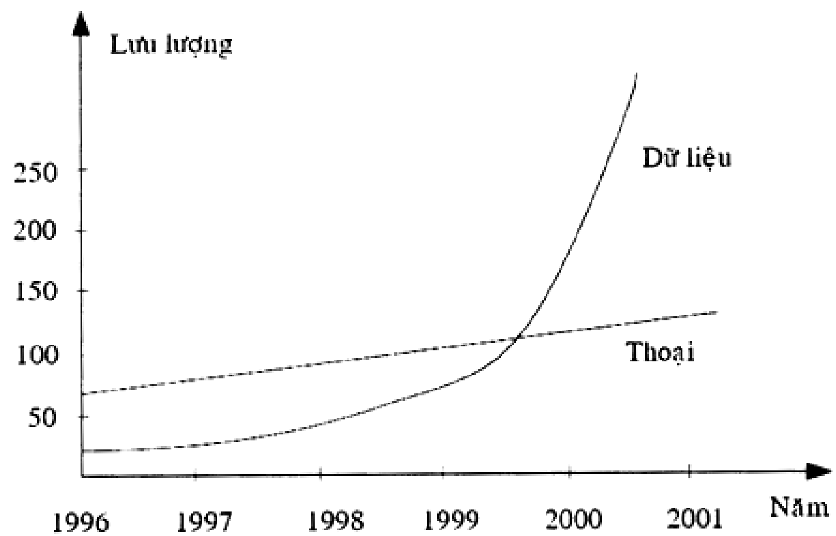
Sự biến đổi hình sin của phổ ra có thể được thay đổi bằng cách thay đổi độ dài đường truyền L đi qua tinh thể. Điều này đạt được bằng cách di chuyển một trong các tấm thạch anh lên trên hoặc xuống dưới. Sự thay đổi chiều dài theo cấp bậc chu kỳ quay phân cực sẽ xác định vị trí của kênh.

Vì tuyến quang là thuận nghịch, linh kiện này có thể được sử dụng như là bộ ghép kênh và hoặc như là bộ phân kênh đều được.

6.4. Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

6.4.1. Giới thiệu chung

Sự phát triển nhanh chóng của các mô hình truyền số liệu, đặc biệt là Internet đã làm bùng nổ nhu cầu tăng băng thông . Trong bối cảnh IP (Internet Protocol) đang nổi lên như là nền tảng chung của mọi loại hình dịch vụ trong tương lai, các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt buộc phải xem xét lại phương thức truyền dẫn TDM truyền thống, vốn tối ưu cho truyền thoại nhưng lại kém hiệu quả trong việc tận dụng băng thông.



Hình 6.9. Tương quan giữa nhu cầu truyền thoại và truyền số liệu

Tóm lại, ta phải giải quyết bài toán tăng băng thông cho viễn thông tương lai. Các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt đầu xét đến ba phương thức truyền dẫn sau:

1. Truyền dẫn ghép phân không gian SDM (Space Devision Multiplexing): đơn giản và không cần sự phát triển công nghệ, chỉ đơn thuần là tăng số lượng sợi quang, tốc độ truyền dẫn vẫn giữ nguyên. Ta có thể chọn SDM nếu trên tuyến truyền dẫn cần tăng băng thông đã có sẵn số lượng sợi quang chưa dùng và khoảng cách tuyến truyền dẫn là đủ ngắn để không cần dùng các bộ lặp, bộ khuếch đại. Nếu khoảng cách là xa, khi đó chi phí sẽ vụt tăng do mỗi hệ thống lắp thêm đều cần một số lượng bộ lặp, bộ khuếch đại... như hệ thống cũ.

2. Truyền dẫn ghép phân theo thời gian TDM (Time Devision Multiplexing)

Tăng tốc độ truyền dẫn lên trên sợi quang. Khi tiếp tục dùng phương thức truyền thống này, ta phải xem xét đến hai vấn đề:

Trước và khi truyền trên sợi quang. Trước khi chuyển thành tín hiệu quang để truyền đi, các linh kiện điện tử có khả năng xử lí với tốc độ bit tối đa là bao nhiêu?

Thực tế hiện nay cho thấy, ở đa số các mạng truyền dẫn, linh kiện điện tử có khả năng đáp ứng tốt đối với các dòng tín hiệu ở tốc độ 2.5 Gbps hoặc 10 Gbps. Như vậy thì chưa giải quyết trọn vẹn bài toán tăng băng thông.

Trong phòng thí nghiệm đã cho các linh kiện hoạt động ở tốc độ 40 Gbps hoặc 80 Gbps. Để TDM có thể đạt được những tốc độ cao hơn, các phương pháp thực hiện tách/ghép kênh trong miền quang, được gọi là phân kênh thời gian trong miền quang (Optical time Division Multiplexing - OTDM) đang được tích cực triển khai.

Các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm cho thấy OTDM có thể ghép được các luồng 10Gbit/s thành luồng 250Gbit/s. Nhưng khi đó, truyền trên sợi quang sẽ vấp phải các vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn: tán sắc sắc thể, tán sắc phân cực, phi tuyến tính.

3. Ghép phân theo bước sóng WDM (Wavelength Devision Multiplexing)

Ghép thêm nhiều bước sóng để có thể truyền trên một sợi quang, không cần tăng tốc độ truyền dẫn trên một bước sóng. Công nghệ WDM có thể mang đến giải pháp hoàn thiện nhất trong điều kiện công nghệ hiện tại.

Thứ nhất nó vẫn giữ tốc độ xử lý của các linh kiện điện tử ở mức 10 Gbps, bảo đảm thích hợp với sợi quang hiện tại. Thay vào đó, công nghệ WDM tăng băng thông bằng cách tận dụng cửa sổ làm việc của sợi quang trong khoảng bước sóng 1260 nm đến 1675 nm. Khoảng bước sóng này được chia làm nhiều băng sóng hoạt động như minh hoạ trên bảng 1.1.

Thoạt tiên, hệ thống WDM hoạt động ở băng C (do EDFA hoạt động trong khoảng băng sóng này). Về sau, EDFA có khả năng hoạt động ở cả băng C và băng L nên hệ thống WDM hiện tại dùng EDFA có thể hoạt động ở cả băng C và băng L.

Nếu theo chuẩn ITU-T, xét khoảng cách giữa các kênh bước sóng là 100 Ghz (đảm bảo khả năng chống xuyên nhiễu kênh trong điều kiện công nghệ hiện tại), sẽ có 32 kênh bước sóng hoạt động trên mỗi băng. Như vậy, nếu vẫn giữ nguyên tốc độ bit trên mỗi kênh truyền, dùng công nghệ WDM cũng đủ làm tăng băng thông truyền trên một sợi quang lên 64 lần

Bảng 1.1 Sự phân chia các băng sóng

Băng sóng	Mô tả	Phạm vi bước sóng (nm)
Băng O	Original	1260 đến 1360
Băng E	Extended	1360 đến 1460
Băng S	Short	1460 đến 1530
Băng C	Conventional	1530 đến 1565
Băng L	Long	1565 đến 1625
Băng U	Ultra-long	1625 đến 1675

6.4.2. Sơ đồ khối tổng quát

a. Định nghĩa

Ghép kênh theo bước sóng WDM (Wavelength Devision Multiplexing) là công nghệ "trong một sợi quang đồng thời truyền dẫn nhiều bước sóng tín hiệu quang". Ở đầu phát, nhiều tín hiệu quang có bước sóng khác nhau được tổ hợp lại (ghép kênh) để truyền đi trên một sợi quang. Ở đầu thu, tín hiệu tổ hợp đó được phân giải ra (tách kênh), khôi phục lại tín hiệu gốc rồi đưa vào các đầu cuối khác nhau.

b. Sơ đồ chức năng

Để đảm bảo việc truyền nhận nhiều bước sóng trên một sợi quang, hệ thống WDM phải thực hiện các chức năng sau:

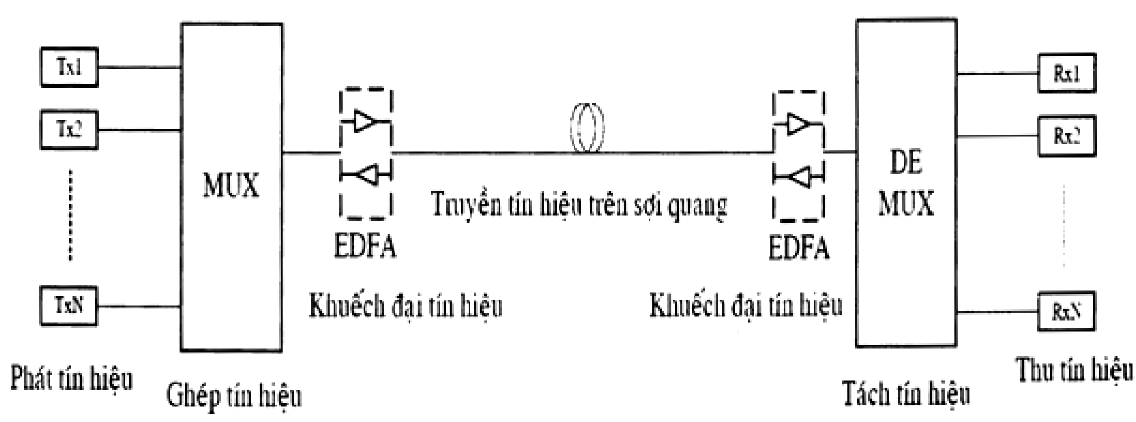
Phát tín hiệu

Trong hệ thống WDM, nguồn phát quang được dùng là laser. Hiện tại đã có một số loại nguồn phát như: Laser điều chỉnh được bước sóng (Tunable Laser), Laser đa bước sóng (Multiwavelength Laser)... Yêu cầu đối với nguồn phát laser là phải có độ rộng phổ hẹp, bước sóng phát ra ổn định, mức công suất phát đỉnh, bước sóng trung tâm, độ rộng phổ.

Ghép/tách tín hiệu

Ghép tín hiệu WDM là sự kết hợp một số nguồn sáng khác nhau thành một luồng tín hiệu ánh sáng tổng hợp để truyền dẫn qua sợi quang. Tách tín hiệu WDM là sự phân chia luồng ánh sáng tổng hợp đó thành các tín hiệu ánh sáng riêng rẽ tại mỗi cổng đầu ra bộ tách. Hiện tại đã có các bộ tách/ghép tín hiệu WDM như: bộ lọc màng mỏng điện môi, cách tử Bragg sợi, cách tử nhiễu xạ, linh kiện quang tổ hợp AWG, bộ lọc Fabry-Perot...

Khi xét đến các bộ tách/ghép WDM, ta phải xét các tham số như: khoảng cách giữa các kênh, độ rộng băng tần của các kênh bước sóng, bước sóng trung tâm của kênh, mức xuyên âm giữa các kênh, tính đồng đều của kênh, suy hao xen, suy hao phản xạ Bragg, xuyên âm đầu gần đầu xa...



Hình 6.10. Sơ đồ chức năng hệ thống WDM

Truyền dẫn tín hiệu

Quá trình truyền dẫn tín hiệu trong sợi quang chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố: suy hao sợi quang, tán sắc, các hiệu ứng phi tuyến, vấn đề liên quan đến khuếch đại tín hiệu ... Mỗi vấn đề kể trên đều phụ thuộc rất nhiều vào yếu tố sợi quang (loại sợi quang, chất lượng sợi...)

Khuếch đại tín hiệu

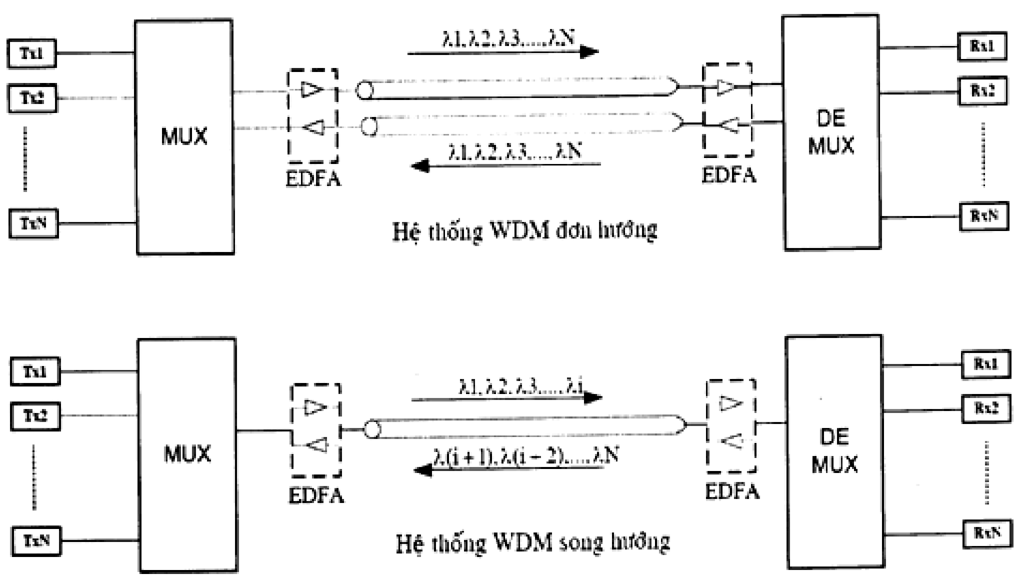
Hệ thống WDM hiện tại chủ yếu sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Tuy nhiên bộ khuếch đại Raman hiện nay cũng đã được sử dụng trên thực tế. Có ba chế độ khuếch đại: khuếch đại công suất, khuếch đại đường và tiền khuếch đại. Khi dùng bộ khuếch đại EDFA cho hệ thống WDM phải đảm bảo các yêu cầu sau:

- Độ lợi khuếch đại đồng đều đối với tất cả các kênh bước sóng (mức chênh lệch không quá 1 dB).
- Sự thay đổi số lượng kênh bước sóng làm việc không được gây ảnh hưởng đến mức công suất đầu ra của các kênh.
- Có khả năng phát hiện sự chênh lệch mức công suất đầu vào để điều chỉnh lại các hệ số khuếch đại nhằm đảm bảo đặc tuyến khuếch đại là bằng phẳng đối với tất cả các kênh.

Thu tín hiệu

Thu tín hiệu trong các hệ thống WDM cũng sử dụng các bộ tách sóng quang như trong hệ thống thông tin quang thông thường: PIN, APD.

c. Phân loại hệ thống WDM



Hình 6.11. Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng

– Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng như minh hoạ trên hình trên. Hệ thống đơn hướng chỉ truyền theo một chiều trên sợi quang. Do vậy, để truyền thông tin giữa hai điểm cần hai sợi quang. Hệ thống WDM song hướng, ngược lại, truyền hai chiều trên một sợi quang nên chỉ cần 1 sợi quang để có thể trao đổi thông tin giữa 2 điểm.

Cả hai hệ thống đều có những ưu nhược điểm riêng. Giả sử rằng công nghệ hiện tại chỉ cho phép truyền N bước sóng trên một sợi quang, so sánh hai hệ thống ta thấy:

– Xét về dung lượng, hệ thống đơn hướng có khả năng cung cấp dung lượng cao gấp đôi so với hệ thống song hướng. Ngược lại, số sợi quang cần dùng gấp đôi so với hệ thống song hướng.

Khi sự cố đứt cáp xảy ra, hệ thống song hướng không cần đến cơ chế chuyển mạch bảo vệ tự động APS (Automatic Protection-Switching) vì cả hai đầu của liên kết đều có khả năng nhận biết sự cố một cách tức thời.

Đứng về khía cạnh thiết kế mạng, hệ thống song hướng khó thiết kế hơn vì còn phải xét thêm các yếu tố như: vấn đề xuyên nhiễu do có nhiều bước sóng hơn trên một sợi quang, đảm bảo định tuyến và phân bố bước sóng sao cho hai chiều trên sợi quang không dùng chung một bước sóng.

Các bộ khuếch đại trong hệ thống song hướng thường có cấu trúc phức tạp hơn trong hệ thống đơn hướng. Tuy nhiên, do số bước sóng khuếch đại trong hệ thống song hướng giảm ½ theo mỗi chiều nên ở hệ thống song hướng, các bộ khuếch đại sẽ cho công suất quang ngõ ra lớn hơn so với ở hệ thống đơn hướng.

6.4.3. Đặc điểm của hệ thống WDM

Thực tế nghiên cứu và triển khai WDM đã rút ra được những ưu nhược điểm của công nghệ WDM như sau:

a. Ưu điểm của công nghệ WDM

- Tăng băng thông truyền trên sợi quang số lần tương ứng số bước sóng được ghép vào để truyền trên một sợi quang.
- Tính trong suốt: Do công nghệ WDM thuộc kiến trúc lớp mạng vật lý nên nó có thể hỗ trợ các định dạng số liệu và thoại như: ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, chuyển mạch kênh, IP ...
- Khả năng mở rộng: Những tiến bộ trong công nghệ WDM hứa hẹn tăng băng thông truyền trên sợi quang lên đến hàng Tbps, đáp ứng nhu cầu mở rộng mạng ở nhiều cấp độ khác nhau.
- Hiện tại, chỉ có duy nhất công nghệ WDM là cho phép xây dựng mô hình mạng truyền tải quang OTN (Optical Transport Network) giúp truyền tải trong suốt nhiều loại hình dịch vụ, quản lý mạng hiệu quả, định tuyến linh động ...

b. Nhược điểm của công nghệ WDM

- Vẫn chưa khai thác hết băng tần hoạt động có thể của sợi quang (chỉ mới tận dụng được băng C và băng L).
- Quá trình khai thác, bảo dưỡng phức tạp hơn gấp nhiều lần.
- Nếu hệ thống sợi quang đang sử dụng là sợi DSF theo chuẩn G.653 thì rất khó triển khai WDM vì xuất hiện hiện tượng trộn bốn bước sóng khá gay gắt.

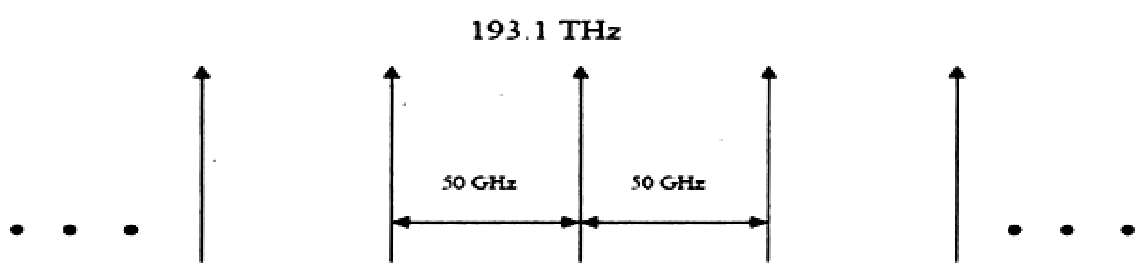
6.4.4. Lưới ITU

Việc chuẩn hoá các bộ bước sóng dùng cho các mạng WDM là hết sức cần thiết vì nó bảo đảm cho các thiết bị của các nhà cung cấp khác nhau đều được sản xuất theo cùng một tiêu chuẩn, và đều làm việc tương thích với nhau.

Khi chuẩn hoá bước sóng, vấn đề cần phải xem xét đầu tiên là là khoảng cách giữa các kênh phải dựa theo tần số hay bước sóng. Khoảng cách tần số bằng nhau sẽ làm cho khoảng cách bước sóng hơi khác nhau. Không có một tiêu chuẩn kỹ thuật nào được ưu tiên để lựa chọn trong trường hợp này. Trong khuyến cáo ITU-G.692 các kênh cách nhau một khoảng 50 GHz (tương đương với khoảng cách bước sóng là 0.4nm) với tần số trung tâm danh định là 193.1THz (1552.52 nm). Tần số này ở giữa dải thông của sợi quang 1.55μm và bộ khuếch đại quang sợi EDFA (xem hình 1.4). Khoảng cách này phù hợp với khả năng phân giải của các bộ MUX/DEMUX hiện nay, độ ổn định tần số của các bộ laser, MUX/DEMUX,... Khi công nghệ hoàn thiện hơn khoảng cách này sẽ phải giảm đi.

Một vấn đề khác, khó khăn hơn là chọn lựa một bộ bước sóng tiêu chuẩn bảo đảm cho các hệ thống cho 4, 8, 16, và 32 bước sóng hoạt động tương thích với nhau bởi vì các nhà sản xuất đều có các cấu hình kênh tối ưu riêng và các kế hoạch nâng cấp hệ thống từ ít kênh lên nhiều kênh khác nhau. ITU đã chuẩn hoá (ITU G.959) bộ 16 bước sóng bắt đầu từ tần số 192.1 THz, rộng 200GHz mỗi bên cho giao diện đa kênh giữa các thiết bị WDM.

Cuối cùng là phải lưu ý không chỉ bảo bảo đảm các tần số trung tâm mà còn phải bảo đảm độ lệch tần số tối đa cho phép. Đối với $\Delta f \geq 200$ GHz, ITU quy định độ lệch tần số là không vượt quá $\pm\Delta f/5$ GHz. Với $\Delta f = 50$ GHz và $\Delta f = 100$ GHz thì đến thời điểm này ITU vẫn chưa chuẩn hoá.



Hình 6.12. Lưới bước sóng theo ITU

6.4.5. Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM

Có 3 yếu tố cơ bản của sợi quang ảnh hưởng đến khả năng của các hệ thống thông tin quang, bao gồm:

- *Suy hao*
- *Tán sắc*
- *Hiện tượng phi tuyến xảy ra trong sợi quang.*

Tuy nhiên, đối với các hệ thống khác nhau thì mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này cũng khác nhau.

Đối với các hệ thống cự ly ngắn, dung lượng thấp thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao.

Đối với các hệ thống tốc độ cao, cự ly tương đối lớn thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao và tán sắc.

Đối với các hệ thống cự ly dài và dung lượng rất lớn thì ngoài 2 yếu tố trên cần phải xem xét đến cả các hiệu ứng phi tuyến.

6.5. Các linh kiện trong kiện trong hệ thống WDM

Các linh kiện được sử dụng trong các mạng quang hiện đại bao gồm

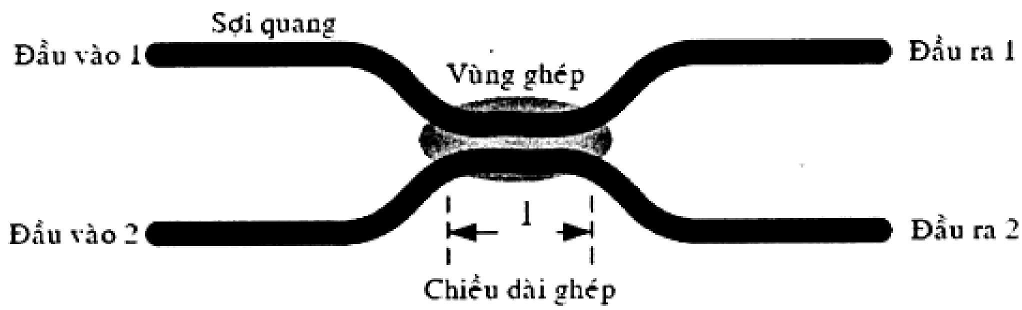
- Các bộ ghép/tách (couplers)
- Bộ phát laser (lasers)
- Bộ tách quang (photodetectors)
- Bộ khuếch đại quang (optical amplifiers)
- Bộ chuyển mạch quang (optical switches
- Bộ lọc (filters)
- Bộ ghép/tách kênh (multiplexers).

6.5.1. Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler)

a. Định nghĩa

Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler) là thiết bị quang dùng để kết hợp các tín hiệu truyền đến từ các sợi quang khác nhau. Nếu coupler chỉ cho phép ánh sáng truyền qua nó theo một chiều, ta gọi là coupler có hướng (directional coupler). Nếu nó cho phép ánh sáng đi theo 2 chiều, ta gọi là coupler song hướng (bidirectional coupler).

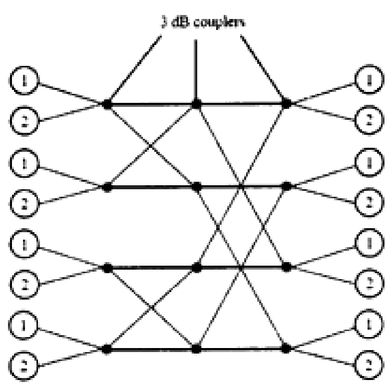
Coupler thông dụng nhất là coupler FBT (Fused Biconical Taper). Coupler này được chế tạo bằng cách đặt 2 sợi quang cạnh nhau, sau đó vừa nung chảy để chúng kết hợp với nhau vừa kéo giãn ra để tạo thành một vùng ghép (coupling region). Một coupler 2 x 2 đặc trưng bởi tỉ số ghép α ($0<\alpha<1$). α là tỉ lệ công suất ánh sáng ngõ vào 1 đến ngõ ra 1 so với tổng công suất ánh sáng vào ngõ vào 1. Phần tỉ lệ $1-\alpha$ công suất ánh sáng còn lại của ngõ vào 1 sẽ được truyền đến ngõ ra 2. Hình 1.9 là một coupler FBT 2 x 2 có hướng.



Hình 6.13. Cấu tạo coupler FBT 2 x 2

Coupler có thể là chọn lựa bước sóng (wavelength selective) hay không phụ thuộc vào bước sóng, tương ứng với α phụ thuộc hay không phụ thuộc vào bước sóng.

Trường hợp α = 1/2, coupler được dùng để chia công suất tín hiệu ngõ vào thành hai phần bằng nhau ở hai ngõ ra. Coupler trong trường hợp này được gọi là coupler 3 dB. Coupler hình sao nxn có thể được tạo bằng cách kết nối các coupler 3dB như trên hình sau.



Hình 6.14. Coupler hình sao với 8 ngõ vào và 8 ngõ ra được hình thành từ các coupler 3dB. Công suất từ một ngõ vào được chia đều cho các ngõ ra

b. Nguyên lý hoạt động

Khi hai sợi quang được đặt cạnh nhau, ánh sáng sẽ được ghép từ sợi này sang sợi kia và ngược lại. Đó là do quá trình truyền mốt ánh sáng trên sợi quang qua vùng ghép sẽ khác so với truyền trên sợi quang đơn. Khi đó, toàn bộ ánh sáng thuộc một sợi quang sẽ được ghép hoàn toàn sang sợi quang ghép với nó, phần ánh sáng này lại tiếp tục được ghép ngược trở lại sang sợi quang ban đầu theo một chu kỳ tuần hoàn khép kín. Kết quả ta có cường độ trường điện từ ở đầu ra của bộ ghép E_{01}, E_{02} được tính theo cường độ trường điện từ đầu vào E_{i1}, E_{i2} theo công thức

$$\begin{pmatrix} E_{01}(f) \\ E_{02}(f) \end{pmatrix} = e^{-i\beta l} \begin{pmatrix} \cos(\kappa l) & i\sin(\kappa l) \\ i\sin(\kappa l) & \cos(\kappa l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{pmatrix}$$

Trong đó:

- β là hệ số pha của sự truyền ánh sáng trong sợi quang.
- κ là hệ số ghép. κ phụ thuộc vào chiều rộng của sợi quang, chiết suất của lõi sợi và đến khoảng cách gần nhau của hai sợi quang khi thực hiện nung chảy.

Nếu chỉ cho ánh sáng vào ngõ 1 (cho E_{i2}=0), khi đó công thức (1.32) được viết lại là:

$$E_{01}(f) = e^{-i\beta l} \cos(\kappa l)\, E_{i1}(f)$$

$$E_{02}(f) = e^{-i\beta l}\, e^{i(\pi/2)} \sin(\kappa l)\, E_{i1}(f)$$

Ta nhận xét rằng ở 2 đầu ngõ ra có sự lệch pha π/2.

c. Ứng dụng

Coupler là linh kiện quang linh hoạt và có thể cho nhiều ứng dụng khác nhau. Bộ coupler với tỉ số ghép α ≈ 1 được dùng để trích một phần nhỏ tín hiệu quang, phục vụ cho mục đích giám sát.

Coupler còn là bộ phận cơ bản để tạo nên các thành phần quang khác, chẳng hạn như: các bộ chuyển mạch tĩnh, các bộ điều chế, bộ giao thoa Mach-Zehnder MZI... MZI có thể được chế tạo hoạt động như bộ lọc, MUX/DEMUX, chuyển mạch và bộ chuyển đổi bước sóng.

Thực hiện ghép/tách bước sóng trên sợi quang. Nhờ điều chỉnh chiều dài ghép thích hợp khi chế tạo, coupler 2 x 2 ghép 50:50 phân bố công suất ánh sáng từ một đầu vào ra làm 2 phần bằng nhau ở 2 ngõ ra. Coupler này còn được gọi là coupler 3 dB, ứng dụng phổ biến nhất. Từ coupler 3 dB, có thể tạo nên bộ coupler n x n ghép n tín hiệu khác nhau vào một sợi quang.

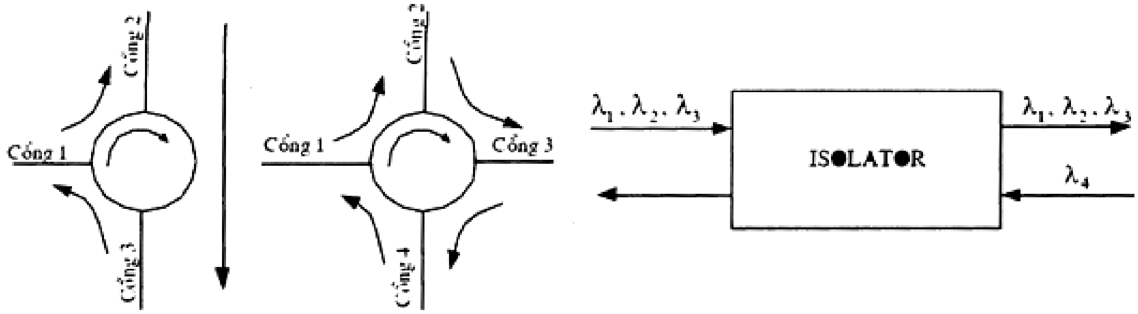
6.5.2. Bộ isolator/circulator

a. Định nghĩa

Coupler và phần lớn các linh kiện quang thụ động khác là các thiết bị thuận ngược (reciprocal) theo nghĩa thiết bị sẽ hoạt động cùng một kiểu nếu đảo ngõ vào và ngõ ra với nhau.

Isolator là thiết bị không thuận ngược (nonreciprocal). Nó chỉ truyền ánh sáng qua nó theo một chiều và ngăn không cho truyền theo chiều ngược lại. Nó được dùng tại đầu ra của các thiết bị quang (bộ khuếch đại, nguồn phát laser) để ngăn quá trình phản xạ ngược trở lại các thiết bị đó, gây nhiễu và hư hại thiết bị. Hai tham số chính của Isolator là suy hao xen và độ cách ly.

Circulator cũng thực hiện chức năng tương tự như bộ Isolator nhưng nó thường có nhiều cổng, thường là 3 hoặc 4 cửa. Chính vì sự tương đồng giữa hai loại thiết bị, ta sẽ chỉ trình bày hoạt động của bộ Isolator mà thôi.



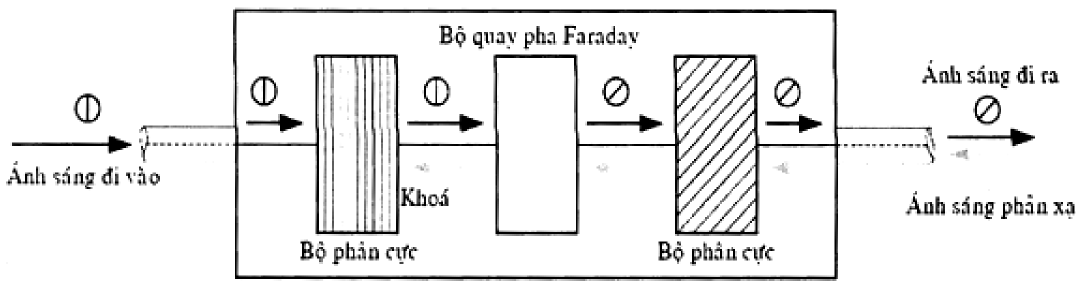
(a) (b) (c)

Hình 6.15: (a) Sơ đồ khối của bộ Circulator 3 cửa.

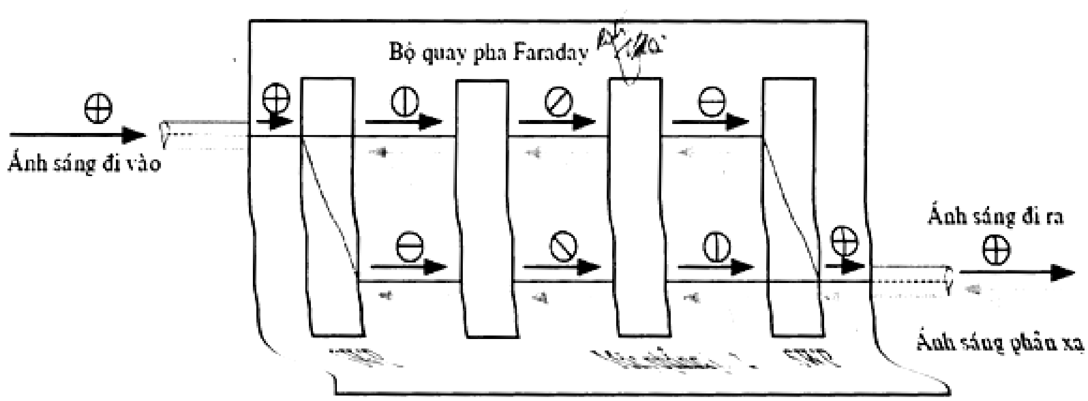
(b) Sơ đồ khối của bộ Circulator 4 cửa.

(c) Sơ đồ khối của bộ Isolator.

b. Nguyên lý hoạt động



(a)



Hình 6.16. (a) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực dọc

(b) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực bất kỳ

Trạng thái phân cực của ánh sáng truyền trong sợi quang được định nghĩa là chiều phân cực của vector cường độ trường E nằm trên mặt phẳng vuông góc với phương truyền ánh sáng trong sợi. Ta gọi là phân cực ngang và phân cực dọc. Quá trình truyền ánh sáng trong sợi quang là sự kết hợp tuyến tính truyền các sóng phân cực ngang và phân cực dọc.

Mô hình đơn giản của bộ Isolator được minh hoạ như trong Hình 6.16. (a)(Giả sử ánh sáng truyền là phân cực dọc, truyền đến bộ phân cực (Polarizer), bộ này thực hiện chức năng chỉ cho sóng phân cực dọc đi qua, không cho sóng phân cực ngang đi qua. Sau bộ phân cực là bộ quay pha Faraday, thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ không phân biệt chiều ánh sáng đến.

Tiếp theo là bộ phân cực, bộ này thực hiện chức năng chỉ cho sóng phân cực 45° đi qua. Như vậy, bộ Isolator ta xét chỉ cho phép sóng phân cực dọc đi qua theo chiều từ trái sang phải. Trong trường hợp sóng phản xạ theo chiều ngược lại, nếu sóng qua được bộ phân cực thứ hai, qua tiếp theo bộ quay pha Faraday, thì cũng không thể qua được bộ phân cực thứ nhất (do lúc này sóng phân cực ngang).

Trên thực tế thì sóng truyền trong sợi quang luôn là sự kết hợp tuyến tính của các trạng thái phân cực ngang và dọc nên thiết kế bộ Isolator phức tạp hơn. Mô hình thu nhỏ được trình bày trong Hình 6.16. (b).

Ánh sáng truyền trong sợi quang với trạng thái phân cực bất kì được đưa đến bộ tách/ghép trạng thái phân cực SWP (Spatial Walk-off Polarizer), tách thành hai dòng tín hiệu phân cực dọc và ngang theo hai đường độc lập nhau. Tiếp theo, đến bộ quay pha Faraday, quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ. Mặt phẳng $\lambda/2$ (Half-wave plate) thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ đối với tín hiệu truyền từ trái sang phải, quay pha 45° theo chiều ngược kim đồng hồ theo chiều truyền ngược lại. Cuối cùng, tín hiệu ở hai nhánh được kết hợp lại nhờ bộ SWP thứ hai. Nếu theo chiều ngược lại, hai bộ SWP sẽ khử lẫn nhau. Ánh sáng truyền qua bộ SWP thứ hai, qua bộ quay pha Faraday sẽ không thể kết hợp lại được tại bộ SWP thứ nhất như minh hoạ trên Hình 6.16.

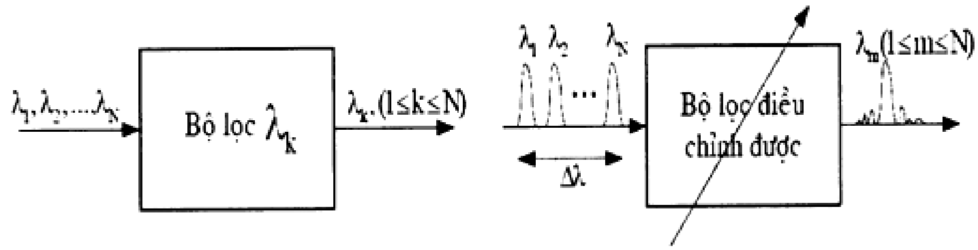
c. Ứng dụng

Bộ Isolator và Circulator có những ứng dụng sau:

- Bộ Isolator thường đứng trước đầu ra bộ khuếch đại quang hoặc nguồn phát laser để ngăn ánh sáng phản xạ ngược trở lại thiết bị gây nhiễu và có thể làm hư thiết bị.
- Bộ Circulator được dùng như một bộ phận để chế tạo phần tử xen rớt quang OADM.

6.5.3. Bộ lọc quang

a. Tổng quan



(a) (b)

Hình 6.17. Sơ đồ khối của bộ lọc.

(a) Bộ lọc cố định bước sóng λk.

(b) Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng được tronkhoảngng Δλ.

Định nghĩa

Bộ lọc là thiết bị chỉ cho phép một kênh bước sóng đi qua, khoá đối với t các kênh bước sóng khác. Nguyên lý cơ bản nhất của bộ lọc là sự giao thoa giữa tín hiệu, bước sóng hoạt động của bộ lọc sẽ được cộng pha nhiều lần khi đi qua nó kênh bước sóng khác, ngược lại, sẽ bị triệt tiêu về pha.

Tuỳ thuộc vào khả năng điều chỉnh kênh bước sóng hoạt động, người ta chi lọc làm hai loại: bộ lọc cố định (fixed filter) và bộ lọc điều chỉnh được (tunable filt

Yêu cầu đối với bộ lọc

Hiện nay, có rất nhiều công nghệ chế tạo bộ lọc. Tuy nhiên, yêu cầu chung đối v cả các công nghệ là:

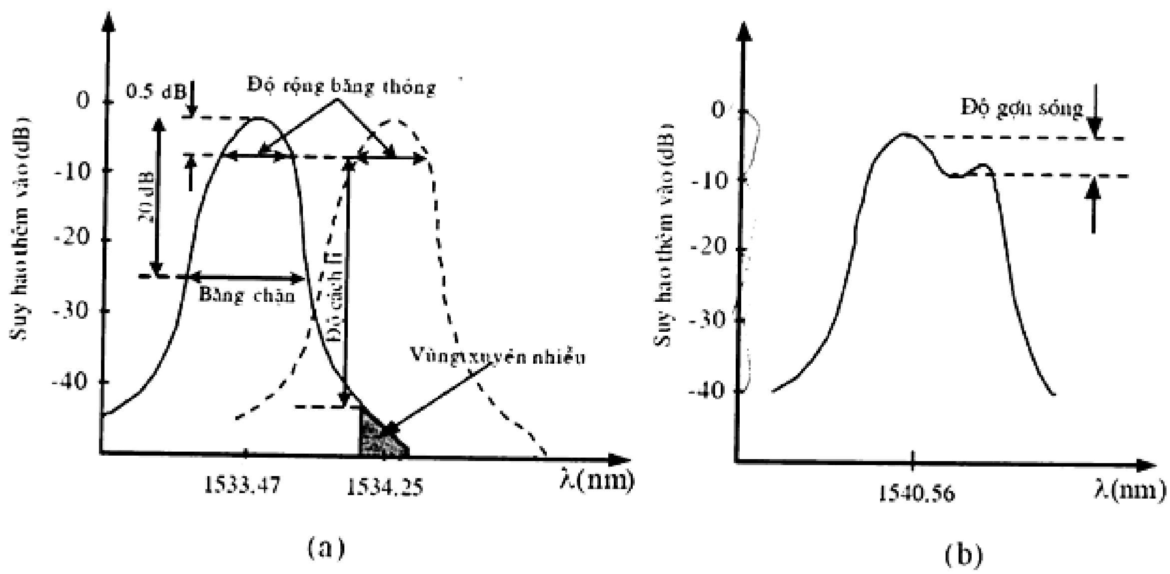
- Bộ lọc tốt phải có giá trị suy hao xen IL thấp. IL: insertion loss
- Bộ lọc phải không phụ thuộc nhiều vào trạng thái phân cực của tín hiệu đưa và
- Dải thông hoạt động của bộ lọc phải không nhạy cảm với sự thay đổi nhi của môi trường.
- Bộ lọc phải đảm bảo trong khoảng nhiệt độ hoạt động (thường là khoảng C), độ dịch dải thông hoạt động phải không vượt quá khoảng cách giữa kênh bước sóng hoạt động gần nhất.
- Khi ứng dụng ghép nối tiếp nhiều bộ lọc trong hệ thống WDM, băng thông động sẽ bị thu hẹp lại. Để hạn chế tối đa điều này, các bộ lọc phải có truyền đạt trong khoảng bước sóng hoạt động là bằng phẳng.
- Hàm truyền đạt của bộ lọc phải có độ dốc lớn để tránh giao nhau ở phần vạ hai bước sóng lân cận, gây xuyên nhiễu giữa các kênh.
- Giảm chi phí sản xuất.

Vấn đề này lại phụ thuộc vào công nghệ chế tạo. Tuy nhiên, khi vấn đề này đặt lên hàng đầu thì ta sẽ có hai lựa chọn.

Thứ nhất là dùng công nghệ ống dẫn sóng, cho phép sản xuất trên những vi mạch tích hợp quang (bù lại hoạt động phụ thuộc vào trạng thái phân cực của sóng quang).

Thứ hai là dùng công nghệ sản xuất các thiết bị thuần quang, tuy khó khăn trong tích hợp mạch nhưng có nhiều ưu điểm là: không phụ thuộc vào trạng thái phân cực của sóng quang, ghép sóng từ sợi quang vào thiết bị dễ dàng.

b. Thông số cơ bản



Hình 6.18. (a) Các thông số đặc trưng của bộ lọc. (b) Độ gợn sóng của bộ lọc.

Hình trên minh hoạ các đặc tính đặc trưng cho một bộ lọc, các đặc tính đó được định nghĩa như sau:

- Bước sóng trung tâm: phải là bước sóng tuân theo tiêu chuẩn ITU-T
- Độ rộng băng thông (Pass Bandwidth): độ rộng của hàm truyền đạt tại mức suy hao xen cách đỉnh 0.5 dB. Trong một số trường hợp, người ta còn có thể xét băng thông đi qua 1 dB, 3 dB. Đặc tính này rất quan trọng vì laser trong trường hợp không lý tưởng chỉ phát tín hiệu có bước sóng dao động nhất định so với bước sóng trung tâm được qui định theo chuẩn ITU-T.
- Độ rộng băng chặn (Stop Bandwidth): độ rộng của hàm truyền đạt tại mức suy hao xen cách đỉnh 20 dB. Dải chặn của bộ lọc phải càng nhỏ càng tốt để tránh hiện tượng xuyên nhiễu giữa các kênh.
- Độ cách ly (Isolation): để chỉ công suất của một kênh bước sóng xuyên nhiễu sang các kênh bước sóng lân cận.

- Độ gợn sóng (Ripple): độ chênh lệch đỉnh-đỉnh trong phạm vi một kênh bước sóng.
- Hệ số sử dụng băng thông BUF (Bandwidth-utilization Factor): tỉ số của độ rộng kênh truyền LW (Linewidth) của ánh sáng được truyền đi so với ánh sáng phản xạ tại một mức suy hao xác định. Bộ lọc lý tưởng phải có BUF = 1. Trên thực tế, khi IL = - 25 dB thì BUF ≈ 0.4.

Nếu bộ lọc thuộc loại có thể điều chỉnh bước sóng được, nó còn có thêm các đặc tính nữa như là:

- Khoảng điều chỉnh bước sóng động: khoảng bước sóng mà trong phạm vi hoạt động của bộ lọc.
- Số kênh bước sóng có thể xử lý: tỉ lệ khoảng điều chỉnh bước sóng động trên khoảng cách giữa các kênh bước sóng.
- Thời gian điều chỉnh: thời gian điều chỉnh giữa các kênh bước sóng hoạt động khác nhau.
- Tỉ lệ nén biên SSR (Sidelobe Suppression Ratio): khoảng cách giữa giá trị công suất đỉnh so với giá trị công suất lớn nhất ở biên.
- Độ phân giải: độ dịch bước sóng nhỏ nhất bộ lọc có thể nhận biết được.

c. Cách tử

Cách tử dùng để mô tả các thiết bị mà hoạt động của nó dựa trên hiện tượng giao thoa giữa các tín hiệu quang xuất phát từ cùng một nguồn quang nhưng có độ lệch pha tương đối với nhau.

Phân biệt với cách tử là vật chuẩn (etalon) là thiết bị ở đó nhiều tín hiệu quang được tạo ra nhờ một hốc cộng hưởng (single cavity) lặp lại các tia đi ngang qua nó.

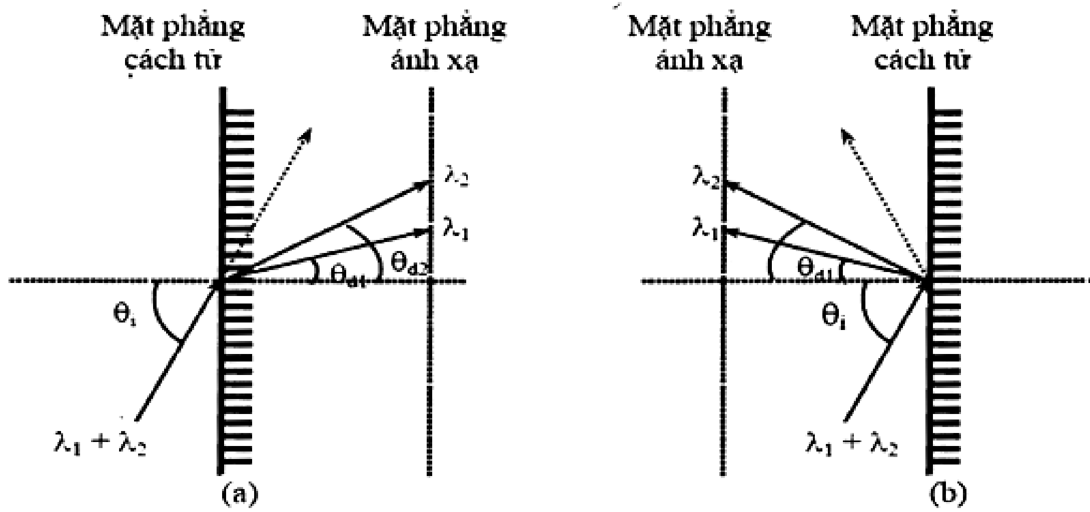
Sóng ánh sáng có lan truyền theo hướng z với tần số góc là ω và hằng số pha là β sẽ có độ dịch pha là (ωt-βz). Do đó độ dịch pha tương đối giữa hai sóng phát sinh từ một nguồn có thể được tạo ra bằng cách cho chúng truyền qua hai đường khác nhau.

Trong WDM, cách tử được dùng như là một bộ tách kênh để tách các bước sóng hoặc như là một bộ ghép kênh để kết hợp các bước sóng..

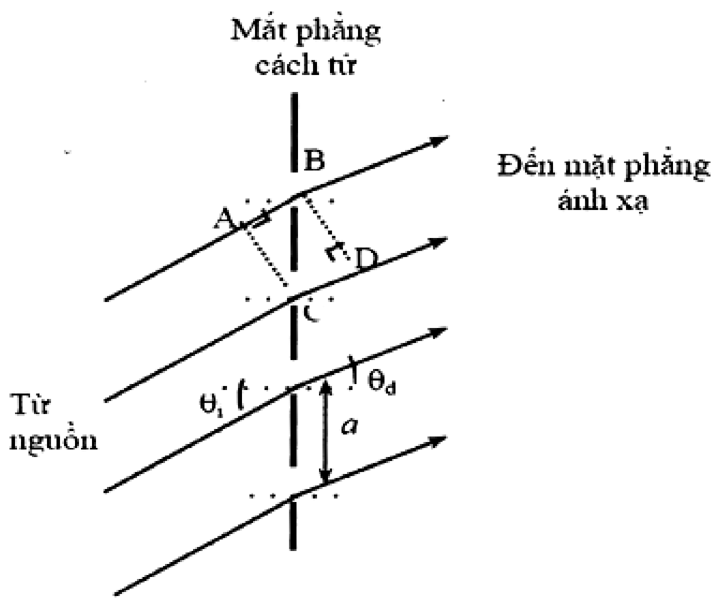
Hình 6.18. là hai ví dụ về cách tử: trên mặt phẳng cách tử (grating plane), các khe (slit) được cách đều nhau. Khoảng cách giữa hai khe kế cận gọi là pitch. Do các khe nhỏ nên theo hiện tượng nhiễu xạ (diffraction) ánh sáng truyền qua các khe này sẽ lan toả ra mọi hướng. Trên mặt phẳng ánh xạ (imaging plane) sẽ quan sát được hiện tượng giao thoa cộng hưởng (constructive interference) và triệt tiêu các bước sóng tại các điểm khác nhau, cách tử này được gọi là cách tử nhiễu xạ (diffraction grating).

Hình 6.18. (a) là cách tử truyền dẫn (transmission gratings),

Hình 6.18. (b) là cách tử phản xạ (reflection gratings).

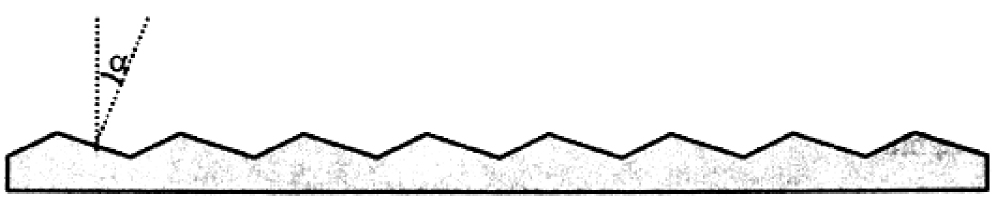


Hình 6.18. (a) Cách tử truyền dẫn và (b) Cách tử phản xạ

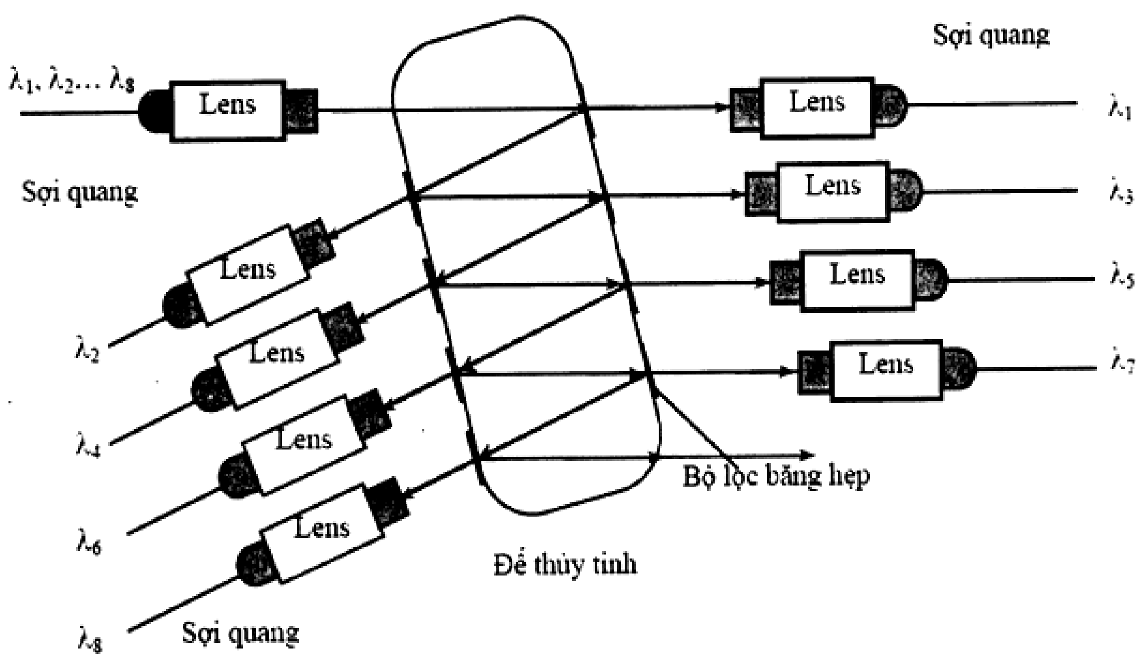


Hình 6.19. Nguyên tắc hoạt động của cách tử truyền dẫn.

Cách tử phản xạ hoạt động tương tự



Hình 6.20. Cách tử blazing với góc blaze α.



Hình 6.21. Bộ lọc ghép/tách kênh được tạo từ các bộ lọc màng mỏng điện môi

6.5.4. Bộ ghép/tách kênh bước sóng

Bộ ghép/tách kênh bước sóng, cùng với bộ kết nối chéo quang, là thiết bị quan trọng nhất cấu thành nên hệ thống WDM.

Khi dùng kết hợp với bộ kết nối chéo quang OXC (Optical Crossconnect) sẽ hình thành nên mạng truyền tải quang, có khả năng truyền tải đồng thời và trong suốt mọi loại hình dịch vụ, mà công nghệ hiện nay đang hướng tới.

Tuy nhiên, trong khi thiết bị và công nghệ chuyển mạch quang, nhìn chung vẫn còn đang ở mức nghiên cứu tại các phòng thí nghiệm thì các thiết ghép/tách kênh bước sóng đã được thương mại hoá rộng rãi.

Về công nghệ chế tạo, công nghệ chế tạo bộ lọc (mà đã được trình bày chi tiết ở phần 6.4.3.) và công nghệ chế tạo bộ tách/ghép kênh hoàn toàn giống nhau. Chỉ khác là bộ lọc thường chỉ có một bước sóng hoạt động, còn bộ tách/ghép kênh hoạt động trên nhiều kênh bước sóng liên tục. Bộ lọc chính là phần tử cơ bản cấu tạo nên bộ ghép/tách kênh.

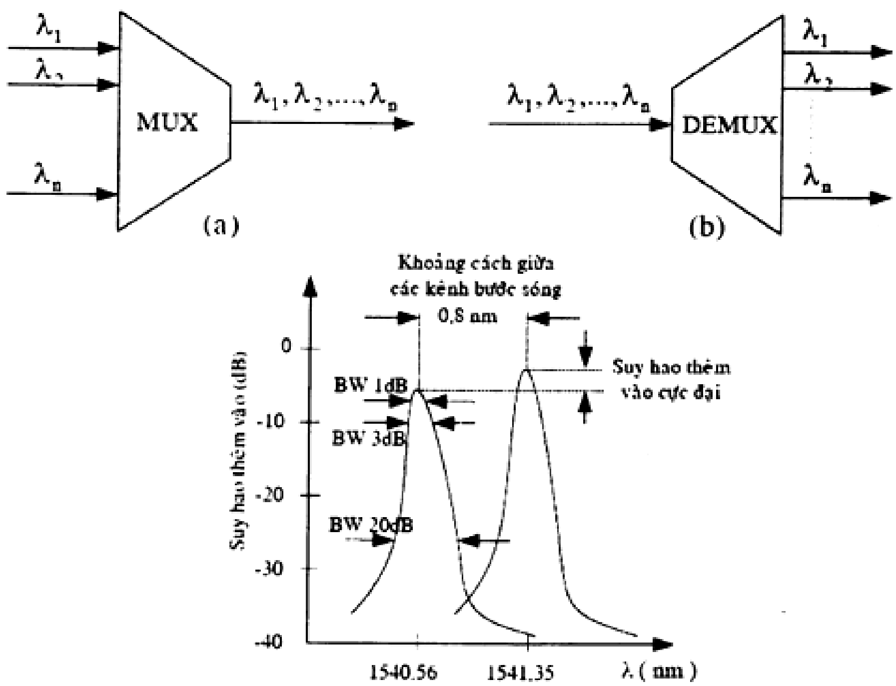
a. Định nghĩa

Nguyên lý hoạt động của bộ MUX/DEMUX cũng tương tự như bộ Coupler. Tuy nhiên, bộ Coupler/Splitter thực hiện ghép tách tín hiệu có cùng bước sóng, còn bộ MUX/DEMUX thực hiện ghép tách tín hiệu ở các bước sóng khác nhau. Sơ đồ khối bộ MUX/DEMUX cho trong hình 6.22. (a) và (b).

b. Đặc tính

Bộ MUX/DEMUX thường được mô tả theo những thông số sau:

- Suy hao xen (Insertion Loss): đã mô tả ở phần coupler.
- Số lượng kênh xử lý: số lượng kênh bước sóng ở đầu vào và đầu ra của bộ ghép/tách kênh. Thông số này đặc trưng cho dung lượng của thiết bị.
- Bước sóng trung tâm: các bước sóng trung tâm phải tuân theo chuẩn của ITU-T để đảm bảo vấn đề tương thích.
- Băng thông: độ rộng phổ (linewidth) của kênh bước sóng trên thực tế. Băng thông thường được tính là độ rộng của hàm truyền đạt công suất ở các mức cách đỉnh 1dB, 3dB, 20dB.
- Giá trị lớn nhất suy hao xen: được tính là khoảng cách nhỏ nhất giữa đỉnh của hàm truyền đạt công suất của một kênh bước sóng nào đó so với mức IL=0 (dB) (minh hoạ trên 6.22.c).
- Độ chênh lệch suy hao xen vào giữa các kênh: được tính là hiệu của giá trị lớn nhất và nhỏ nhất suy hao xen vào giữa các kênh bước sóng.



(c)

Hình 6.22. Bộ tách/ghép kênh bước sóng quang.

(a) Sơ đồ khối bộ ghép kênh bước sóng (MUX).

(b) Sơ đồ khối bộ tách kênh bước sóng (DEMUX).

(c) Các thông số đặc trưng của bộ MUX/DEMUX.

c. Ghép tầng để tạo bộ ghép kênh dung lượng cao

Nhu cầu về dung lượng ngày càng cao trong khi công nghệ chế tạo sợi quang vẫn còn những giới hạn nhất định, làm hạn chế tốc độ truyền dẫn một kênh bước sóng. Điều đó đòi hỏi phải tăng số lượng kênh bước sóng truyền trên một sợi quang, có nghĩa là số lượng kênh mà bộ MUX/DEMUX xử lý phải tăng lên.

Trong khi công nghệ chế tạo phần tử cơ bản vẫn còn giới hạn ở một khoảng số lượng kênh bước sóng có thể xử lý nhất định thì giải pháp ghép tầng được xem là giải pháp hợp lý nhất.

Ghép tầng nối tiếp đơn kênh (Serial)

Trong phương pháp này thực hiện ghép n tầng, mỗi tầng chỉ thực hiện ghép/tách một kênh bước sóng. Một ví dụ tiêu biểu là bộ DEMUX 8 kênh bước sóng, chế tạo từ các phần tử cơ bản là bộ lọc TFMF như đã trình bày trong hình (1.25).

- Ưu điểm lớn nhất của phương pháp ghép tầng nối tiếp là số bước sóng xử lý có thể thay đổi linh động bằng cách thêm/bớt số bộ lọc ghép vào ("pay as you grow").

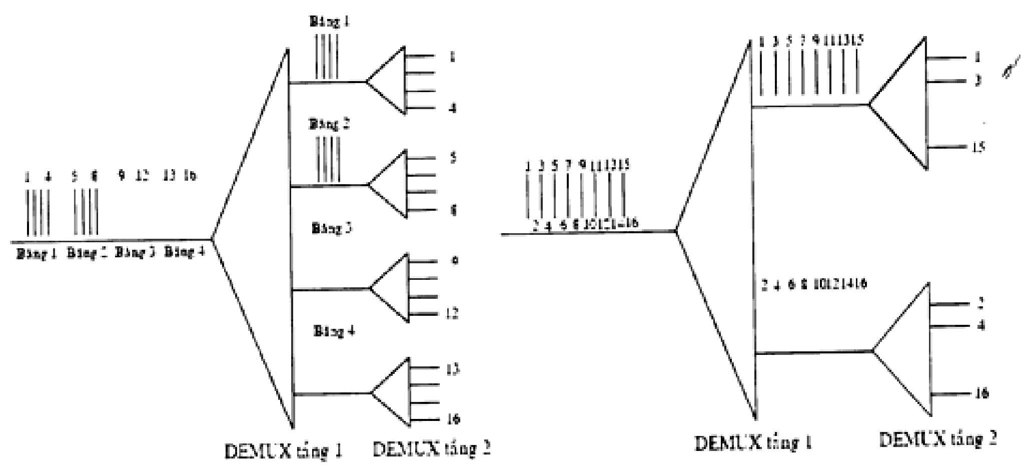
- Nhược điểm chính là chỉ có thể tăng lên đến một số lượng bước sóng nào đó mà thôi, do suy hao xen sẽ tăng gần như tuyến tính với số lượng bộ lọc thêm vào.

Ghép một tầng (Single-Stage)

Tất cả các bước sóng đều được tách đồng thời trong một tầng duy nhất. Ví dụ cho cấu trúc này là bộ lọc AWG.

Ưu điểm của phương pháp này suy hao xen nhỏ, tính đồng nhất của suy hao tốt hơn.

Nhược điểm là số kênh được tách bị hạn chế do công nghệ sản xuất AWG.



(a) (b)

Hình 6.23. Ghép tầng để tăng dung lượng ghép/tách các kênh bước sóng.

(a) Ghép tầng theo từng băng sóng.

(b) Ghép tầng đan xen chẵn lẻ.

Ghép tầng theo từng băng sóng (Multistage Banding)

Phương pháp này thực hiện với n/m tầng, mỗi tầng thực hiện ghép/tách m kênh bước sóng thuộc cùng một băng sóng (thông thường m = 4 hoặc m = 8, số lượng kênh bước sóng trong một băng sóng là do nhà sản xuất thiết bị qui định) xem hình (6.23. a). Như vậy, đòi hỏi bộ MUX/DEMUX ở tầng đầu phải có dải bước sóng hoạt động rất rộng.

Ưu điểm: hạn chế được suy hao thêm vào m lần so với phương pháp ghép tầng nối tiếp. Cấu trúc này có thể mở rộng thêm nhiều tầng. Cấu trúc có dạng mô đun nên ở tầng cuối cùng có thể chỉ dùng một băng.

Nhược điểm: phí phạm tài nguyên "bước sóng" do phải chừa khoảng cách rộng giữa các băng sóng.

Ghép tầng đan xen chẵn lẻ

Có thể áp dụng với hai tầng hoặc nhiều hơn. Tầng đầu làm nhiệm vụ ghép/tách các kênh bước sóng chẵn, lẽ ra làm thành hai băng, đưa đến tầng hai. Tiếp theo, tầng hai có thể thực hiện chức năng tương tự như tầng một hoặc thực hiện ghép/tách riêng ra thành các kênh riêng lẻ (xem hình 6.23. b).

Ưu điểm của phương pháp này là càng về tầng cuối, không cần phải dùng các bộ lọc có độ chính xác cao do khoảng cách giữa các kênh bước sóng cần xử lý ở tầng sau sẽ càng rộng ra.

6.5.5. Bộ chuyển mạch quang

a. Các bộ chuyển mạch đơn (Single Switch)

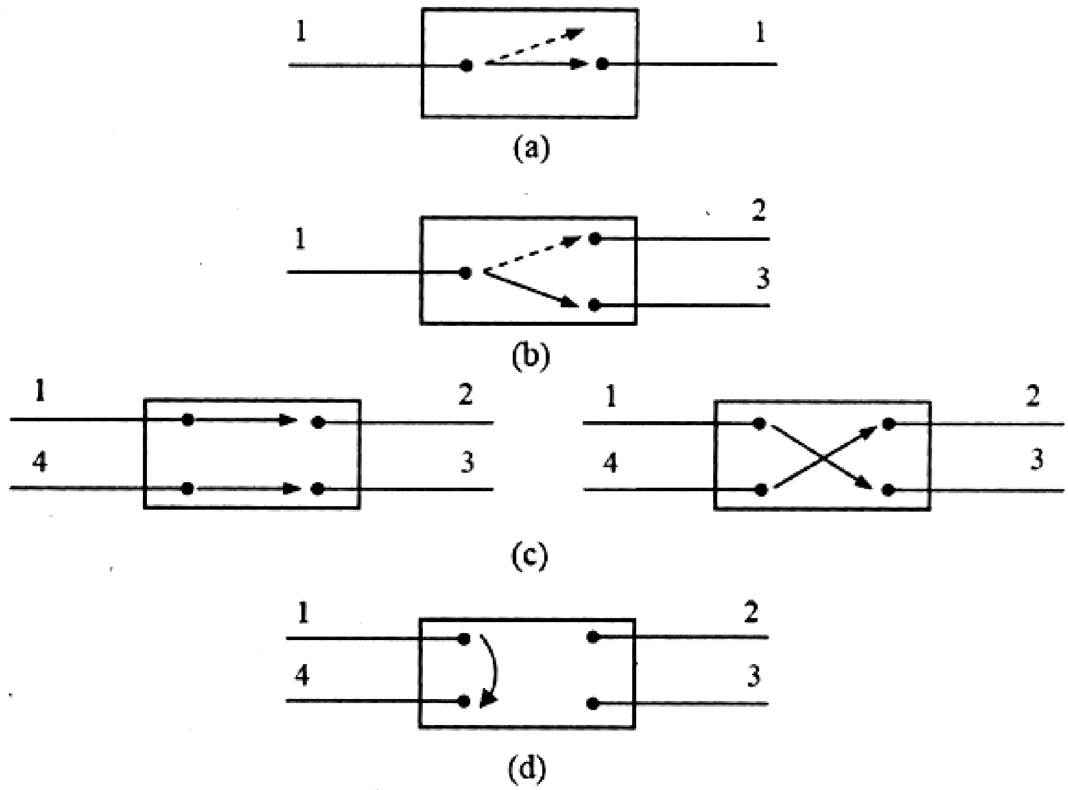
Theo chức năng, các bộ chuyển mạch đơn thường được chia làm hai loại: on/off và chuyển tiếp (passing).

Bộ chuyển mạch on/off (1x1) sẽ cho phép/hoặc không cho phép tín hiệu ánh sáng đi qua (hình 6.24. (a).

Chuyển mạch chuyển tiếp 1x2 hướng tín hiệu ánh sáng từ sợi quang thứ nhất sang sợi quang thứ hai hoặc sang sợi quang thứ ba (hình 6.24. (b). Cấu hình chuyển mạch 1x2 trong hình hình 6.24. (b) là cấu hình chuyển mạch đơn giản nhất. Các bộ chuyển mạch chuyển tiếp 1xN đơn mang tính thương mại cao.

Bộ chuyển mạch chuyển tiếp 2x2 có thể kết nối hai sợi quang này với hai sợi quang khác. Bộ chuyển mạch chuyển tiếp 2x2 có thể có hai trạng thái: trạng thái kết nối thẳng (bypass/bar) và trạng thái kết nối chéo (cross/inserted) (hình 6.24. (c). Thuật ngữ không nghẽn dùng để chỉ một bộ chuyển mạch có thể kết nối bất kỳ ngõ vào đến bất kỳ ngõ ra.

Hình 6.24. (d) trình bày bộ chuyển mạch 2x2 có nghẽn vì bộ chuyển mạch này chỉ có thể kết nối từ sợi quang 1 đến sợi quang 4.



Hình 6.24. Các loại cấu hình chuyển mạch quang:

(a) Chuyển mạch On/Off (1x1);

(b) Chuyển mạch chuyển tiếp (1x2) (không nghẽn);

(d) Chuyển mạch 2x2 có nghẽn.

Nhiều ví dụ đơn giản về các ứng dụng của bộ chuyển mạch khẳng định tầm quan trọng của các bộ chuyển mạch trong hệ thống thông tin sợi quang như sau:

- Các chuyển mạch on/off được dùng làm các đầu phát và đầu thu cách ly trong thiết bị đo thử. Bộ chuyển mạch 1x2 cho phép lựa chọn kênh và được dùng cho chuyển mạch bảo vệ (để định hướng lại lưu lượng khi sợi quang bị đứt).
- Các chuyển mạch 1xN được dùng để kiểm tra và đo các linh kiện quang, kiểm tra từ xa các hệ thống thông tin sợi quang.
- Các chuyển mạch 2x2 được dùng để kết nối thẳng nút trong các mạng quang. Chuyển mạch 2x2 thường được ứng dụng trong các mạng FDDI. Khi một trạm nào đó bị hư hỏng hoặc bị mất nguồn, bộ chuyển mạch sẽ tự động thay đổi sang trạng thái nghẽn, do đó đảm bảo luồng lưu lượng không bị ảnh hưởng khi nút bị hư hỏng.

Các chuyển mạch đơn được chế tạo theo các kiểu khoá (latching) hoặc không khoá (nonlatching). Loại khoá sẽ giữ nguyên trạng thái (vị trí) của chuyển mạch nếu nguồn bị mất.

Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn

Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn điển hình thường dựa trên: điện - quang, quang cơ học, nhiệt quang. Hình 6.25 trình bày một số nguyên lý hoạt động của bộ chuyển mạch.

Nếu chuyển mạch thiên áp của một bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA-Semiconductor Optical Amplifier) sang hai trạng thái on/off thì tạo ra được một chuyển mạch điện - quang (hình 6.25. (a) vì một SOA chỉ khuếch đại ánh sáng khi nó được phân cực và hấp thụ ánh sáng khi nó không được phân cực.

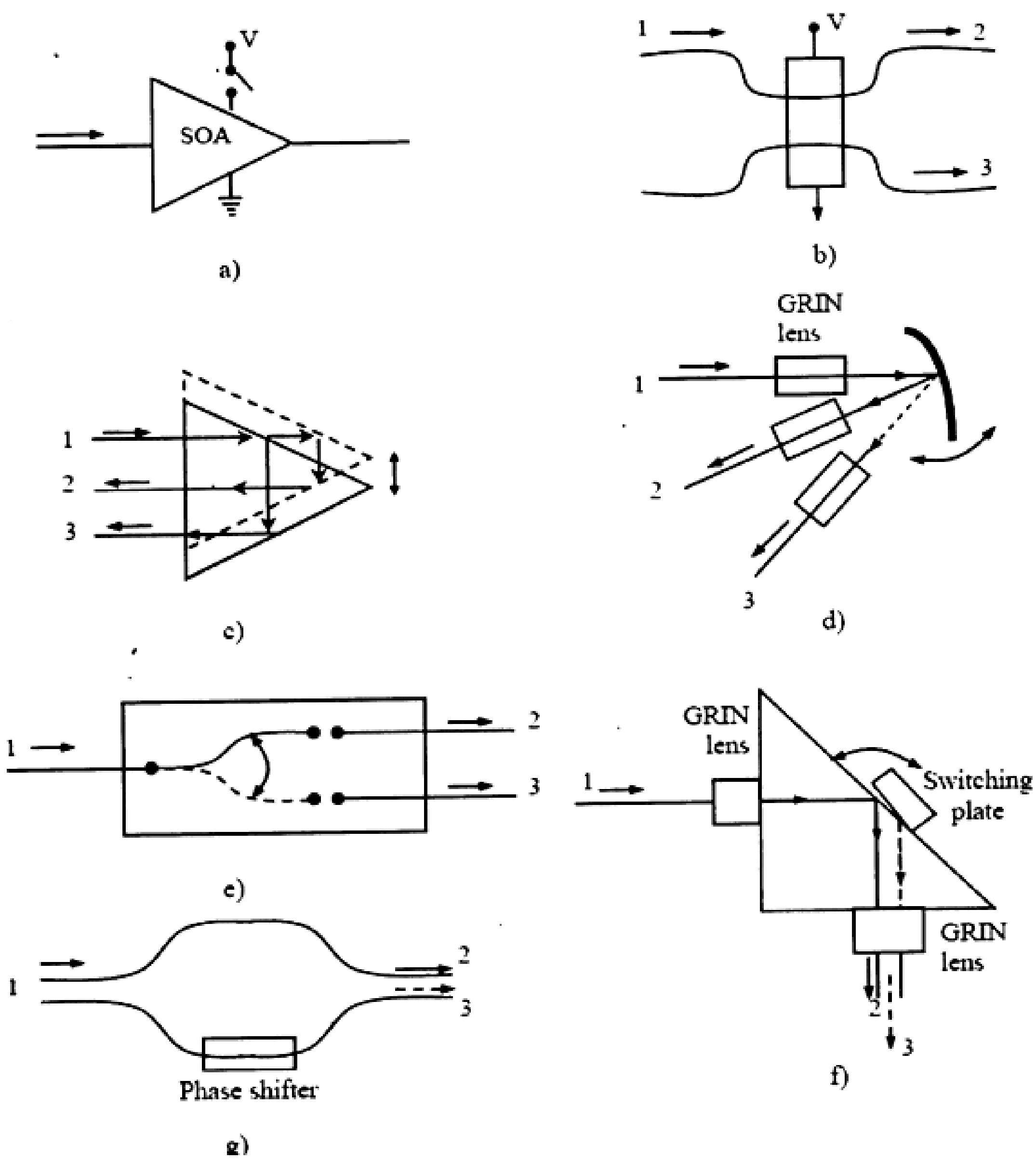
Hình 6.25(b) trình bày một ví dụ khác của chuyển mạch EO, trong đó tỉ số ghép của bộ ghép ống dẫn sóng phụ thuộc vào điện áp áp vào. Thay đổi tỉ số ghép bằng cách dùng $LiNbO_3$ để chế tạo lớp trên cùng của bộ ghép vì $LiNbO_3$ là loại nhiên liệu có chỉ số khúc xạ thay đổi theo giá trị của điện áp áp vào.

Chuyển mạch quang cơ học hoạt động dựa trên chuyển động cơ học của các linh kiện quang. Ví dụ, di chuyển lăng kính trong hình 6.25(c) theo chiều dọc sẽ cho phép chuyển mạch một tín hiệu quang từ sợi 2 sang sợi 3.

Ta cũng có thể đạt được kết quả tương tự khi đặt nhẹ lên trụ một gương hình cầu (hình 6.25(d). Các thấu kính GRIN (graded-index) sẽ làm cho việc chuyển tiếp ánh sáng ghép từ/vào sợi quang được dễ dàng hơn.

Hình 6.25(e) trình bày ví dụ về chuyển mạch quang. Một cặp sợi quang ở ngõ vào chuyển từ vị trí này sang vị trí khác để thực hiện việc chuyển mạch tín hiệu quang.

Nguyên lý của việc làm mất tác dụng của toàn bộ ánh sáng phản xạ bên trong (FTIRFrustration of Total Internal Reflection) được ứng dụng để chế tạo bộ chuyển mạch được trình bày trong hình 6.25(f). Nhắc lại là một phần ánh sáng sẽ truyền qua môi trường khúc xạ khác ngay cả khi không có ánh sáng phản xạ bên trong. Ta gọi ánh sáng được truyền qua này là sóng suy biến (evanescent wave). Nhờ hiệu ứng này, khi lá chuyển mạch được gắn với lăng kính thì sẽ tạo ra ánh sáng phản xạ bên trong. Khi lá chuyển mạch (switching plate) tiến tới gần lăng kính, thì toàn bộ ánh sáng phản xạ bên trong bị mất tác dụng, kết quả là chùm ánh sáng phản xạ sẽ di chuyển dần dần sang hướng khác.



Hình 6.25. Nguyên lý hoạt động của các bộ chuyển mạch quang:

(a) Chuyển mạch on/off dùng SOA;

(b) Bộ ghép ống dẫn sóng chế tạo từ LiNBO3;

(c) Chuyển mạch dùng lăng kính chuyển động;

(d) Chuyển mạch dùng gương hình cầu;

(e) Chuyển mạch bằng cách di chuyển sợi quang;

(f) Chuyển mạch ứng dụng hiệu ứng FTIR;

(g) Chuyển mạch quang - nhiệt sử dụng bộ giao thoa Mach-Zehnder.

Do đó, bằng cách di chuyển lá chuyển mạch hướng tới lăng kính, ta có thể định hướng tín hiệu ánh sáng sáng sợi 3. Khi lá chuyển mạch không tiếp xúc với lăng kính, sẽ xảy ra hiện tượng phản xạ ánh sáng bên trong và tín hiệu quang đi vào sợi 2. Chú ý là quá trình chuyển động cơ học của các linh kiện quang xảy ra rất nhanh, rất ít và chắc chắn. Nên hiện nay, các bộ chuyển mạch quang cơ học đang được sử dụng phổ biến nhất.

Hình 6.25(g) trình bày ví dụ về chuyển mạch quang nhiệt. Một bộ giao thoa Mach- Zehnder kết hợp với một bộ dịch pha gắn trong mỗi nhánh giao thoa. Bằng hơi nóng, ta có thể điều khiển số lượng bộ dịch pha, nghĩa là có thể định hướng tín hiệu quang sang sợi 2 hoặc sợi 3.

Các chuyển mạch quang nhiệt có tốc độ chuyển mạch nhanh hơn so với các bộ chuyển mạch quang cơ học, và quan trọng nhất là, chúng có thể được thực hiện theo công nghệ trạng thái rắn planar (planar solid - state) như các ma trận chuyển mạch lớn.

Một số tham số chính quy định đặc tính của các bộ chuyển mạch:

- Tỉ số tắt mở (extinction ratio): thể hiện đặc tính của bộ chuyển mạch on/off. Đây là tỉ số giữa năng lượng ánh sáng khi chuyển mạch ở trạng thái on và năng lượng ánh sáng khi chuyển mạch ở trạng thái off. Giá trị này càng cao càng tốt, thường nằm trong khoảng từ 45 đến 50 dB.
- Suy hao xen (insertion loss): đơn vị đo công suất suy hao do bộ chuyển mạch gây ra thường có giá trị khoảng 0.5 dB.
- Nhiễu xuyên âm (crosstalk): tỉ số giữa công suất ngõ ra được tạo ra bởi ngõ vào mong muốn và công suất ngõ ra được tạo ra bởi ngõ vào không mong muốn. Giá trị này càng cao càng tốt, thường khoảng 80 dB.
- Thời gian chuyển mạch (switching time): tham số rất quan trọng. Khi sử dụng các bộ lọc hiệu chỉnh được, thời gian chuyển mạch yêu cầu phụ thuộc vào các ứng dụng của chuyển mạch. Đối với các mạng chuyển mạch kênh ngày nay, thời gian chuyển mạch khoảng cỡ μs, thậm chí cỡ ms, nhưng đối với các mạng quang chuyển mạch gói, thời gian chuyển mạch chỉ khoảng vài ns, thậm chí khoảng ρs. Các bộ chuyển mạch đơn quang - cơ học và quang - nhiệt có thời gian chuyển mạch nằm trong khoảng từ 2 đến 20 ms, trong khi các bộ chuyển mạch đơn quang - điện có thời gian chuyển mạch cỡ ns.

Ngoài những tham số kể ra trên đây, trong tài liệu tham khảo đặc tính của phần tử chuyển mạch còn có một số tham số như dải bước sóng hoạt động, PDL, và nhiệt độ phòng.

b. Các khối chuyển mạch quang lớn (multistage/large optical switch)

Các khối chuyển mạch quang với số lượng cổng từ vài trăm đến vài ngàn đang được nghiên cứu cho hệ thống mạng quang thế hệ tiếp theo. Khi thiết kế các khối chuyển mạch quang lớn, cần quan tâm đến các vấn đề sau:

- *Số lượng của các phần tử chuyển mạch cần thiết: các bộ chuyển mạch lớn được tạo* thành từ các phần tử chuyển mạch theo nhiều cách khác nhau, như sẽ trình bày bên dưới. Chi phí và độ phức tạp của khối chuyển mạch phụ thuộc vào số phần tử chuyển mạch được yêu cầu, cách đóng gói, ghép nối, phương pháp chế tạo và điều khiển.

- *Tính đồng nhất của suy hao: các bộ chuyển mạch có thể tạo ra suy hao khác nhau* cho từng kết nối khác nhau của ngõ vào và ngõ ra. Khối chuyển mạch càng lớn thì sự khác nhau về suy hao càng nhiều. Đánh giá tính đồng nhất của suy hao bằng cách xem xét số phần tử chuyển mạch tối thiểu và tối đa trên đường dẫn quang đối với từng kết nối ngõ vào/ra khác nhau.

- *Số điểm nối chéo trong khối chuyển mạch: thông số này đặc biệt quan trọng trong* việc chế tạo các khối chuyển mạch quang. Một số khối chuyển mạch quang được tích hợp từ nhiều bộ chuyển mạch trên một mạch duy nhất. Không giống như trong các mạch điện tích hợp (IC), ở đó, các kết nối giữa nhiều linh kiện khác nhau có thể nằm trên nhiều lớp, trong các mạch quang tích hợp, tất cả các kết nối đều được tạo ra trên một lớp duy nhất bằng các ống dẫn sóng. Nếu các đường dẫn của hai ống dẫn sóng cắt nhau (tạo ra điểm nối chéo) thì sẽ xảy ra các hiệu ứng không mong muốn như suy hao công suất và hiện tượng nhiễu xuyên âm. Để hiện tượng suy hao công suất và nhiễu xuyên âm không gây ảnh hưởng đến khối chuyển mạch thì phải tối thiểu hoá hoặc hạn chế hoàn toàn các điểm cắt nhau này.

- *Các đặc tính nghẽn: về chức năng, có thể chia khối chuyển mạch thành hai loại:* nghẽn và không nghẽn. Khối chuyển mạch gọi là không nghẽn khi một cổng ngõ vào nào đó đang rỗi có thể kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng đang rỗi. Vì thế, một khối chuyển mạch không nghẽn có khả năng thực hiện mọi kết nối từ ngõ vào đến ngõ ra. Nếu trong khối chuyển mạch có một số kết nối không thể thực hiện được, khối chuyển mạch này được gọi xem là có nghẽn. Phần lớn các ứng dụng đều yêu cầu chuyển mạch không nghẽn. Với chuyển mạch không nghẽn có thể phân thành hai loại là: chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng (wide-sense nonblocking), và chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa hẹp (strict-sense non-blocking). Theo nghĩa rộng, bất kỳ ngõ vào nào chưa được sử dụng cũng có thể kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng chưa được sử dụng mà không cần phải định tuyến lại các kết nối đang tồn tại; khối chuyển mạch dạng này sử dụng các thuật toán định tuyến đặc trưng để định tuyến cho các kết nối hiện có sao cho đảm bảo không xảy ra nghẽn cho các kết nối tiếp sau đó. Theo nghĩa hẹp, bất kỳ ngõ vào nào chưa được sử dụng cũng được kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng chưa được sử dụng mà không cần quan tâm đến trạng thái của các kết nối trước đó trong khối chuyển mạch.

Một khối chuyển mạch không nghẽn yêu cầu việc định tuyến lại cho các kết nối để đảm bảo thuộc tính không nghẽn được gọi là khối chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại (rearrangeably non-blocking switch). Việc định tuyến lại các kết nối có thể hoặc không thể được chấp nhận còn tuỳ thuộc vào ứng dụng vì chắc chắn các kết nối sẽ bị ngắt trong một khoảng thời gian nào đó khi chúng được chuyển mạch sang đường dẫn khác. So với các cấu trúc chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng, ưu điểm của các cấu trúc chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại là sử dụng càng ít các bộ chuyển mạch nhỏ thì kích thước của khối chuyển mạch càng lớn. Tuy nhiên, khi các cấu trúc không nghẽn sắp xếp lại sử dụng càng ít bộ chuyển mạch nhỏ thì thuật toán điều khiển để thiết lập kết nối của chúng càng phức tạp, nhưng nói chung với công nghệ vi xử lý áp dụng trong khối chuyển mạch ngày nay, thì đây là vấn đề nhỏ, không quan trọng. Nhược điểm lớn nhất của các khối chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại là không thể phục vụ cho các ứng dụng không cho phép ngắt các kết nối đang tồn tại, thậm chí trong khoảng thời gian cực ngắn khi cần thiết lập một kết nối mới.

Rõ ràng, tuỳ thuộc vào ứng dụng của khối chuyển mạch trên thực tế một thông số có thể được ưu tiên hơn các thông số khác.

Bảng sau đây trình bày sự so sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau, trong đó cấu trúc Spanke dùng các bộ chuyển mạch 1×n, các cấu trúc còn lại đều hình thành từ bộ chuyển mạch 2×2.

Bảng1.2 So sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau.

	Loại không nghẽn	Số bộ chuyển mạch	Suy hao lớn nhất	Suy hao nhỏ nhất
Crossbar	Wide-sense	n^2	2n-1	1
Clos	Strict-sense	$4\sqrt{2}n^{1.5}$	$5\sqrt{2n}-5$	3
Spanke	Strict-sense	2n	2	2
Benes	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(2\log_2 n-1)$	$2\log_2 n-1$	$2\log_2 n-1$
Spanke-Benes	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(n-1)$	n	$\frac{n}{2}$

6.5.6. Bộ chuyển đổi bước sóng

Bộ chuyển đổi bước sóng là thiết bị chuyển đổi tín hiệu có bước sóng này ở đầu vào ra thành tín hiệu có bước sóng khác ở đầu ra. Đối với hệ thống WDM, bộ chuyển đổi bước sóng cho nhiều ứng dụng hữu ích khác nhau:

- Tín hiệu có thể đi vào mạng với bước sóng không thích hợp khi truyền trong mạng WDM. Chẳng hạn như hiện nay các thiết bị WDM trên thế giới đa số đều chỉ có khả năng hoạt động trên các bước sóng thuộc băng C và băng L, nhưng tín hiệu SDH hoạt động với bước sóng 1310 nm có thể truyền trên hệ thống WDM nhờ các bộ chuyển đổi bước sóng đặt ở biên giới giữa mạng WDM và mạng SDH, chuyển đổi tín hiệu từ bước sóng 1310 nm sang tín hiệu tương thích với bước sóng theo qui định ITU-T hoạt động ở vùng 1550 nm.

- Bộ chuyển đổi khi được trang bị trong các cấu hình nút mạng WDM giúp sử dụng tài nguyên bước sóng hiệu quả hơn, linh động hơn.

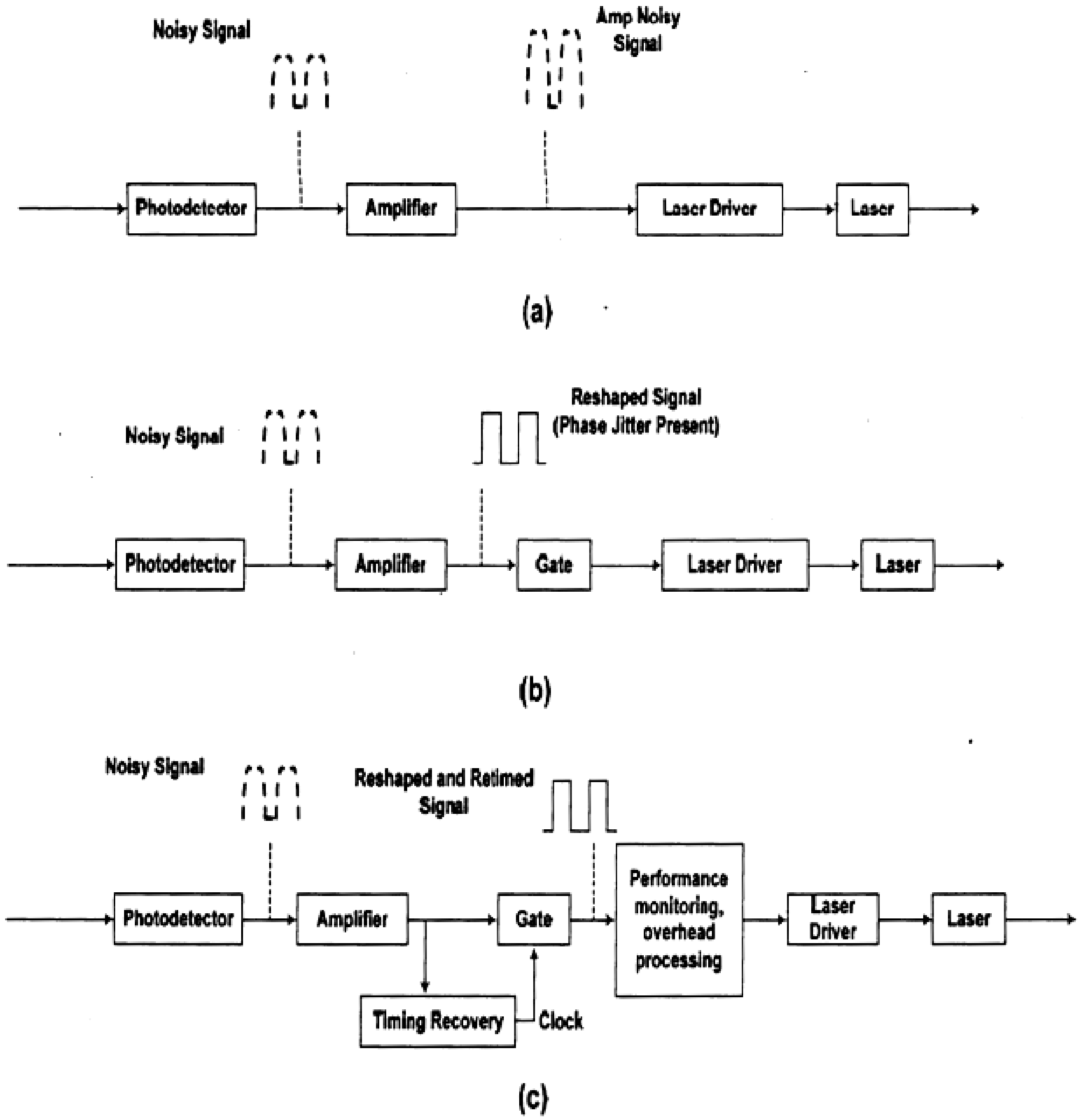
Có bốn phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng: phương pháp quang-điện, phương pháp cửa quang, phương pháp giao thoa và phương pháp trộn bước sóng. Phương pháp trộn bước sóng là phương pháp toàn quang, hoạt động hoàn toàn không dựa vào tín hiệu điện, tuy nhiên hiện tại công nghệ chế tạo theo phương pháp này vẫn chưa đủ hoàn thiện để có thể thương mại hoá.

a. Tạo bằng phương pháp quang - điện

Đây là phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng đơn giản và phổ biến nhất hiện nay.

Tín hiệu đầu vào trước hết được chuyển sang dạng tín hiệu điện, tái tạo lại và sau đó được một bộ phát laser phát bước sóng khác. Thường các bộ chuyển đổi bước sóng đầu vào biến đổi-đầu ra cố định dùng phương pháp chế tạo này. Tính trong suốt của thiết bị loại này phụ thuộc vào kiểu tái tạo (regeneration) của thiết bị đối với tín hiệu:

- Tái tạo 1R: đầu thu đơn giản chỉ chuyển đổi tín hiệu đầu vào từ dạng năng lượng các hạt photon ánh sáng sang các hạt điện tử, sau đó các hạt điện tử được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại tương tự RF (Radio Frequency) và phát ra tia laser với bước sóng thích hợp.
- Tái tạo 2R: phương pháp tái tạo này chỉ áp dụng được khi tín hiệu đầu vào là tín hiệu số. Tín hiệu được sửa lại dáng xung (reshaped) nhờ cho đi qua cổng logic, không thực hiện đồng bộ lại tín hiệu (retimed) nên phương pháp chế tạo này dễ làm nảy sinh hiện tượng Jitter.
- Tái tạo 3R: thực hiện đồng thời việc sửa dáng xung và đồng bộ lại cho tín hiệu. Phương pháp này giúp xoá bỏ những ảnh hưởng đến dạng của tín hiệu do các yếu tố như: phi tuyến tính, tán sắc trong sợi quang, nhiễu của bộ khuếch đại... Tuy nhiên, để đồng bộ lại tín hiệu mỗi bộ chuyển đổi bước sóng chỉ hoạt động tương ứng với một luồng tín hiệu số có tốc độ bit nhất định, giảm tính trong suốt của thiết bị.

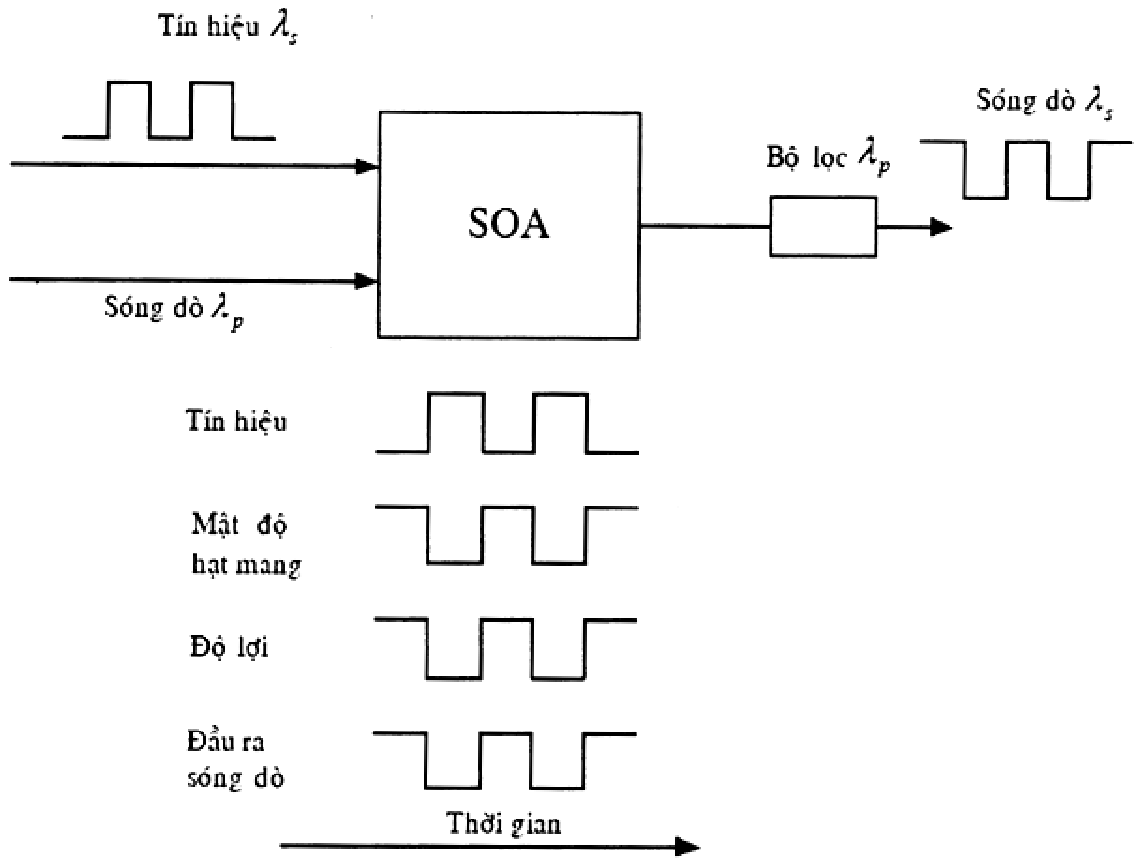


Hình 6.26. Các loại chuyển đổi bước sóng quang điện: (a) 1R; (b) 2R; (c) 3R

b. Chế tạo bằng phương pháp cửa quang

Phương pháp chế tạo các bộ chuyển đổi bước sóng dùng phương pháp cửa quang tận dụng tính chất của một số thiết bị quang có đặc tính đầu ra thay đổi theo cường độ tín hiệu. Sự thay đổi này được chuyển đến tín hiệu chưa được điều chế, gọi là tín hiệu dò (probe signal) cấu hình cho đi xuyên qua thiết bị. Tại đầu ra, tín hiệu dò mang thông tin chứa trong tín hiệu đầu vào. Các thiết bị chế tạo theo phương pháp này thường thuộc dạng đầu vào thay đổi-đầu ra cố định, hoặc đầu vào thay đổi - đầu ra thay đổi tuỳ theo tín hiệu dò là cố định hoặc có thể điều chỉnh bước sóng không.

Kỹ thuật chính của phương pháp này là điều chế chéo độ lợi CGM (Cross-Gain Modulation), tận dụng hiệu ứng phi tuyến trong một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA, tận dụng tính chất của SOA là có độ lợi thay đổi theo cường độ tín hiệu đi vào. Nguyên lý hoạt động của một thiết bị SOA được cấu hình làm bộ chuyển đổi bước sóng được minh hoạ như trên hình sau:



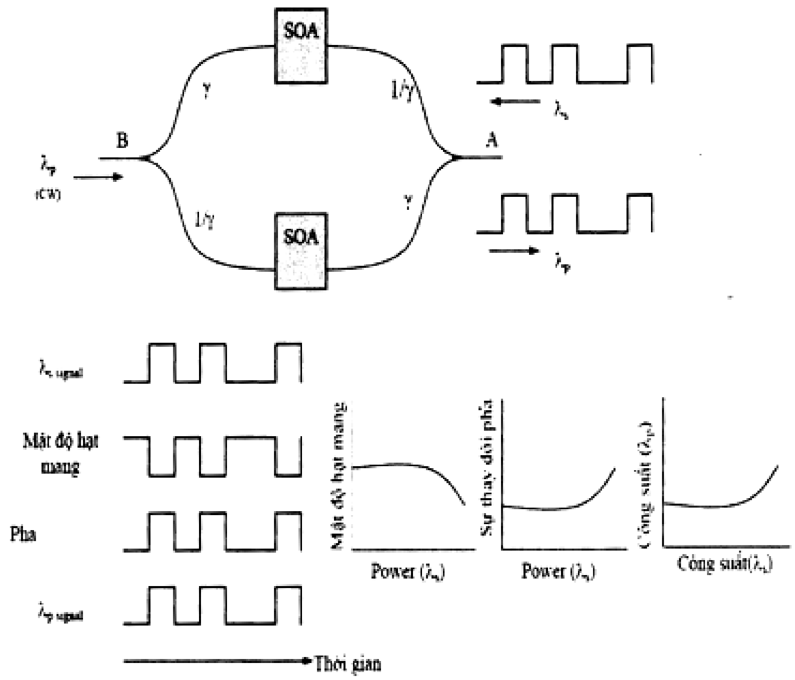
Hình 6.27. Bộ chuyển đổi bước sóng chế tạo theo phương pháp cửa quang

c. Chế tạo bằng phương pháp giao thoa

Kỹ thuật chính của phương pháp này chính là điều chế chéo pha. Khi cường độ sóng mang trong bộ khuếch đại thay đổi cùng với tín hiệu đầu vào, nó làm thay đổi chiết suất của môi trường độ lợi, dẫn đến thay đổi pha của tín hiệu dò.

Hiện tượng điều chế pha kiểu này có thể chuyển sang điều chế biên độ bằng cách dùng bộ lọc Mach-Zehnder. Trong đó, cả hai nhánh của bộ lọc Mach- Zehnder đều có cùng chiều dài, mỗi nhánh dùng kết hợp thêm với một bộ khuếchh đại SOA.

Tại đầu vào của bộ lọc Mach-Zehnder dùng bộ Coupler tách tín hiệu đi theo hai nhánh của bộ lọc theo tỉ lệ không đều nhau. Do cường độ tín hiệu đi trên mỗi nhánh không đều nhau nên khi đi qua các bộ SOA sẽ bị dịch pha các lượng không giống nhau. Theo nguyên lý hoạt động của MZI, sự lệch pha giữa hai tín hiệu này được chuyển đến một tín hiệu điều chế biên độ ở đầu ra truyền với bước sóng khác.

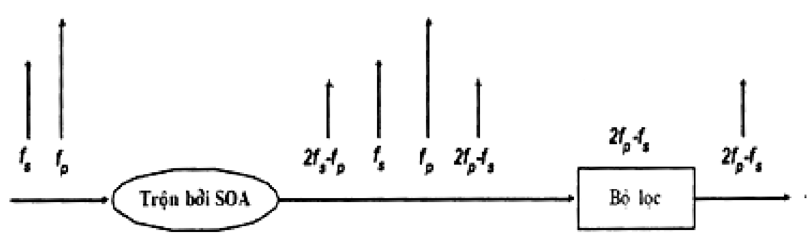


Hình 6.28. Biến đổi bước sóng bằng điều chế xuyên pha sử dụng bộ khuếch đại quang bán dẫn có gắn bộ lọc Mach-Zender bên trong

d. Chế tạo bằng phương pháp trộn bước sóng

Phương pháp chế tạo này dựa trên hiện tượng trộn bốn bước sóng, trong đó nếu có ba bước sóng f_1, f_2, f_3 cùng truyền trong sợi quang thì theo hiện tượng phi tuyến tính sẽ xuất hiện sóng ảnh hưởng do hiệu ứng phi tuyến tính được tính là: $f_1 + f_2 - f_3$. Ứng dụng cho bộ chuyển đổi bước sóng khi $f_1 = f_2$ và sau đó cho qua bộ khuếch đại SOA. Giả sử sóng vào kí hiệu là f_s và sóng dò là f_p, bộ khuếch đại SOA được cấu hình sao cho một trong hai bước sóng sinh do hiện tượng FWM $2f_p$-f_s và $2f_s$-f_p nằm trong băng thông hoạt động của tín hiệu, khi đó ta đã thực hiện được chức năng chuyển đổi bước sóng.

Ưu điểm của phương pháp chế tạo này là tính trong suốt đối với các định dạng tín hiệu, nghĩa là có thể hoạt động với nhiều tốc độ bit khác nhau. Tuy nhiên, nhược điểm là khi khoảng cách giữa bước sóng tín hiệu f_s và bước sóng dò f_p tăng thì hiệu quả chuyển đổi bước sóng sẽ giảm.



Hình 6.29. Chuyển đổi bước sóng bằng cách trộn bốn bước sóng trong bộ khuếch đại quang

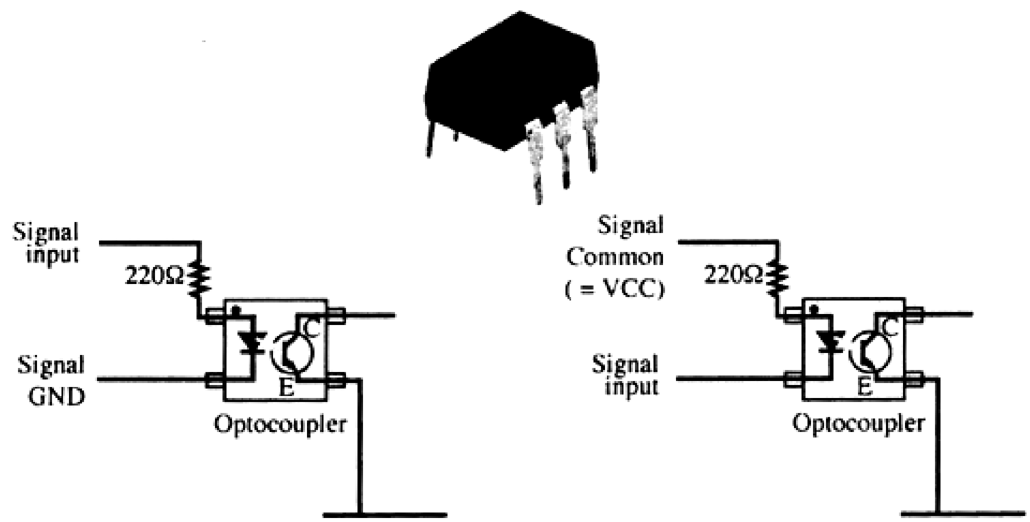
Chương 7
GHÉP QUANG VÀ KHUẾCH ĐẠI QUANG

7.1. Ghép quang

Bộ ghép quang còn gọi là Photo coupled isolator, Photo-couplers, Photo-coupled pairs và Optically Coupled pairs.Từ thông thường nhất cho linh kiện này là Opto-Couplers. Bộ ghép quang dùng để truyền đạt tín hiệu và đồng thời tạo sự cách điện giữa những mạch điện. Ngoài ra, nó còn dùng tránh các vòng đất (ground circuit circuit terrestre) gây nhiễu trong mạch điện. Sự truyền đạt tín hiệu được thực hiện qua ánh sáng.

7.1.1. Cơ chế hoạt động

Thông thường bộ ghép quang gồm 1 diot với vật liệu bán dẫn loại III/V (v.d.GaAs) phát ra tia hồng ngoại và 1 phototransitor với vật liệu silic.Với dòng điện thuận, diot phát ra bức xạ hồng ngoại với chiều dài sóng khoảng 650-950nm. Dòng điện thuận I_F có cường độ khoảng 1-30mA.



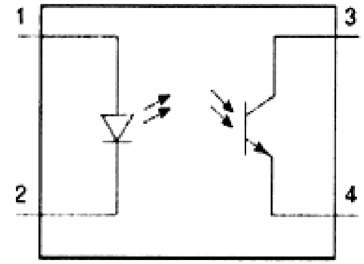
(a) Optocoupler switches on if Signal input is HIGH

(b) Optocoupler switches on if Signal input is LOW

Hình 7.1. Opto-Couplers

Năng lượng bức xạ này được chiếu lên trên bề mặt của phototransitor (face to face) hay chiếu gián tiếp qua một môi trường dẫn quang . Bộ ghép quang face to face thường được dùng nhất.

Đầu ~~tin~~ tiên tín hiệu được phần phát (LED hồng ngoại) trong bộ ghép quang biến thành tín hiệu ánh sáng. Sau đó tín hiệu ánh sáng được phần nhận (photodiot, phototransitor, IC có tổ hợp diot) biến lại thành tín hiệu điện



Hình 7.2. Nguyên lý làm việc của Opto-Couplers

Tuỳ theo loại bộ ghép quang, tần số truyền đạt tín hiệu có thể từ DC đến 20MHz. Bộ ghép quang được 1 vỏ nhựa loại DIP (Dual-In-Line-Plastic) bảo vệ. Vỏ nhựa này chắn sáng và cách điện. Phần phát và phần thu được ghép bằng 1 loại nhựa trong suốt và cách điện.

7.1.2. Các tính chất quan trọng

1. Tính cách điện

Như đã nói, bộ ghép quang thường được dùng để cách điện giữa 2 mạch điện có điện thế cách biệt khá lớn. Bộ ghép quang có thể làm việc với dòng điện 1 chiều hay tín hiệu điện có tần số khá cao. Đặc biệt với thể tích nhỏ bé, bộ ghép quang tỏ ra ưu việt hơn so với biến thế.

2. Điện trở cách điện

Đó là điện trở với dòng điện 1 chiều giữa ngõ vào và ngõ ra của bộ ghép quang. Nó có trị số bé nhất là $10^{11}\Omega$, như thế đủ đáp ứng yêu cầu thông thường. Như thế chúng ta cần chú ý, với dòng điện rò trong khoảng nA có thể ảnh hưởng đến hoạt động của mạch điện, ví dụ khi dòng điện rò chạy vào cực gốc của phototransitor còn để trống. Gặp trường hợp này ta có thể tạo những khe trống trên mạch in hay 1 đường mạch in nối với điện thế đất giữa ngõ ra và ngõ vào. Với bộ ghép quang ta cần có mạch in loại tốt.

3. Điện dung ghép nối

Sự miễn nhiễu tín hiệu đồng hành (common mode transient immunity).

Cấu trúc của bộ ghép quang gồm có phototransitor, LED, phần cơ. Giữa các phần tử này có thể tạo ra 1 điện dung từ 0.3...2pF. Điện dung này được đo khi chân ở ngõ vào cũng như chân ở ngõ ra được nối tắt. Với sự thay đổi cao áp khá nhanh (500V/μs – ví dụ do những xung điện nhiễu trong lưới điện) giữa ngõ ra và ngõ vào, điện dung ký sinh có thể truyền đi sự thay đổi này và xung điện ở ngõ ra có những gai nhọn. *Trong trường hợp này, nên sử dụng bộ ghép quang không có chân nối với cực* gốc, và giữa cực thu và cực phát nên nối 1 tụ điện để làm giảm gai nhiễu xung ra. Để không tạo thêm điện dung ký sinh, với bộ ghép quang ta không nên dùng chân đế cắm IC.Với trị số điện dung ghép nối càng bé ta có sự miễn nhiễu đồng hành càng tốt.

4. Điện thế cách ly

Điện thế cách ly là điện thế cao nhất giữa ngõ vào và ra mà bộ ghép quang có thể chịu đựng nổi. Điện thế cách ly còn tuỳ thuộc vào cấu trúc của bộ ghép quang, không khí…

5. Hiệu ứng trường

- Dưới 1 một thế khá cao giữa LED và phototransitor có khoảng cách khá gần, ta có 1 điện trường khá lớn. Nếu bộ ghép quang làm việc với điều kiện như thế liên tục vài ngày, các thông số của bộ ghép quang (đặc biệt là phototransitor) bị thay đổi.

- Hiệu ứng trường càng rõ ràng hơn với nhiệt độ cao (100^o) và 1 điện thế 1 chiều khá cao (1kV). Các thông số như độ khuếch đại, điện áp và dòng điện ngược có thể bị thay đổi, với 1 điện trường khá lớn.

- So với transitor, các thông số của LED rất ổn định dưới tác dụng của điện trường. Người ta có thể bảo vệ lớp chuyển tiếp pn của transitor silic bằng 1 màng ion trong suốt để chống lại ảnh hưởng của điện trường (Transparent Ion Shield – Trios).

6. Sự lão hoá

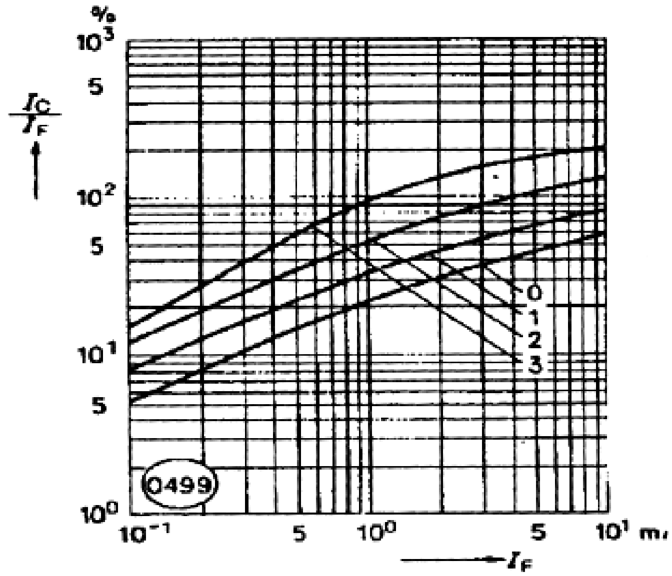
Với thời gian, công suất phát sáng của LED bị giảm đi, do đó ta có hệ số truyền đạt của 1 bộ ghép quang bé đi. Người ta tránh sự lão hoá của 1 bộ ghép quang bằng phương pháp "Burn in ". Sau khi sản xuất, các bộ ghép quang được cho làm việc với dòng điện và với nhiệt độ xung quanh khá lớn trong 1 thời gian (ví dụ 24 giờ). Do đó bộ ghép quang bị lão hoá trước và nó không bị lão hoá nhanh như các bộ ghép quang chưa qua "Burn in". Để cho bộ ghép quang làm việc lâu dài không bị lão hoá nhanh, nhiệt độ xung quanh và dòng điện làm việc càng thấp càng tốt.

7. Hệ số truyền đạt

Hệ số truyền đạt (current transfer ratio-CTR) giống như độ khuếch đại dòng điện của 1 transitor. Hệ số truyền đạt là hệ số tính theo phần trăm cho biết dòng điện điện ra (ví dụ của 1 phototransitor) lớn hơn so với dòng điện vào của LED hồng ngoại trong 1 bộ ghép quang (CTR= $(I_C/I_F) \times 100\%$).

Theo sơ đồ mạch dưới, ta có thể đo được hệ số truyền đạt. Nguồn dòng I_F có thể tạo bằng 1 điện áp ổn định nối tiếp với 1 điện trở. Trong đặc trưng kỹ thuật của 4 loại bộ ghép quang CNY17…ta có sự liên hệ giữa dòng điện I_F qua LED và hệ số truyền đạt. Sự liên hệ này không tuyến tính. Cả cường độ chiếu sáng của LED hồng ngoại và độ khuếch đại của phototransitor cũng đều gia tăng nhanh khi I_F tăng. Với dòng I_F khá lớn, đặt tuyến không còn dốc nhiều nữa. Cường độ chiếu sáng của LED không còn tăng theo I_F và phototransitor cũng bão hoà. Như thế bộ ghép quang chỉ hoạt động với tín hiệu tương đối bé.

Trong bộ ghép quang digital phần nhận là 1 mạch tổ hợp, trị số CTR không còn ý nghĩa. Ở đây, người ta chỉ cần biết với cường độ dòng điện ở ngõ vào để có trạng thái High hay Low ở ngõ ra.



Hình 7.3. Hệ số truyền đạt

8. Độ rộng dải tần số - Tần số truyền đạt

Các bộ ghép quang hiện nay có thể đạt đến tần số

- Bộ ghép quang loại transitor đến 250kHz.
- Bộ ghép quang với bộ nhận tổ hợp đơn giản (photodiode, transitor nhanh) đến 2MHz.
- Bộ ghép quang với bộ nhận là mạch tổ hợp (IC) đến 20 MHz.

7.1.3. Các sự lựa chọn khi dùng bộ ghép quang

Để đáp ứng các đòi hỏi cho từng ứng dụng các bộ ghép quang được chọn và thử nghiệm đặc biệt.

1. Đảm bảo sự cách điện

Với điện thế $V_{I/O}$ =500V và ở nhiệt độ 175°C điện trở cách nhiệt phải $\geq 10^9\Omega$.để đảm bảo sự cách điện này bộ ghép quang phải làm việc với các thông số giới hạn bằng những mạch điện bảo vệ.

2. Bộ ghép quang được thử nghiệm 100% để đảm bảo thời gian chuyển tiếp ngắn

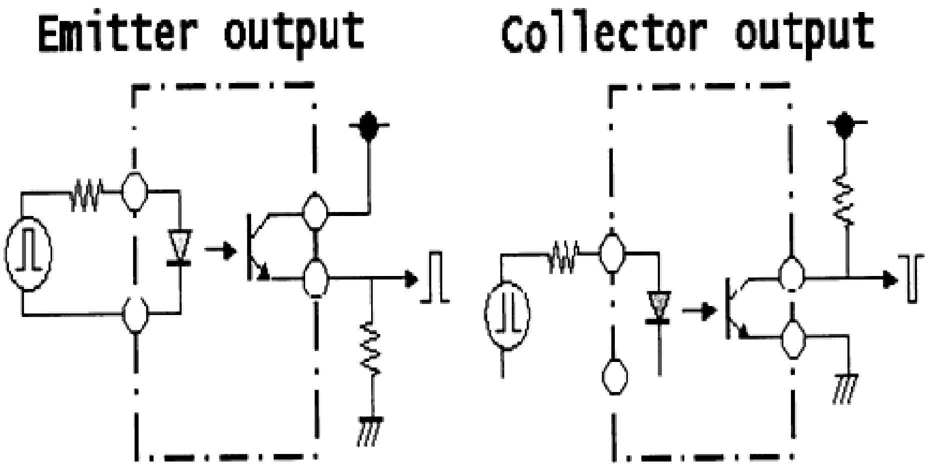
$t_{on} \leq 4{,}5\ \mu s \quad (I_F = 10mA)$

$t_{off} \leq 4{,}5\ \mu s \quad (I_F = 10mA)$

3. Có độ ổn định cao hơn với ảnh hưởng môi trường

Vì lý do kinh tế vỏ bọc bộ ghép quang không được làm bằng kim loại hay gốm mà làm bằng plastic dù phẩm chất tồi hơn. Trong những điều kiện nóng (25-55°C) và ẩm (trên 90% độ ẩm tương đối), hàm ẩm trong không khí có thể thấm vào bên trong linh kiện và làm độc cách điện giảm đi. Người ta có thể dùng silicon bọc bên ngoài.

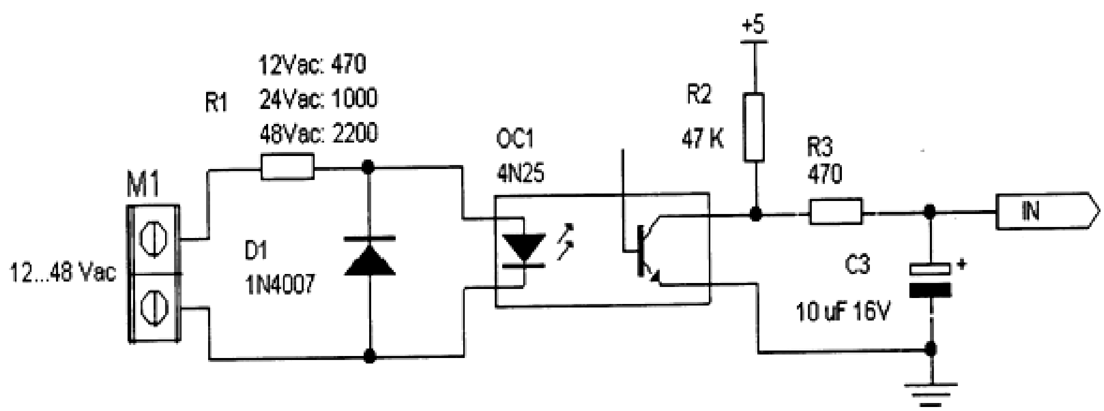
7.1.4. Bộ ghép quang với phototransistor

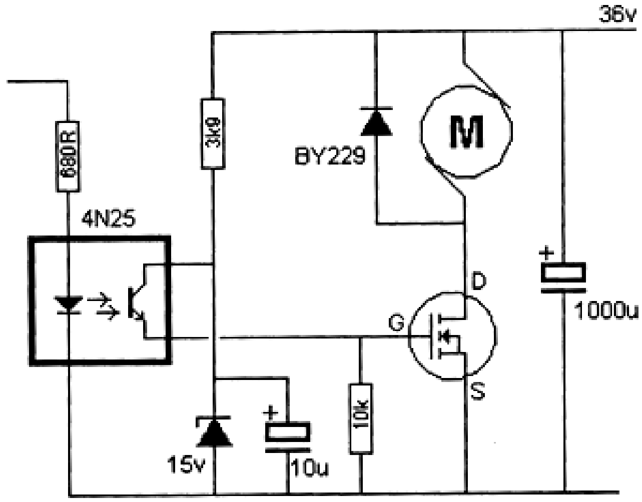


Hình 7.4.

Thông thường cực gốc của phototransitor được nối ra ngoài (ví dụ trong trường hợp với mạch phản hồi). Tuy nhiên bộ ghép quang vẫn làm việc trong trường hợp không có cực gốc. Trong trường hợp không có cực gốc, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt giữa LED và phototransitor lớn hơn, vì bề mặt cực gốc không bị che lấp 1 phần bởi công tắc của cực gốc.Tuy nhiên không có cực gốc bộ ghép quang vẫn có những bất lợi:

- Bộ ghép quang làm việc không ổn định với nhiệt độ cao (vì dòng điện ngược tăng cao với nhiệt độ).
- Bộ ghép quang làm việc chậm hơn. Nếu ta nối giữa cực gốc và cực phát 1 điện trở bộ ghép quang làm việc nhanh hơn, dòng điện ngược bé hơn. Tuy nhiên hệ số truyền đạt cũng bé đi vì 1 phần dòng điện của cực gốc bị dẫn đi mất.
- Cường độ sáng của LED bị giảm đi, nhưng dòng quang điện của phototransitor gia tăng khi nhiệt độ tăng cao. Do đó bộ ghép quang làm việc khá ổn định với nhiệt độ.





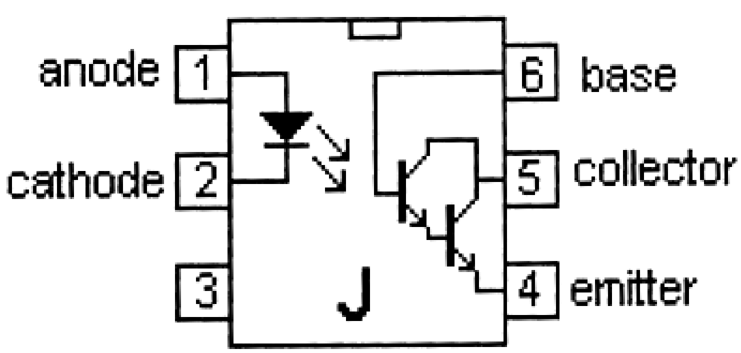
Hình 7.5.

7.1.5. Bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor

Hoạt động của một bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor giống như với 1 phototransistor, nhưng với hệ số truyền đạt lớn hơn(từ 200...1500) nhờ sự khuếch đại khá lớn của darlington-transistor. Tuy nhiên với photo darlington-transistor ta có một số nhược điểm:

- Thời gian đóng mở chậm
- Dòng tối tăng
- Tuỳ thuộc nhiều vào nhiệt độ

Với mạch điện không có điện trở ở giữa cực phát và cực gốc. Không có điện trở, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt lớn với dòng điện qua diot nhỏ, nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ rất lớn.Với điện trở (trong khoảng MΩ) bộ ghép quang có hệ số truyền đạt bé hơn nhưng làm việc tốt với nhiệt độ cao.

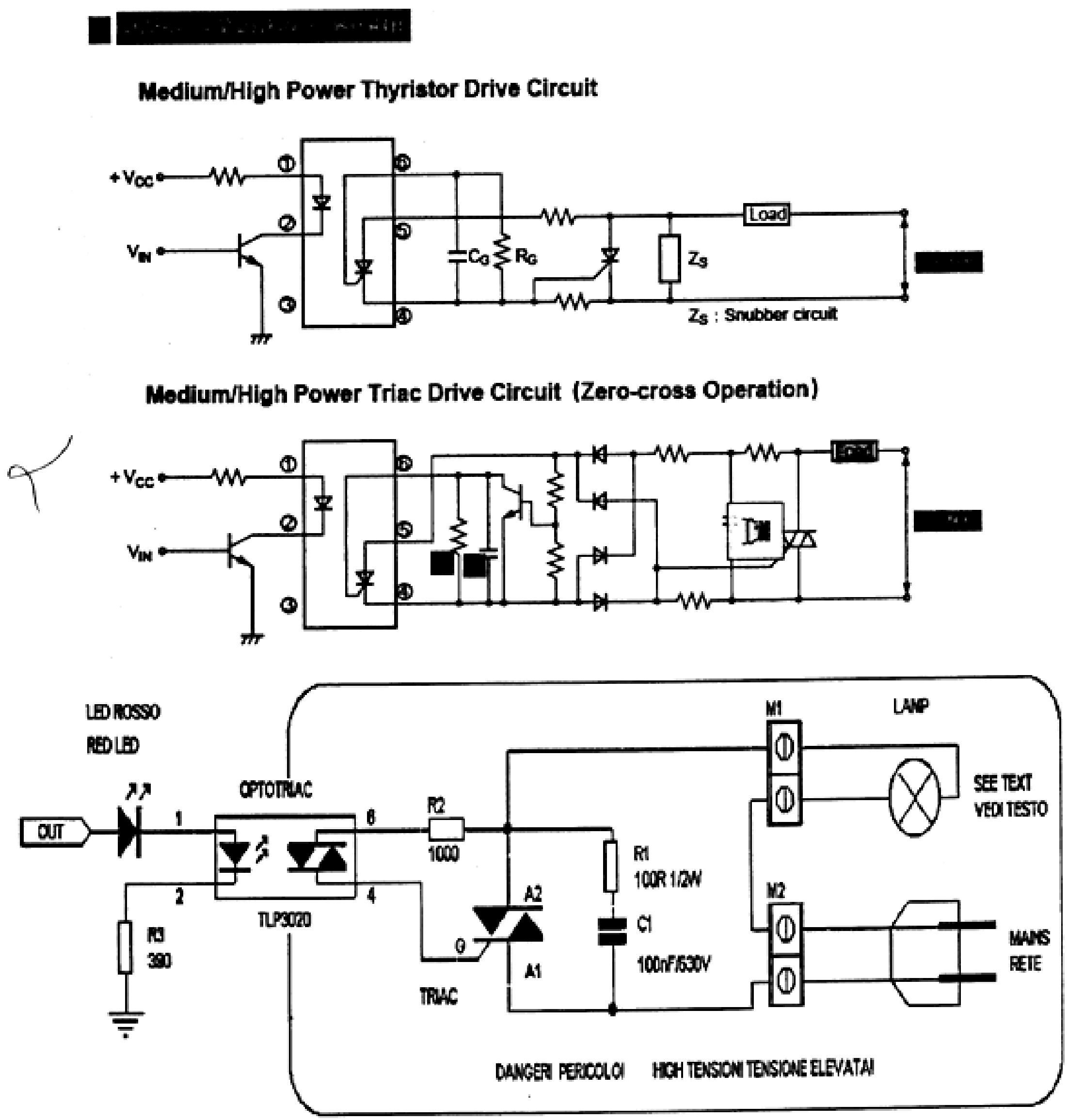


Hình 7.6.

7.1.6. Bộ ghép quang với photothyristor và phototriac

Với ánh sáng, ta có dòng điện I_B làm thông photothyristor dẫn điện .Để cho photoristor nhạy với ánh sáng nó chỉ có thể làm việc với điện áp và dòng điện bé vì cấu trúc của nó bé và mỏng.

Khi điện thế và cường độ dòng điện thay đổi nhanh theo thời gian, trị số dV/dt và di/dt khá lớn, thyristor có thể tự kích và dẫn điện ngoài ý muốn. Để chống lại hiệu ứng này, ta có thể nối 1 điện trở Rgk giữa catôt và Gate.Với trị số Rgk bé,chống nhiễu dV/dt tốt, nhưng cần dòng điện I_f qua LED lớn, ngược lại với trị số Rgk lớn (từ 10k đến 100k), dòng I_f bé nhưng chống nhiễu dV/dt tồi.



Hình 7.7.

7.1.7. Một số lưu ý cơ bản với bộ ghép quang

1. Với mạch điều khiển

- Để điều khiển các bộ ghép quang, ta cần dòng vào cho LED hồng ngoại là 10mA và dòng ra cho phototransistor khoảng 2mA là bé nhất. Để giảm thời gian lên (rise time) và thời gian trễ (propagation delay), dòng diôt hồng ngoại có thể giảm còn 1mA nhưng chống nhiễu tồi.
- Với các mạch điện trên, bộ ghép quang có thể thay thế các rơ-le. Bộ ghép quang làm việc nhanh hơn, không có hiện tượng nảy (contact bounce), an toàn hơn và cách điện tốt hơn.Tuy nhiên rơ-le làm việc với dòng điện lớn hơn, điện thế ở ngõ ra lớn hơn, điện trở khi rơ-le nối điện nhỏ hơn và điện trở ngắt điện cao hơn.
- Bộ ghép quang có thể thay thế các biến thế xung. Nó có thể truyền các tín hiệu 1 chiều hay tín hiệu có tần số thấp. Trong khi đó, biến thế xung chỉ có thể làm việc tốt với tần số cao và một bộ đệm (latch) để lưu giữ tín hiệu 1 chiều. Biến thế xung có thời gian lên nhanh hơn bộ ghép quang với phototransistor.
- Các IC tải và nhận tín hiệu được dùng trong việc truyền các tín hiệu digital qua các đường truyền dữ liệu rất dài trong sự hiện diện các tín hiệu nhiễu. Biên độ tín hiệu nhiễu cao nhất cho phép là khoảng 30V. Trong nhiều trường hợp thực tế, tín hiệu nhiễu có thể lên đến vài trăm Volt trên các đường truyền. Bộ ghép quang với độ cách điện hàng nghìn Volt tỏ ra rất hữu dụng trong trường hợp này.

2. Với mạch tuyến tính

Dòng điện thuận của diôt hồng ngoại phải có cường độ khoảng từ 5mA đến 20mA. Tín hiệu biến điệu (modulating signal) được ghép vào nền của điện thế 1 chiều này.

Với tần số cao phototransistor phải làm việc với 1 khuếch đại có tổng trở vào thấp, thường là khuếch đại có cực gốc nối đất.

3. Tóm tắt đặc tính các linh kiện ghép tín hiệu

Linh kiện	Ưu điểm	Khuyết điểm
Bộ ghép quang	- Kinh tế , rẻ tiền - Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn - Làm việc từ tín hiệu 1 chiều đến tín hiệu xoay chiều với tần số cao - Cách điện tốt đến vài KV - Tổng trở cách điện cao - Kích thước nhỏ - Không có công tắc nên không bị nảy - Công suất tiêu thụ ít	- Khi ngắt điện hay dẫn điện đều có một điện trở giới hạn (điện trở không thể bằng zero hay vô cực). - Dòng điện khi dẫn điện và điện áp khi ngắt điện đều có trị số giới hạn. - Hệ số truyền đạt CTR thấp.

Rơ-le	- Làm việc với công suất lớn - Khi dẫn điện có điện trở rất thấp - Có thể truyền tín hiệu 1 chiều - Cách điện tốt	- Đắt tiền vì má rơ-le làm bằng kim loại quý - Công suất tiêu thụ cao - Vận tốc làm việc rất chậm - Kích thước lớn
Biến thế xung	- Truyền tín hiệu với vận tốc cao. - Kích thước trung bình - Có hệ số truyền đạt tốt	- Không thể truyền tín hiệu 1 chiều hay xoay chiều có tần số thấp - Để cách điện (có tổng trở cao hay điện thế cao) rất đắt tiền.
IC phát và nhận tín hiệu đường dài	- Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn - Kích thước bé (Dip)/Truyền tin với vận tốc cao - Có thể truyền tín hiệu DC rẻ tiền.	- Tổng trở cách điện bé - Điện thế đánh thủng rất thấp ≤ 30V.

7.2. Khuếch đại quang

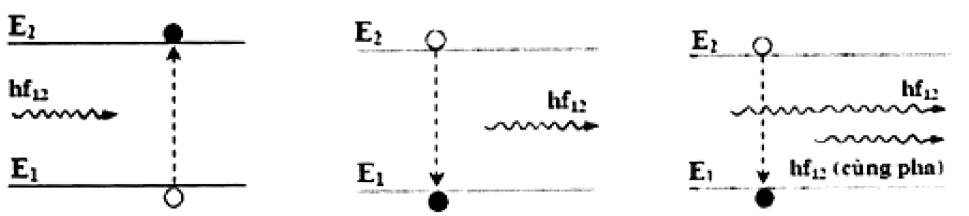
Trong các bộ khuếch đại quang (Optical Amplifier) tín hiệu ánh sáng được khuếch đại trực tiếp trong miền quang mà không thông qua việc biến đổi sang miền điện. Các bộ khuếch đại quang có các ưu điểm sau:

- Không phụ thuộc vào tốc độ bit và phương thức điều chế tín hiệu nên nâng cấp hệ thống.
- Khuếch đại nhiều tín hiệu có bước sóng khác nhau cùng truyền trên một sợi quang.

7.2.1. Nguyên lý khuếch đại quang

Nguyên lý khuếch đại quang trong các bộ khuếch đại quang được thực hiện dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích và không có sự cộng hưởng xảy ra trong quá trình khuếch đại.

a. Hiện tượng phát xạ kích thích (stimulated emission) là một trong ba hiện tượng biến đổi quang điện được ứng dụng trong thông tin quang. Các hiện tượng này được minh họa trên hình sau:



(a). Hấp thụ (b). Phát xạ tự phát (c). Phát xạ kích thích

Hình 7.8. Các hiện tượng biến đổi quang điện

➢ Hiện tượng phát xạ kích thích, **hình c**, xảy ra khi một điện tử đang ở trạng thái năng lượng cao E_2 bị kích thích bởi một photon có năng lượng hv_{12} bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($Eg = E_2 - E_1$). Khi đó, điện tử sẽ chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp hơn và tạo ra một photon có năng lượng bằng với năng lượng của photon kích thích ban đầu.

➢ Như vậy, từ một photon ban đầu sau khi khi xảy ra hiện tượng phát xạ kích thích sẽ tạo ra hai photon (photon ban đầu và photon mới được tạo ra) có cùng phương truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng tần số (tính kết hợp, coherent, của ánh sáng). Hay nói cách khác, quá trình khuếch đại ánh sáng được thực hiện.

➢ Hiện tượng này được ứng dụng trong các bộ khuếch đại quang bán dẫn (OSA) và khuếch đại quang sợi (OFA). Hiện tượng phát xạ kích thích cũng được ứng dụng trong việc chế tạo laser.

➢ Tuy nhiên, điểm khác biệt chính giữa laser và các bộ khuếch đại quang là trong các bộ khuếch đại quang không xảy hiện tượng hồi tiếp và cộng hưởng. Vì nếu xảy ra quá trình hồi tiếp và cộng hưởng như trong laser, bộ khuếch đại quang sẽ tạo ra các ánh sáng kết hợp của riêng nó cho dù không có tín hiệu quang ở ngõ vào. Nguồn ánh sáng này được xem là nhiễu xảy ra trong bộ khuếch đại. Do vậy, khuếch đại quang có thể làm tăng công suất tín hiệu ánh sáng được đưa vào ngõ vào bộ khuếch đại nhưng không tạo ra tín hiệu quang kết hợp của riêng nó ở ngõ ra.

b. Hiện tượng hấp thụ (absorption)

- Hiện tượng hấp thụ, **hình (a)**, xảy ra khi một photon có năng lượng hf_{12} bị hấp thụ bởi một điện tử ở trạng thái năng lượng thấp. Quá trình này chỉ xảy ra khi năng lượng hf_{12} của photon bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($Eg = E_2 - E_1$). Khi xảy ra hiện tượng hấp thụ, điện tử sẽ nhận năng lượng từ photon và chuyển lên trạng thái năng lượng cao. Hay nói cách khác, hiện tượng hấp thụ là nguyên nhân gây suy hao cho tín hiệu quang khi đi qua bộ khuếch đại quang. Quá trình này xảy ra đồng thời với hai hiện tượng phát xạ tự phát và phát xạ kích thích trong môi trường tích cực (active medium) của bộ khuếch đại.

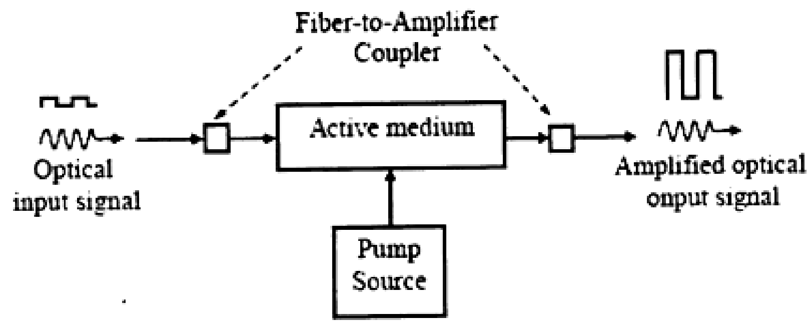
c. Hiện tượng phát xạ tự phát (spontaneous emission)

- Hiện tượng phát xạ tự phát, **hình (b)**, xảy ra khi một điện tử chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao E_2 xuống mức năng lượng thấp E_1 và phát ra một năng lượng $Eg = E_2 - E_1$ dưới dạng một photon ánh sáng. Quá trình này xảy ra một cách tự nhiên vì trạng thái năng lượng cao E_2 không phải là trạng thái năng lượng bền vững của điện tử. Sau một khoảng thời gian được gọi là thời gian sống (life time) của điện tử ở mức năng lượng cao, các điện tử sẽ tự động chuyển về trạng thái năng lượng thấp hơn (trạng thái năng lượng bền vững). Tùy theo loại vật liệu khác nhau, thời gian sống của điện tử sẽ khác nhau.

- Cho dù hiện tượng phát xạ tự phát tạo ra photon ánh sáng, nhưng trong khuếch đại quang, phát xạ tự phát không tạo ra độ lợi khuếch đại. Nguyên nhân là do hiện tượng này xảy ra một cách tự phát không phụ thuộc vào tín hiệu ánh sáng đưa vào bộ khuếch đại. Nếu không có ánh sáng tín hiệu đưa vào, vẫn có năng lượng ánh sáng được tạo ra ở ngõ ra của bộ khuếch đại. Ngoài ra, ánh sáng do phát xạ tự phát tạo ra không có tính kết hợp như hiện tượng phát xạ kích thích.
- Do vậy, phát xạ tự phát được xem là nguyên nhân chính gây nhiễu trong các bộ khuếch đại quang. Loại nhiễu này được gọi là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission noise).

7.2.2. Phân loại khuếch đại quang

Tổng quát, cấu tạo của một bộ khuếch đại quang có thể được biểu diễn như hình sau:



Hình 7.9. Mô hình tổng quát của một bộ khuếch đại quang

- Trong một bộ khuếch đại quang, quá trình khuếch đại ánh sáng được diễn ra ~~trong~~ trong một môi trường được gọi vùng tích cực (active medium). Các tín hiệu quang được khuếch đại trong vùng tích cực với độ lợi lớn hay nhỏ tùy thuộc vào năng lượng được cung cấp từ một nguồn bên ngoài gọi chung là nguồn bơm (Pump Source). Các nguồn bơm này có tính chất như thế nào tùy thuộc vào loại khuếch đại quang hay nói cách khác phụ thuộc vào cấu tạo của vùng tích cực.
- Tùy theo cấu tạo của vùng tích cực, có thể chia khuếch đại quang thành hai loại chính:

✓ Khuếch đại quang bán dẫn SOA (Semiconductor Optical Amplifier)

- Vùng tích cực được cấu tạo bằng vật liệu bán dẫn.
- Cấu trúc của vùng tích cực của SOA tương tự như vùng tích cực của laser bán dẫn. Điểm khác biệt chính giữa SOA và laser là SOA hoạt động ở trạng thái dưới mức ngưỡng phát xạ.
- Nguồn cung cấp năng lượng để khuếch đại tín hiệu quang là dòng điện.

✓ Khuếch đại quang sợi OFA (Optical Fiber Amplifier)

- Vùng tích cực là sợi quang được pha đất hiếm. Do đó, OFA còn được gọi là DFA (Doped-Fiber Amplifier).
- Nguồn bơm là năng lượng ánh sáng được cung cấp bởi các laser có bước sóng phát quang nhỏ hơn bước sóng của tín hiệu cần khuếch đại.
- Tùy theo loại đất hiếm được pha trong lõi của sợi quang, bước sóng bơm của nguồn bơm và vùng ánh sáng được khuếch đại của OFA sẽ thay đổi. Một số loại OFA tiêu biểu:

 + EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier): 1530nm – 1565nm

 + PDFA (Praseodymium-Doped Fiber Amplifier): 1280nm – 1340nm

 + TDFA (Thulium-Doped Fiber Amplifier): 1440nm -1520nm

 + NDFA (Neodymium-Doped Fiber Amplifier): 900nm, 1065nm hoặc 1400nm

⊕ Trong các loại OFA này, EDFA được sử dụng phổ biến hiện nay vì có nhiều ưu điểm về đặc tính kỹ thuật so với SOA và có vùng ánh sáng khuếch đại (1530nm-1565nm) thích hợp với dải tần hoạt động của hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

⊕ Cả hai loại khuếch đại quang SOA và EDFA đều hoạt động dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích. Ngoài ra, một loại khuếch đại quang khác cũng được sử dụng nhiều trong các hệ thống WDM hiện nay là khuếch đại Raman. Loại khuếch đại này cũng sử dụng sợi quang làm vùng tích cực để khuếch đại ánh sáng. Tuy nhiên, nguyên lý khuếch đại của khuếch đại Raman dựa trên ảnh hưởng phi tuyến của sợi quang (hiện tượng tán xạ Raman được kích thích SRS, Stimulated Raman Scattering) hơn là hiện tượng phát xạ kích thích.

7.2.3. Các thông số kỹ thuật của khuếch đại quang

a. Độ lợi (Gain)

- Độ lợi của một bộ khuếch đại quang là tỷ số giữa công suất quang ở ngõ ra chia cho công suất quang ở ngõ vào.

$$G = \frac{Pout}{Pin} \qquad (1.1)$$

$$G(dB) = 10.\log[\frac{Pout}{Pin}] \qquad (1.2)$$

- G: Độ lợi tín hiệu của bộ khuếch đại quang
- P_{in}, P_{out} công suất tín hiệu ánh sáng ở ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại quang (mW).

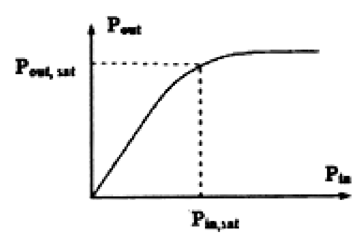
- Độ lợi là một thông số quan trọng của bộ khuếch đại. Nó đặc trưng cho khả năng khuếch đại công suất ánh sáng của bộ khuếch đại. Tuy vậy, độ lợi của một bộ khuếch đại bị giới hạn bởi các cơ chế bão hòa độ lợi. Điều này làm giới hạn công suất quang ra cực đại của bộ khuếch đại.

b. Băng thông độ lợi (Gain Bandwidth)

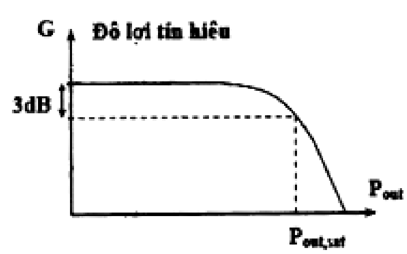
- Độ lợi của bộ khuếch đại quang không bằng nhau cho tất cả các tần số của tín hiệu quang vào. Nếu đo độ lợi G của các tín hiệu quang với các tần số khác nhau, một đáp ứng tần số quang của bộ khuếch đại G(f) sẽ đạt được. Đây chính là phổ độ lợi của bộ khuếch đại quang.
- Băng thông độ lợi của bộ khuếch đại quang B_0 được xác định bởi điểm -3dB so với độ lợi đỉnh của bộ khuếch đại. Giá trị B_0 xác định băng thông của các tín hiệu có thể được truyền bởi một bộ khuếch đại quang. Do đó, ảnh hưởng đến hoạt động của các hệ thống thông tin quang khi sử dụng chúng như các bộ lặp hay bộ tiền khuếch đại.

c. Công suất ngõ ra bão hòa (Saturation Output Power)

- Khi hoạt động ở chế độ tín hiệu nhỏ, công suất quang ở ngõ ra sẽ tăng tuyến tính với công suất quang ở ngõ vào theo hệ số độ lợi G: $P_{out} = G.P_{in}$. Tuy nhiên, công suất ngõ ra không thể tăng mãi được. Bằng thực nghiệm, người ta thấy rằng trong tất cả các bộ khuếch đại quang, khi công suất ngõ vào P_{in} tăng đến một mức nào đó, độ lợi G bắt đầu giảm. Kết quả là công suất ở ngõ ra không còn tăng tuyến tính với tính hiệu ngõ ra nữa mà đạt trạng thái bảo hòa. Sự thay đổi của tín hiệu quang ngõ ra so với công suất quang ngõ vào ở được minh họa trong hình sau:



Hình 7.10. Công suất ngõ ra theo công suất ngõ vào



Hình 7.11. Độ lợi khuếch đại theo công suất quang ngõ ra

Hình trên biểu diễn sự biến đổi của độ lợi tín hiệu G theo công suất quang ngõ ra Pout. Công suất ở ngõ ra tại điểm độ lợi giảm đi 3 dB được gọi là công suất ra bão hòa $P_{sat, out}$.

- Công suất ra bảo hòa $P_{sat, out}$ của một bộ khuếch đại quang cho biết công suất ngõ ra lớn nhất mà bộ khuếch đại quang đó có thể hoạt động được. Thông thường, một bộ khuếch đại quang có độ lợi cao sẽ có công suất ra bão hòa cao bởi vì sự nghịch đảo nồng độ cao có thể được duy trì trong một dải công suất vào và ra rộng.

d. Hệ số nhiễu (Noise Figure)

- Giống như các bộ khuếch đại điện, các bộ khuếch đại quang đều tạo ra nhiễu. Nguồn nhiễu chính trong các bộ khuếch đại quang là do phát xạ tự phát. Vì sự phát xạ tự phát là các sự kiện ngẫu nhiên, pha của các photon phát xạ tự phát cũng ngẫu nhiên. Nếu photon phát xạ tự phát có hướng gần với hướng truyền của các photon tín hiệu, chúng sẽ tương tác với các photon tín hiệu gây nên sự dao động về pha và biên độ. Bên cạnh đó, năng lượng do phát xạ tự phát tạo ra cũng sẽ được khuếch đại khi chúng truyền qua bộ khuếch đại về phía ngõ ra. Do đó, tại ngõ ra của bộ khuếch đại công suất quang thu được P_{out} bao gồm cả công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission).

$$\boxed{Pout = G.P_{in} + P_{ASE}} \quad (1.3)$$

- Ảnh hưởng của nhiễu đối với bộ khuếch quang được biểu diễn bởi hệ số nhiễu NF (Noise Figure), mô tả sự suy giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal to Noise Ratio) do nhiễu của bộ khuếch đại thêm vào. Hệ số NF được cho bởi công thức sau:

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (1.4)$$

SNR_{in}, SNR_{out} là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại.

Hệ số nhiễu NF của bộ khuếch đại càng nhỏ thì càng tốt. Giá trị nhỏ nhất của NF có thể đạt được là 3dB. Những bộ khuếch đại thỏa mãn hệ số nhiễu tối thiểu này được gọi là đang hoạt động ở giới hạn lượng tử.

Ngoài bốn thông số kỹ thuật chính được nêu ở trên, các bộ khuếch đại quang còn được đánh giá dựa trên các thông số sau

- Độ nhạy phân cực (Polarization sensitivity) là sự phụ thuộc của độ lợi của bộ khuếch đại vào phân cực của tín hiệu.
- Ảnh hưởng của nhiệt độ đối với độ lợi và băng thông độ lợi.
- Xuyên nhiễu (crosstalk).

7.2.4. Ứng dụng của khuếch đại quang

Khuếch đại quang được ứng dụng trong các các hệ thống truyền dẫn quang như các bộ khuếch đại nhằm làm tăng công suất của tín hiệu quang trên đường truyền, khắc phục suy hao do sợi quang và các mối hàn, nối xảy ra trên đường truyền. Tùy theo vị trí lắp đặt, các bộ khuếch đại trên tuyến truyền dẫn quang được chia làm ba loại:

a. **Khuếch đại công suất** *(Booster Amplifier):* Bộ khuếch đại quang được đặt ngay sau thiết bị phát nhằm mục đích làm tăng công suất tín hiệu quang đến mức cao nhất để làm cho khoảng cách truyền cực đại. Yêu cầu của các bộ khuếch đại công suất là tạo ra công suất đầu ra cực đại chứ không phải độ lợi cực đại vì công suất tín hiệu ngõ vào lớn.

b. **Khuếch đại đường dây** *(In-line Amplifier):* Các bộ khuếch đại quang được đặt trên tuyến quang nhằm mục đích bù mất mát công suất gây ra bởi suy hao sợi, suy hao do kết nối và suy hao do việc phân phối tín hiệu quang trong mạng. Các bộ khuếch đại đường dây có thể được lắp đặt nối tiếp nhau trên đường truyền để gia tăng khoảng cách lắp đặt. Tuy nhiên, việc lắp đặt nối tiếp các bộ khuếch đại quang sẽ làm giảm hệ số SNR ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống truyền dẫn quang. Yêu cầu của bộ khuếch đại đường dây là độ ổn định trên toàn bộ dải thông của hệ thống WDM, giữ nhiễu ở mức cực tiểu và thực hiện việc trao đổi tốt tín hiệu quang với sợi quang truyền dẫn.

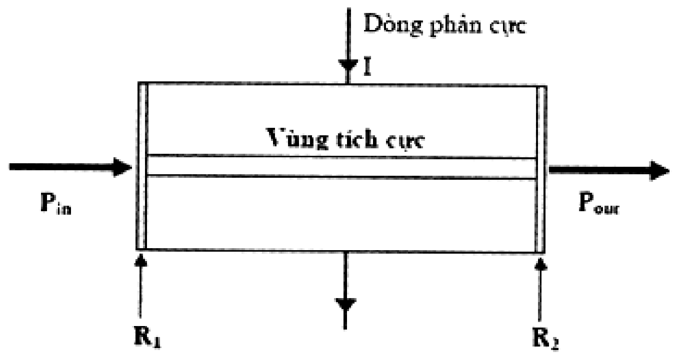
c. **Tiền khuếch đại** (*Preamplifier*): Các bộ khuếch đại quang được đặt ngay trước thiết bị thu quang nhằm khuếch đại tín hiệu ngay trước khi tín hiệu được đưa vào thiết bị. Điều này làm giảm yêu cầu nghiêm ngặt của độ nhạy thiết bị thu và cho phép hệ thống truyền dẫn quang hoạt động với tốc độ bit cao hơn. Do vị trí lắp đặt, các bộ tiền khuếch đại hoạt động với công suất tín hiệu vào yếu và mức nhiễu ở đầu thu cao. Do vậy, yêu cầu của một bộ tiền khuếch đại là độ nhạy lớn, độ lợi lớn và nhiễu thấp.

✓ Ngoài các ứng dụng chính làm các bộ khuếch đại trên đường truyền quang, các bộ khuếch đại quang SOA và OFA còn được sử dụng trong các bộ chuyển đổi bước sóng. Việc chuyển đổi bước sóng được thực hiện dựa trên hiện tượng bão hòa độ lợi và hiện tượng trộn bốn bước sóng FWM (Four-Wave Mixing) xảy ra trong các bộ khuếch đại quang.

7.3. Bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA)

7.3.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của khuếch đại quang bán dẫn SOA (Semiconductor Optical Amplifier) tương tự như laser bán dẫn. Nghĩa là cũng dựa vào hệ thống hai dải năng lượng của chất bán dẫn và các quá trình biến đổi quang điện: hấp thụ (absorption), phát xạ tự phát (spontaneous emission) và phát xạ kích thích (stimulated emission). Trong đó, tín hiệu quang được khuếch đại dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra trong vùng tích cực của SOA. Vùng tích cực này được đặt giữa hai lớp bán dẫn loại n và p. Nguồn bơm bên ngoài được cung cấp bởi dòng điện phân cực.



Hình 7.12. Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA

Do có cấu trúc và nguyên lý hoạt động tương tự với laser bán dẫn nên SOA còn được gọi là khuếch đại laser bán dẫn SLA (Semiconductor Laser Amplifier).

Sự khác nhau chính giữa SOA và laser bán dẫn là SOA hoạt động dưới mức ngưỡng dao động. Điều kiện này xảy ra khi dòng điện phân cực I_{bias} < dòng điện ngưỡng I_{th} của laser và hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của vùng tích cực nhỏ. Khi đó, quá trình phản xạ, cộng hưởng và tự phát xạ ánh sáng sẽ không xảy ra.

SOA có thể được phân thành hai loại chính dựa vào hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của lớp tích cực.

– Loại thứ nhất, khuếch đại Fabry-Perot ***FPA (Fabry-Perot Amplifier)*** có hệ số phản xạ cao (có thể lên tới 32%). Cấu trúc của FPA cũng tương tự như laser Fabry-Perot nhưng hoạt động với dòng phân cực $I_{bias}<I_{th}$. Với cấu trúc hốc cộng hưởng có hệ số phản xạ cao, quá trình hồi tiếp, chọn lọc tần số xảy ra. Kết quả là, FPA có độ lợi cao nhưng phổ độ lợi khuếch đại nhấp nhô, không đều. Điều này làm giảm băng thông khuếch đại của FPA.

– Để khắc phục hạn chế trên của FPA, hai lớp chống phản xạ AR (anti-reflection) có hệ số phản xạ R = 0, được đặt tại hai đầu của vùng tích cực để không cho quá trình phản xạ xảy ra bên trong bộ khuếch đại. Khi đó, tín hiệu vào SOA sẽ được khuếch đại khi chỉ đi qua một lần (được gọi là single pass) xuyên qua vùng tích cực của bộ khuếch đại mà không có hồi tiếp về. Đây là cấu trúc của loại SOA thứ hai: khuếch đại sóng chạy ***TWA (Traveling Wave Amplifier).*** Trên thực tế, hệ số phản xạ ở hai đầu của vùng tích cực của TWA không hoàn toàn bằng 0 mà có giá trị rất nhỏ từ 0.1% đến 0.01%.

7.3.2. Đặc tính của bộ khuếch đại FPA và TWA

- Xét một bộ khuếch đại FPA có hệ số phản xạ công suất ở hai mặt phản xạ của lớp tích cực là R_1 và R_2 như *hình 7.12.* Bộ khuếch đại này cũng có thể TWA nếu cho $R_1 = R_2 = 0$. Do đó, quá trình phân tích sau, đều có thể áp dụng cho FPA và TWA.
- Bỏ qua suy hao khi ánh sáng truyền qua mỗi mặt phản xạ, ta có hệ số xuyên qua của công suất ánh sáng đi qua mỗi mặt phản xạ tương ứng là $(1-R_1)$ và $(1-R_2)$.

⊕ Tương ứng, ta có hệ phản xạ và hệ số xuyên qua của cường độ điện trường tại hai mặt phản xạ là:

$$\sqrt{R_1}\,,\ \sqrt{R_2}\ \text{và}\ t_1 = \sqrt{1-R_1}\,,\ t_2 = \sqrt{1-R_2}$$

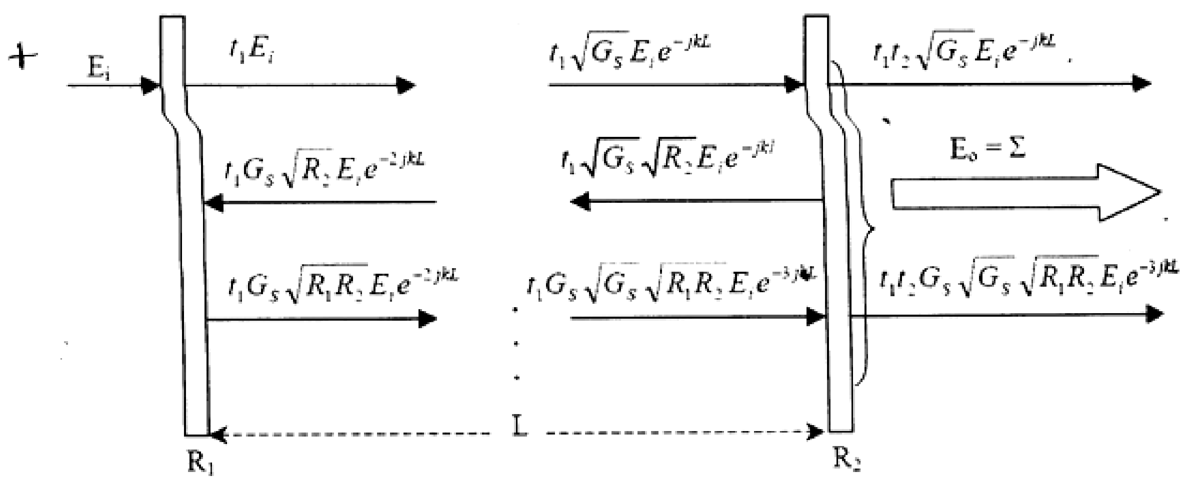
⊕ Gọi Gs là ~~tăng~~ độ lợi đơn thông (single-pass gain) của SOA khi tín hiệu quang đi qua vùng tích cực mà không có sự hồi tiếp (hệ số phản xạ R= 0).

Ta có:

$$G_s = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - \alpha)L] \qquad (1.5)$$

Trong đó:

- g: độ lợi trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực
- α: suy hao trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực
- Γ: hệ số tập trung (confinement factor) biểu diễn mức độ tập trung của luồng ánh sáng bên trong vùng tích cực
- L: chiều dài của vùng tích cực
- Pin, Pout: công suất tín hiệu ở ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại .



Hình 7.12. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra trong FPA

Quá trình khuếch đại tín hiệu ánh sáng trong FPA (xem *Hình 7.12.*) có thể được dẫn giải như sau:

Điện trường của tín hiệu quang vào E_i được đưa vào hốc cộng hưởng của FPA có chiều dài L tại mặt phản xạ R_1. Sau khi xuyên qua mặt phản xạ R_1, tín hiệu ban đầu sẽ được khuếch đại bởi vùng tích cực và đạt cường độ $t_1\sqrt{G_S}E_ie^{-jkL}$ tại mặt phản xạ R_2 (k là hệ số truyền dẫn của môi trường khuếch đại).

Tại đây, một phần năng lượng ánh sáng sẽ truyền ra ngoài với cường độ $t_1 t_2 \sqrt{G_S} E_i e^{-jkL}$. Phần còn lại sẽ phản xạ ngược trở lại về phía R_1 với cường độ $t_1 \sqrt{G_S} \sqrt{R_2} E_i e^{-jkL}$.

- ✓ Tại R_1, điện trường thu được là $t_1 G_S \sqrt{R_2} E_i e^{-2jkL}$. Tương tự như tại R_2, một phần điện trường $t_1 G_S \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-2jkL}$ sẽ phản xạ ngược về phía R_2, phần còn lại sẽ đi ra ngoài hốc cộng hưởng.
- ✓ Sau khi đi qua khoảng cách L của vùng tích cực, tín hiệu thu được tại R_1 đạt giá trị $t_1 G_S \sqrt{G_S} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkL}$. Quá trình phản xạ và truyền xuyên qua mặt phản xạ R2 tiếp tục diễn ra. Phần tín hiệu xuyên qua có điện trường $t_1 t_2 G_S \sqrt{G_S} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkL}$. Phần còn lại sẽ phản xạ ngược về phía R_1. Cứ như vậy quá trình phản xạ trong vùng tích cực tiếp tục tiếp diễn.
- ✓ Điện trường tổng cộng thu được tại ngõ ra của bộ khuếch đại sẽ bằng tổng của các thành phần điện trường đi xuyên qua R_2. Nếu giả sử rằng thời gian truyền trong hốc cộng hưởng nhỏ hơn chu kỳ của điện trường tới E_i, ta có điện trường thu được tại ngõ ra.

$$E_o = E_i e^{-jkL} t_1 t_2 \sum_{m=0}^{\infty} (\sqrt{R_1 R_2}\, G_s)^m e^{-2mjkL}$$

Với $\left|\sqrt{R_1 R_2} G_s\right| < 1$, biểu thức (2.6) có thể biến đổi thành:

$$E_o = E_i \frac{\sqrt{G_s}\, t_1 t_2 e^{-jkL}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}\, G_s e^{-2jkL}}$$

Hàm truyền công suất của bộ khuếch đại FPA:

$$G_{FPA}(\omega) = \left|\frac{E_o}{E_i}\right|^2 = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_s(\omega)}{(1-G_S\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G_S\sqrt{R_1 R_2}\sin^2 kL]}$$

Do:

$$\sin^2(kL) = \sin^2\left(\frac{\omega}{v}L\right) = \sin^2\left(\frac{(\omega-\omega_0)}{v}L\right)$$

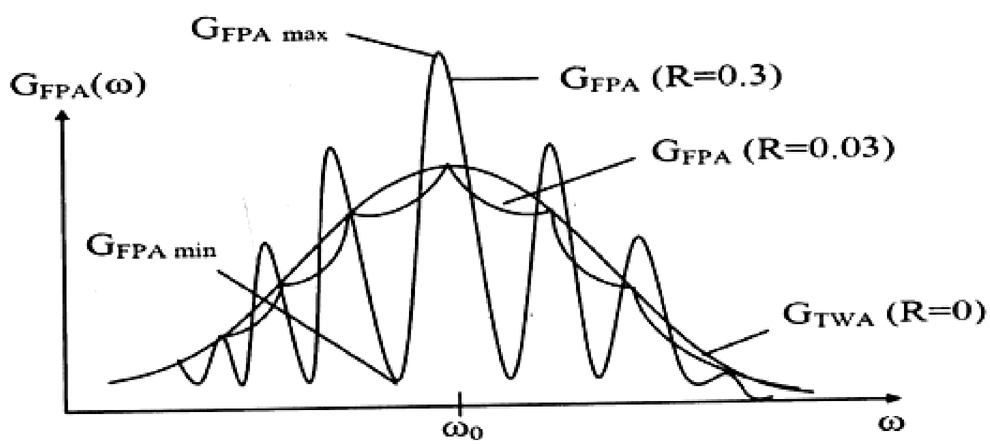
Với v là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại, ω là tần số góc đang xét, ω_0 là tần số góc cộng hưởng mà tại đó độ lợi đạt giá trị lớn nhất. Biểu thức trên được viết lại như sau:

$$G_{FPA}(\omega) = \left|\frac{E_o}{E_i}\right|^2 = \frac{(1-R_1)(1-R_2)G_S(\omega)}{(1-G_S\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G_S\sqrt{R_1 R_2}\sin^2[(\omega-\omega_0)L/v]}$$

Nếu hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của FPA bằng nhau $R_1 = R_2 = R$.

$$G_{FPA}(\omega) = \left|\frac{E_o}{E_i}\right|^2 = \frac{(1-R)^2 G_S(\omega)}{(1-G_S R)^2 + 4G_S R\sin^2[(\omega-\omega_0)L/v]}$$

- v là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại
- ω là tần số góc đang xét
- ω_0 là tần số góc cộng hưởng mà tại đó độ lợi đạt giá trị lớn nhất
- L chiều dài FPA
- R hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ
- Gs là rằng độ lợi đơn thông (single-pass gain) của SOA



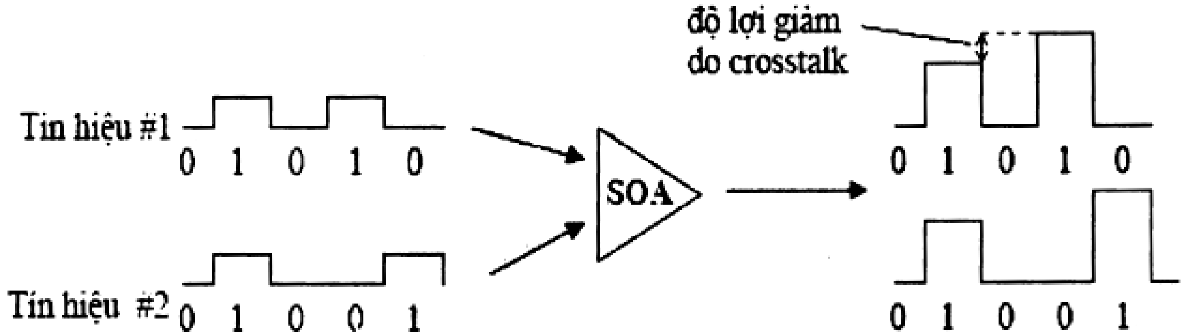
Hình 7.13. Độ lợi G(f) của FPA thay đổi theo tần số với R = 0.3;R = 0.03 và R = 0

- ✓ Giả sử độ lợi đơn thông Gs, tương ứng với R = 0 (TWA), có dạng Gauss. Khi hệ số phản xạ của hai lớp phản xạ của vùng tích cực lớn R = 0.3, độ lợi G(ω) không bằng phẳng theo tần số mà cớ dạng gợn sóng lớn do chức năng lọc tần số của hốc cộng hưởng.
- ✓ Tại các tần số cộng hưởng ω = (2πfN)/(2L) với N là số nguyên, độ lợi của FPA đạt giá trị cực đại. Giữa các tần số cộng hưởng, độ lợi của FPA giảm nhanh chóng.. Do đó, băng thông độ lợi (được xác định tại vị trí -3dB so với độ lợi đỉnh) của FPA nhỏ so với băng thông độ lợi của TWA.,
- ✓ Vì vậy, FPA không thích hợp với các ứng dụng khuếch đại trong hệ thống thông tin quang.
- ✓ Khi hệ số phản xạ R = 0.03, G(ω) tiến gần tới Gs nhưng vẫn còn gợn sóng nhỏ. Độ gợn sóng này có thể được loại bỏ bằng cách giảm hệ số phản xạ hơn nữa để bộ khuếch đại trở thành TWA.

7.3.3. Nhiễu xuyên âm (Crosstalk) trong SOA

Nhiễu xuyên âm xảy ra khi các tín hiệu quang khác nhau được khuếch đại đồng thời trong cùng một bộ khuếch đại. Có hai loại nhiễu xuyên âm xảy ra trong SOA: nhiễu xuyên kênh (interchannel crosstalk) và bão hòa độ lợi (cross saturation).

Nhiễu xuyên kênh xảy ra là do hiệu ứng trộn bốn bước sóng FWM (Four Wave Mixing). Bản chất và ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến này đối hệ thống thông tin quang WDM không được trình bày trong chương này.



Hình 7.14. Ảnh hưởng của nhiễu xuyên kênh trong SOA khi khuếch đại hai tín hiệu

Nhiễu xuyên kênh gây nên do hiện tượng bảo hòa độ lợi xảy ra trong SOA được minh họa trên. Xem xét đầu vào bộ SOA là tổng của hai tín hiệu quang ở các bước sóng khác nhau. Giả thiết rằng cả 2 bước sóng nằm trong băng thông của SOA. Sự có mặt của tín hiệu thứ hai sẽ làm suy giảm mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao do quá trình bức xạ kích thích làm dẫn đến sự nghịch đảo nồng độ được quan sát ở tín hiệu thứ nhất giảm xuống. Do đó, tín hiệu thứ nhất sẽ không được khuếch đại giống như tín hiệu thứ hai, và nếu mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao không đủ lớn thì tín hiệu thứ nhất có thể bị hấp thụ. Quá trình này xảy ra đồng thời đối với cả hai tín hiệu. Do đó, trên hình ~~2.8~~ ta thấy, khi mức 1 của hai tín hiệu 1 và 2 xảy ra đồng thời, độ lợi của mỗi tín hiệu sẽ nhỏ hơn so với bình thường.

Hiện tượng xuyên âm phụ thuộc vào thời gian sống của điện tử ở trạng thái năng lượng cao. Nếu thời gian sống đủ lớn so với tốc độ dao động của công suất trong các tín hiệu vào, các điện tử không thể chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp do sự dao động này. Do đó, không có xuyên âm xảy ra.

Đối với các SOA, thời gian sống này ở mức ns. Do đó, các điện tử dễ dàng phản ứng lại sự dao động trong công suất của các tín hiệu được điều chế ở tốc độ Gb/s, dẫn đến một sự suy yếu hệ thống chính do xuyên âm. Ngược lại, thời gian sống phát xạ tự phát trong EDFA là khoảng 10ms. Do đó, xuyên âm chỉ có mặt nếu tốc độ điều chế của các tín hiệu vào ít hơn vài kiloHertz, điều này thường ít gặp trong thực tế. Do đó, EDFA phù hợp hơn khi được sử dụng trong các hệ thống WDM hơn SOA.

7.3.4. Ưu khuyết điểm và ứng dụng của SOA

➢ *Ưu điểm*

- Độ lợi cao (25-30dB).
- Kích thước nhỏ, có thể tích hợp với các linh kiện quang bán dẫn khác.
- Dải thông lớn, có thể lên tới 100 nm, rộng hơn so với EDFA.
- Có thể thực hiện khuếch đại tín hiệu ở cả hai cửa sổ ánh sáng 1300nm và 1550nm.

➢ *Khuyết điểm*

- Công suất ra bão hòa thấp (khoảng 5mW) hạn chế khả năng của SOA khi được sử dụng làm bộ khuếch đại công suất.
- Hệ số nhiễu cao (5-7 dB) ảnh hưởng đến chất lượng của SOA khi được sử dụng làm bộ tiền khuếch đại và khuếch đại đường dây.
- Phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu quang tới.
- Nhiễu xuyên kênh lớn do các hiệu ứng phi tuyến: hiệu ứng trộn 4 bước sóng FWM (four wave mixing) và hiệu ứng bão hòa độ lợi chéo (cross-gain saturation).
- Phổ độ lợi có dạng gợn sóng do sự không hoàn hảo của lớp chống phản xạ.
- Kém ổn định do độ lợi chịu ảnh hưởng của nhiệt độ

➢ *Ứng dụng*

Với các đặc tính kỹ thuật trên, SOA có nhiều khuyết điểm so với EDFA khi được dùng làm khuếch đại quang. Do đó, cho dù SOA được nghiên cứu và chế tạo từ trước EDFA, nhưng SOA không được sử dụng làm bộ khuếch đại quang trong hệ thống WDM cũng như các hệ thống truyền dẫn quang khác hiện nay. Thay vào đó, dựa trên các hiệu ứng phi tuyến đáp ứng nhanh của SOA, SOA được dùng trong các ứng dụng khác của hệ thống thông tin quang như: bộ biến đổi bước sóng (wavelength convertor), phục hồi xung clock (clock recovery) và các ứng dụng xử lý tín hiệu quang (*optical signal processing applications*).

7.4. Bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA)

Thông tin quang sợi đã phát triển mạnh trong các hệ thống viễn thông trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Việc tăng khả năng truyền dẫn và mở rộng khoảng cách truyền dẫn chỉ có thể giải quyết hiệu quả bằng các hệ thống truyền dẫn mới sử dụng các công nghệ như SDH hoặc ATM kết hợp với các linh kiện truyền thu kiểu mới như các bộ khuếch đại quang học. Khuếch đại tín hiệu quang bằng cách sử dụng các sợi quang pha đất hiếm đã mở ra những khả năng giảm giá thành tuyến truyền dẫn trong các mạng vùng hoặc các mạng đường trục bằng việc tăng khoảng cách các trạm lặp hoặc đa kênh truyền trên các mạng địa phương có sẵn. Các bộ khuếch đại quang sợi bằng sợi dẫn quang pha tạp erbium (EDFA) ở bước sóng 1550nm đã được sử dụng rộng rãi trong các tuyến thông tin cáp quang đường dài hoặc các mạng vòng lớn.

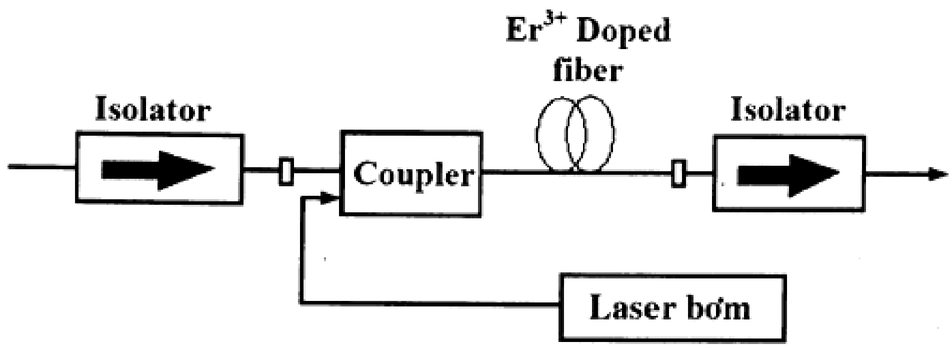
Nguyên tắc hoạt động của các khuyếch đại quang sợi pha tạp Erbium là phát xạ cưỡng bức. Các ion E_r3^+ hấp thụ các photon từ chùm sáng bơm với bước sóng nhỏ hơn 1,5 mm, rồi lại tái phát xạ một phần năng lượng dưới dạng các photon với bước sóng của signal. Các ion E_r3^+ đã được chọn bởi vì nó phát xạ huỳnh quang tại bước sóng ~ 1.5 mm, bước sóng này sinh ra bởi dịch chuyển phát xạ giữa trạng thái điện tử bị kích thích và mức cơ bản 4I15/2.

Các công trình nghiên cứu về laser và các khuyếch đại quang pha tạp với các ion đất hiếm và với Erbium, khi so sánh với các phương pháp chế tạo khác, cho thấy rằng bằng phương pháp sol-gel, đã chế tạo các khuyếch đại quang, trên đế thuỷ tinh, với nồng độ erbi 0.25 at.% và với chiều dài khuyếch đại là 5,7 cm, thời gian sống là 6 ms với Gain (dB/mW) cỡ 2,7 tại bước sóng bơm 980 nm.

Trong công nghệ viễn thông quang học toàn bộ (all-optical telecomunications) thì các laser pha tạp đất hiếm và khuyếch đại quang là một vài trong số các linh kiện cơ bản, và bởi sự cần giảm giá thành và kích thước linh kiện nên nó cần phải được tích hợp lại. Sự nhỏ gọn và công suất của laser và khuyếch đại quang chủ yếu liên quan tới mức độ ion đất hiếm pha tạp càng nhiều càng tốt và phải giảm thấp nhất mất mát trong quá trình truyền sóng.

Trong bài này sẽ trình bày vài nét sơ lược về các bộ khuếch đại quang sợi pha tap Erbium và các ứng dụng của nó trong thông tin quang. Sử dụng các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA) để kéo dài cự ly và tăng tốc độ bit truyền dẫn đang được xem như là một trong những giải pháp tốt nhất để xây dựng các hệ thống thông tin quang sợi. Trong những ứng dụng đó, EDFA được dùng làm tiền khuếch đại quang để cải thiện độ nhạy thu có sức hấp dẫn đặc biệt . Sự có mặt của bộ khuếch đại quang trong hệ thống thông tin quang nói chung và trong bộ thu khuếch đại quang (OAR) nói riêng đã làm tăng công suất tín hiệu quang là do EDFA đã khuếch đại tín hiệu trước khi tiến hành tách sóng tại bộ thu quang.

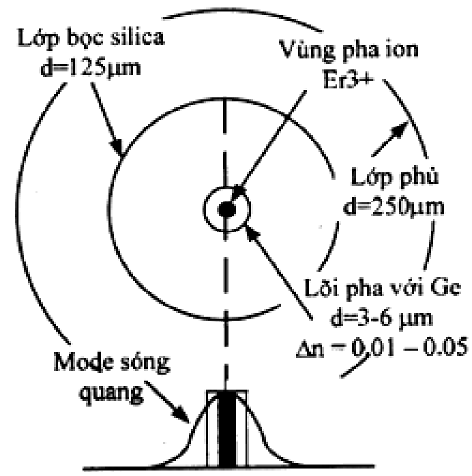
7.4.1. Các cấu trúc EDFA



Hình 7.15. Cấu trúc tổng quát của một bộ khuếch đại EDFA

Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang sợi pha trộn Erbium EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) bao gồm

Sợi quang pha ion đất hiếm Erbium EDF (Erbium-Doped Fiber) là nơi xảy ra quá trình khuếch đại (vùng tích cực) của EDFA. Cấu tạo của sợi quang pha ion Er^{3+}được minh họa như sau.



Hình 7.16. Mặt cắt ngang của một loại sợi quang pha ion Erbium

Trong đó:

+ Vùng lõi trung tâm (có đường kính từ 3 -6 µm) của EDF được pha trộn ion Er^{3+}là nơi có cường độ sóng bơm và tín hiệu cao nhất. Việc pha các ion Er^{3+} trong vùng này cung cấp sự chồng lấp của năng lượng bơm và tín hiệu với các ion erbium lớn nhất dẫn đến sự khuếch đại tốt hơn.
+ Lớp bọc (cladding) có chiết suất thấp hơn bao quanh vùng lõi.
+ Lớp phủ (coating) bảo vệ bao quanh sợi quang tạo bán kính sợi quang tổng cộng là 250 µm. Lớp phủ này có chiết suất lớn hơn so với lớp bọc dùng để loại bỏ bất kỳ ánh sáng không mong muốn nào lan truyền trong sợi quang.

Nếu không kể đến chất pha erbium, cấu trúc EDF giống như sợi đơn mode chuẩn trong viễn thông. Ngoài ra, EDF còn được chế tạo bằng các loại vật liệu khác như sợi thủy tinh flouride (flouride-based glass fiber) hoặc sợi quang thủy tinh đa vật liệu (multicomponent glass fiber).

- Laser bơm (pumping laser): Cung cấp năng lượng ánh sáng để tạo ra trạng thái nghịch đạo nồng độ trong vùng tích cực. Laser bơm phát ra ánh sáng có bước sóng 980nm hoặc 1480nm.
- WDM Coupler: Ghép tín hiệu quang cần khuếch đại và ánh sáng từ laser bơm vào trong sợi quang. Loại coupler được sử dụng là WDM coupler cho phép ghép các tín hiệu có bước sóng 980/1550nm hoặc 1480/1550nm.
- Bộ cách ly quang (Optical isolator): Ngăn không cho tín hiệu quang được khuếch đại phản xạ ngược về phía đầu phát hoặc các tín hiệu quang trên đường truyền phản xạ ngược về EDFA.

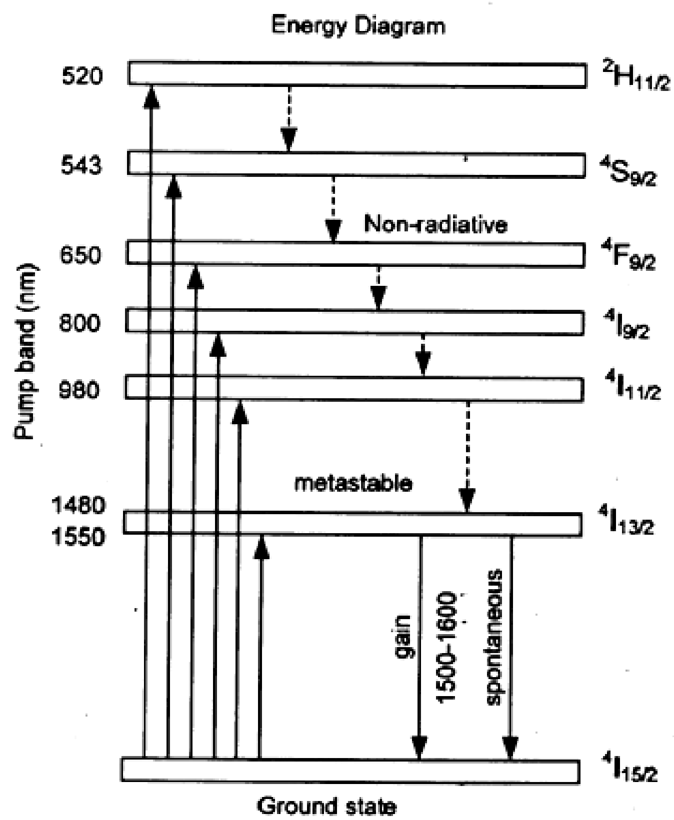
7.4.2. Lý thuyết khuếch đại trong EDFA

a. Giản đồ phân bố năng lượng của Er^{3+}

Giản đồ phân bố năng lượng của Er^{3+}trong sợi silica được minh họa trong hình vẽ. Theo đó, các ion Er^{3+} có thể tồn tại ở nhiều vùng năng lượng khác nhau được ký hiệu: $^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{9/2}$, $^2H_{11/2}$.

Trong đó:

- Vùng $^4I_{15/2}$ có mức năng lượng thấp nhất, được gọi là vùng nền (ground-state band).
- Vùng $^4I_{13/2}$ được gọi là vùng giả bền (mestable band) vì các ion Er^{3+}có thời gian sống (lifetime) tại vùng này lâu (khoảng 10ms) trước khi chuyển xuống vùng nền. Thời gian sống này thay đổi tùy theo loại tạp chất được pha trong lõi của EDF.
- Vùng $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{9/2}$, $^2H_{11/2}$ là các vùng năng lượng cao, được gọi là vùng kích thích hay vùng bơm (pumping band). Thời gian các ion Er^{3+} có trạng thái năng lượng trong các vùng này rất ngắn (khoảng 1 µs).



Hình 7.17. Giản đồ phân bố năng lượng của ion Er^{3+} trong sợi silica.

Sự chuyển đổi năng lượng của các ion Er^{3+} có thể xảy ra trong các trường hợp sau:

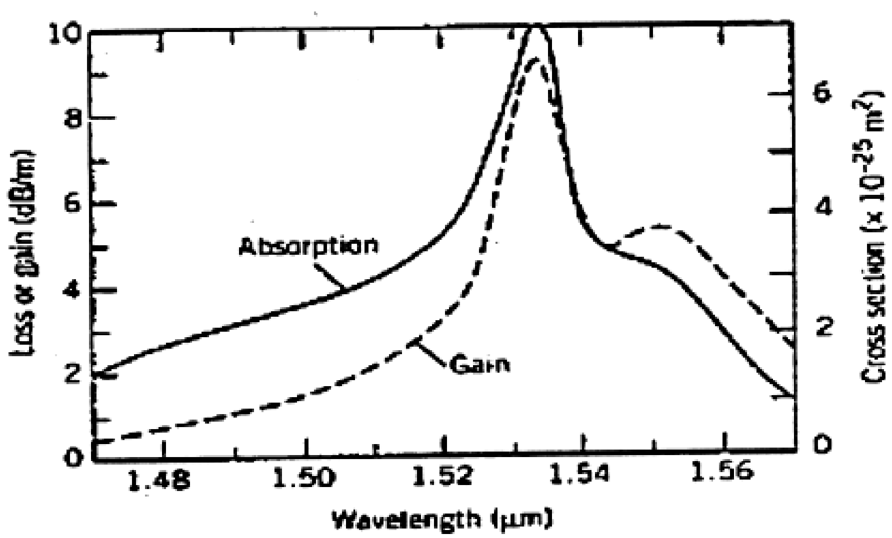
- Khi các ion Er^{3+} ở vùng nền nhận một mức năng lượng bằng độ chênh lệch năng lượng giữa vùng nền và vùng năng lượng cao hơn, chúng sẽ chuyển lên vùng có mức năng lượng cao hơn (sự hấp thụ năng lượng).
- Khi các ion Er^{3+}chuyển từ các vùng năng lượng cao xuống vùng năng lượng thấp hơn sẽ xảy ra hai trường hợp sau:

- Phân rã không bức xạ (nonradiative decay): năng lượng được giải phóng dưới dạng photon tạo ra sự dao động phân tử trong sợi quang.
- Phát xạ ánh sáng (radiation): năng lượng được giải phóng dưới dạng photon.

  Độ chênh lệch năng lượng giữa vùng giả bền (${}^4I_{13/2}$) và vùng nền (${}^4I_{15/2}$)

- 0.775eV (tương ứng với năng lượng của photon có bước sóng 1600nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đỉnh của vùng nền.
- 0.814eV (1527 nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đáy của vùng nền.
- 0.841 eV (1477nm) tính từ đỉnh vùng giả bền đến đáy của vùng nền.

Mật độ phân bố năng lượng của các ion Er^{3+} trong vùng giả bền không đều nhau: các ion Er^{3+} có khuynh hướng tập trung nhiều ở các mức năng lượng thấp. Điều này dẫn đến khả năng hấp thụ và phát xạ photon của ion Erbium thay đổi theo bước sóng. Phổ hấp thụ (absortion spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge được biểu diễn trên hình dưới:



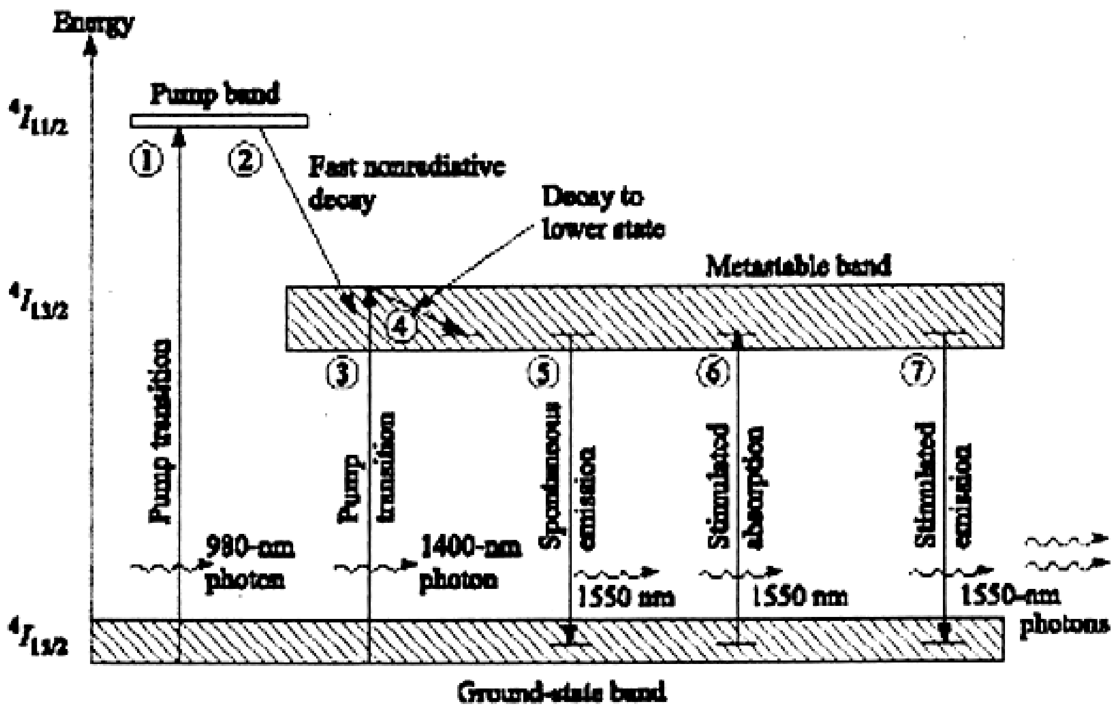
Hình 7.18. Phổ hấp thụ (absorption spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge

b. Nguyên lý hoạt động của EDFA

Nguyên lý khuếch đại của EDFA được dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích.

Quá trình khuếch đại tín hiệu quang trong EDFA có thể được thực hiện theo các bước như sau:

- Khi sử dụng nguồn bơm laser 980nm, các ion Er^{3+} ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng Ephoton = 1.27eV) và chuyển lên trạng thái năng lượng cao hơn ở vùng bơm (pumping band) (1).
- Tại vùng bơm, các ion Er^{3+} phân rã không bức xạ rất nhanh (khoảng 1μs) và chuyển xuống vùng giả bền (2).
- Khi sử dụng nguồn bơm laser 1480nm, các ion Er^{3+}ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng E_{photon} = 0.841eV) và chuyển sang trạng thái năng lượng cao hơn ở đỉnh của vùng giả bền (3).



Hình 7.19. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra EDFA với hai bước sóng bơm 980 nm và 1480nm

Các ion Er^{3+} trong vùng giả bền luôn có khuynh hướng chuyển xuống vùng năng lượng thấp (vùng có mật độ điện tử cao) (4).

Sau khoảng thời gian sống (khoảng 10ms), nếu không được kích thích bởi các photon có năng lượng thích hợp (phát xạ kích thích) các ion Er^{3+}sẽ chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn ở vùng nền và phát xạ ra photon (phát xạ tự phát) (5).

Khi cho tín hiệu ánh sáng đi vào EDFA, sẽ xảy ra đồng thời hai hiện tượng sau:

- Các photon tín hiệu bị hấp thụ bởi các ion Er^{3+} ở vùng nền (6). Tín hiệu ánh sáng bị suy hao.
- Các photon tín hiệu kích thích các ion Er^{3+} ở vùng giả bền (7). Hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra. Khi đó, các ion Er^{3+} bị kích thích sẽ chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao ở vùng giả bền xuống mức năng lượng thấp ở vùng nền và phát xạ ra photon mới có cùng hướng truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng bước sóng. Tín hiệu ánh sáng được khuếch đại.

Độ rộng giữa vùng giả bền và vùng nền cho phép sự phát xạ kích thích (khuếch đại) xảy ra trong khoảng bước sóng 1530 nm – 1565nm. Đây cũng là vùng bước sóng hoạt động của EDFA. Độ lợi khuếch đại giảm nhanh chóng tại các bước sóng lớn hơn 1565 nm và bằng 0 dB tại bước sóng 1616nm.

7.4.3. Yêu cầu đối với nguồn bơm

a. Bước sóng bơm

Với các vùng năng lượng được nêu trong phần trên, ánh sáng bơm có thể được sử dụng tại các bước sóng khác nhau 650 nm ($^4F_{9/2}$), 800 nm ($^4I_{9/2}$), 980 nm ($^4I_{11/2}$), 1480 nm ($^4I_{13/2}$). Tuy nhiên, khi bước sóng bơm càng ngắn thì các ion Er^{3+} phải trải qua nhiều giai đoạn chuyển đổi năng lượng trước khi trở về vùng nền và phát xạ ra photon ánh sáng. Do đó, hiệu suất bơm không cao, năng lượng bơm sẽ bị hao phí qua việc tạo ra các phonon thay vì photon. Vì vậy, trên thực tế, ánh sáng bơm sử dụng cho EDFA chỉ được sử dụng tại hai bước sóng 980nm và 1480nm.

Trong EDFA, điều kiện để có khuếch đại tín hiệu là đạt được sự nghịch đảo nồng độ bằng cách sử dụng nguồn bơm để bơm các ion erbium lên trạng thái kích thích. Có hai cách thực hiện quá trình này: bơm trực tiếp tại bước sóng 1480 nm hoặc bơm gián tiếp ở bước sóng 980 nm.

- Phương pháp bơm gián tiếp (bơm ở 980 nm): Trong trường hợp này, ion erbium liên tục được chuyển tiếp từ vùng năng lượng $^4I_{15/2}$ thấp lên vùng năng lượng cao $^4I_{11/2}$, sau đó các ion sẽ phân rã xuống vùng $^4I_{13/2}$ nhưng không phát xạ. Từ vùng này, khi có ánh sáng kích thích thì các ion sẽ phát xạ bước sóng mong muốn (từ 1550 đến 1600 nm) khi chuyển từ vùng năng lượng $^4I_{13/2}$ xuống vùng $^4I_{15/2}$. Đây chính là hệ thống ba mức. Thời gian sống của ion erbium ở mức $^4I_{11/2}$ khoảng 1μs trong khi ở $^4I_{13/2}$ thì tới 10ms. Với thời gian sống dài, vùng $^4I_{15/2}$ được gọi là vùng ổn định. Vì vậy, các ion được bơm lên mức cao, sau đó nhanh chóng rơi xuống vùng $^4I_{13/2}$ và tồn tại ở đó trong một khoảng thời gian tương đối dài tạo nên sự nghịch đảo về nồng độ.

- Với phương pháp bơm trực tiếp (1480 nm): các ion erbium chỉ hoạt động trong hai vùng năng lượng và $^4I_{15/2}$. Đây là hệ thống 2 mức. Các ion erbium liên tục được chuyển từ vùng năng lượng nền $^4I_{15/2}$ lên vùng năng lượng kích thích $^4I_{13/2}$ nhờ năng lượng bơm. Vì thời gian tồn tại ở mức này dài nên chúng tích lũy tại đây tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Nguồn bơm có hiệu quả cao ở cả hai bước sóng 980 và 1480 nm. Để có hệ số khuếch đại hơn 20 dB thì chỉ cần tạo ra nguồn bơm có công suất nhỏ hơn 5 mW, nhưng vẫn cần phải có nguồn bơm từ 10 đến 100 mW để đảm bảo cho công suất ra đủ lớn.

Chỉ số nhiễu lượng tử giới hạn là 3 dB đạt được ở bước sóng 980 nm. Đối với bước sóng 1480 nm, chỉ số nhiễu vào khoảng 4 dB vì tiết diện ngang phát xạ tại 1480 nm cao hơn tại 980 nm và sự bức xạ kích thích do nguồn bơm đã giới hạn sự nghịch đảo tích luỹ tại 1480nm. Do đó, bước sóng bơm 980 nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại tạp âm thấp. Hệ số độ lợi tại bước sóng bơm 980 nm cao hơn tại 1480 nm tại cùng công suất bơm. Do đó, để đạt được cùng một hệ số độ lợi thì công suất bơm tại 1480 nm phải cao hơn tại 980 nm. Vì công suất bơm ở 1480 nm lớn hơn nên công suất ngõ ra lớn hơn, do đó bơm ở bước sóng 1480nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại công suất. Ngoài ra, bước sóng bơm 1480 nm được truyền trong sợi quang với suy hao thấp. Do đó, nguồn bơm laser có thể đặt xa bộ khuếch đại.

Hiện nay, bơm bước sóng 1480 nm được sử dụng rộng rãi hơn vì chúng sẵn có hơn và độ tin cậy cao hơn. Độ tin cậy là đặc điểm quan trọng đối với laser bơm vì nó dùng để bơm cho khoảng cách dài và để tránh làm nhiễu tín hiệu. Các thiết bị khuếch đại công suất đòi hỏi công suất bơm cao nhất và độ ổn định của chúng là mấu chốt trong quá trình nghiên cứu phát triển chúng. Nếu tăng được độ ổn định của laser có bước sóng 980 nm thì có thể chúng sẽ được chọn làm nguồn bơm. Một số EDFA được bơm tại cả hai bước sóng để tận dụng ưu điểm của cả hai bước sóng.

Bảng 1 So sánh hai bước sóng bơm 980nm và 1480nm

Bước sóng bơm	**980 nm**	**1480 nm**
Tính chất:		
Độ lợi	Cao hơn	Thấp hơn
Độ lợi công suất bơm	Thấp hơn	Cao hơn
Suy hao công suất bơm	Cao hơn	Thấp hơn
Hệ số nhiễu	Thấp hơn	Cao hơn
Ứng dụng	Tiền khuếch đại	Khuếch đại công suất

b. Công suất bơm

Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn. Ngoài ra, khi công suất bơm tăng lên, hệ số nhiễu sẽ giảm. Điều này sẽ được trình bày trong phần tính hệ số nhiễu của EDFA.

c. Hướng bơm

Bộ khuếch đại EDFA có thể được bơm theo ba cách:

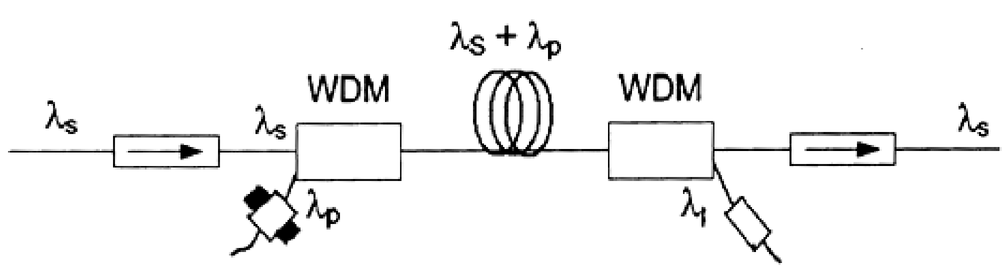
- Bơm thuận (codirectional pumping): nguồn bơm được bơm cùng chiều với hướng truyền tín hiệu.
- Bơm ngược (counterdirectional pumping): nguồn bơm được bơm ngược chiều với hướng truyền tín hiệu.
- Bơm hai chiều (dual pumping): sử dụng hai nguồn bơm và được theo hai chiều ngược nhau.

Hướng bơm thuận có ưu điểm nhiễu thấp vì nhiễu khá nhạy cảm với độ lợi mà độ lợi tín hiệu cao nhất khi công suất tín hiệu vào thấp nhất. Trong khi đó, hướng bơm ngược cung cấp công suất ra bão hoà cao nhưng có hệ số nhiễu cao hơn bơm thuận.

Do vậy, người ta đề nghị sử dụng cả hai laser bơm có bước sóng bơm khác nhau. Việc bơm tại bước sóng 1480 nm thường được sử dụng theo chiều ngược với hướng truyền tín hiệu và bơm tại 980 nm theo hướng thuận để sử dụng tốt nhất ưu điểm của mỗi loại bơm. Bơm tại 1480 nm có hiệu suất lượng tử cao hơn nhưng có hệ số nhiễu cao hơn, trong khi bơm tại bước sóng 980 nm có thể cung cấp một hệ số nhiễu gần mức giới hạn lượng tử. Hệ số nhiễu thấp phù hợp cho các ứng dụng tiền khuếch đại.

Một EDFA được bơm bằng một nguồn bơm có thể cung cấp công suất đầu ra cực đại khoảng +16 dBm trong vùng bão hoà hoặc hệ số nhiễu từ 5-6 dB trong vùng tín hiệu nhỏ. Cả hai bước sóng bơm được sử dụng đồng thời có thể cung cấp công suất đầu ra cao hơn; một EDFA được bơm kép có thể cung cấp công suất ra tới +26 dBm trong vùng công suất bơm cao nhất có thể đạt được. Hình 6 thể hiện một EDFA được bơm kép.

Giá trị các đặc tính của bộ khuếch đại EDFA được trình bày trong bảng 2.



Hình 7.20. Cấu hình bộ khuếch đại EDFA được bơm kép.

7.4.4. Phổ khuếch đại

Phổ độ lợi của EDFA được trình bày trong hình *Hình 7.18.* là tính chất quan trọng nhất của EDFA khi xác định các kênh tín hiệu được khuếch đại trong hệ thống WDM. Hình dạng của phổ khuếch đại phụ thuộc vào bản chất của sợi quang, loại tạp chất (Ge, Al) và nồng độ tạp chất được pha trong lõi của sợi quang.

Hình 7.18. cho thấy phổ độ lợi của EDFA có lõi pha Ge khá rộng. Tuy nhiên, phổ độ lợi này không bằng phẳng. Điều này sẽ dẫn đến việc hệ số khuếch đại khác nhau đối với các bước sóng khác nhau. Nếu độ lợi của các kênh tín hiệu không đồng nhất, nhất là sau khi qua nhiều tầng EDFA, sai số độ lợi này sẽ tích luỹ tuyến tính đến mức khi tới đầu thu kênh bước sóng có độ lợi cao làm cho đầu vào máy thu quá tải. Ngược lại, kênh tín hiệu có độ lợi nhỏ thì tỉ số SNR không đạt yêu cầu. Sự làm phẳng độ lợi là cần thiết để loại bỏ sự khuếch đại méo các tín hiệu qua các EDFA đường truyền ghép tầng.

Một số biện pháp được sử dụng để khắc phục sự không bằng phẳng của phổ độ lợi:

- Chọn lựa các bước sóng có độ lợi gần bằng nhau. WDM làm việc ở dải sóng băng C (1530 – 1565 nm). Trong dải bước sóng này chọn 40 bước sóng làm bước sóng công tác của WDM. Các bước sóng này có độ lợi gần bằng nhau.
- Công nghệ cân bằng độ lợi: dùng bộ cân bằng (equalizer) hấp thụ bớt công suất ở bước sóng có độ lợi lớn và bộ khuếch đại để tăng công suất của bước sóng có độ lợi nhỏ.
- Thay đổi thành phần trộn trong sợi quang: dùng sợi quang trộn thêm nhôm, photpho nhôm hay flo cùng với erbium sẽ tạo nên bộ khuếch đại có băng tần được mở rộng và phổ khuếch đại bằng phẳng hơn.

Ngoài ra, phổ độ lợi của EDFA còn phụ thuộc vào chiều dài của sợi EDF. Lý do là vì trạng thái nghịch đảo nồng độ thay đổi dọc theo chiều dài của sợi quang khi công suất bơm thay đổi.

Bộ khuếch đại EDFA hoạt động ở ***băng C (1530-1565 nm).*** Tuy nhiên, độ lợi của sợi pha tạp có đuôi trải rộng đến khoảng 1605 nm. Điều này kích thích sự phát triển của các hệ thống hoạt động ở ***băng L từ 1565 đến 1625 nm***. Nguyên lý hoạt động của EDFA băng L giống như EDFA băng C. Tuy nhiên, có sự khác nhau trong việc thiết kế EDFA cho băng C và băng L. Các phần tử bên trong bộ khuếch đại quang như bộ cách ly (isolator) và bộ ghép (coupler) phụ thuộc vào bước sóng nên chúng sẽ khác nhau trong băng C và băng L. Sự so sánh các tính chất của EDFA trong băng C và băng L được thể hiện trong bảng 2.

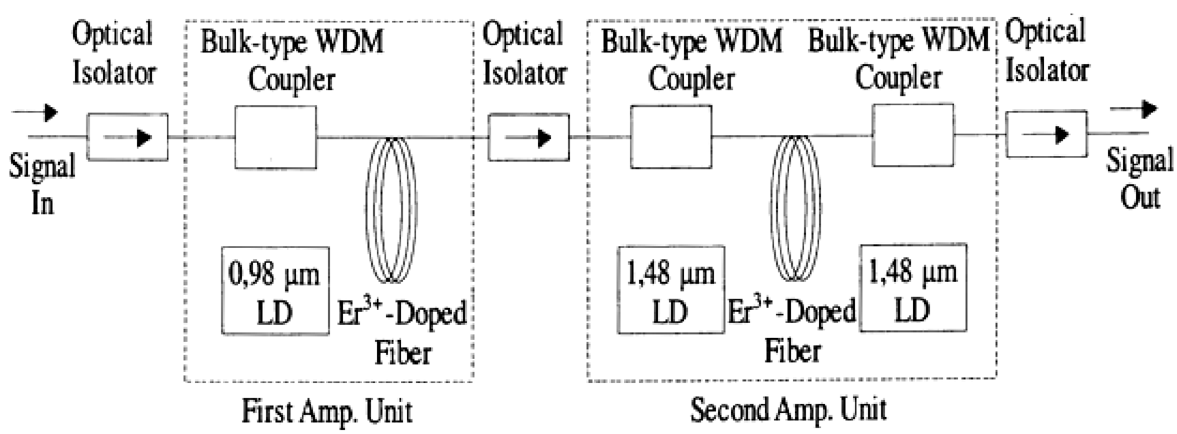
Bảng 2 Bảng so sánh EDFA hoạt động trong băng C và băng L

Tính chất	Băng C	Băng L
Độ lợi	Cao hơn	Nhỏ hơn khoảng 3 lần
Phổ độ lợi	Ít bằng phẳng hơn	Bằng phẳng hơn
Nhiễu ASE	Thấp hơn	Cao hơn

Hình dưới trình bày cấu trúc của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm – 1610nm với thiết kế hai tầng.

Tầng đầu tiên được bơm ở bước sóng 980nm và hoạt động như một bộ EDFA truyền thống (sợi quang dài 20-30nm) có khả năng cung cấp độ lợi trong khoảng bước sóng 1530-1570 nm.

Ngược lại, tầng thứ hai có sợi quang dài 200m và được bơm hai chiều sử dụng laser 1480nm. Một bộ isolator được đặt giữa hai tầng này cho phép nhiễu ASE truyền từ tầng thứ 1 sang tầng thứ 2 nhưng ngăn ASE truyền ngược về tầng thứ nhất. Với cấu trúc nối tiếp như vậy, khuếch đại hai tầng có thể cung cấp độ lợi phẳng trên một vùng băng thông rộng trong khi vẫn duy trì mức nhiễu thấp.



Hình 7.21. Cấu hình của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm – 1610nm với thiết kế hai tầng

7.4.5. Các tính chất của EDFA

a. Độ lợi (Gain)

Độ lợi của một bộ EDFA có thể được tính theo phương trình sau:

$$G = exp[\int_0^L (N_2(z)\sigma_s^{(e)} - N_1(z)\sigma_s^{(a)})\Gamma_s dz] \qquad (2.11)$$

Trong đó:

- $N_2(z)$, $N_1(z)$: mật độ ion erbium ở trạng thái kích thích và ở trạng thái nền tại vị trí z trong đoạn sợi quang pha erbium.
- L: chiều dài sợi pha erbium.
- $\sigma_s^{(e)}$, $\sigma_s^{(a)}$: tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ của ion erbium tại bước sóng tín hiệu.
- Phương trình (2.11) cho thấy độ lợi liên quan đến sự nghịch đảo nồng độ trung bình. Gọi $\overline{N_1}$, $\overline{N_2}$ lần lượt là nồng độ ion Erbium ở mức năng lượng nền và mức năng lượng kích thích trung bình. Khi đó, $\overline{N_1}$, $\overline{N_2}$ sẽ được tính theo công thức sau:

$$\overline{N_1} = \frac{1}{L}\int_0^L N_1(z)ds \qquad (2.12)$$

$$\overline{N_2} = \frac{1}{L}\int_0^L N_2(z)ds \qquad (2.13)$$

Phương trình (2.11) có thể được viết lại một cách đơn giản hơn như sau:

$$G = exp[\overline{N_2}\sigma_s^{(e)} - \overline{N_1}\sigma_s^{(a)})\Gamma_s L] \qquad (2.14)$$

Từ phương trình trên, ta thấy độ lợi tín hiệu sau khi đi qua sợi quang chỉ phụ thuộc vào sự nghịch đảo nồng độ các ion erbium trung bình trong sợi quang mà không phụ thuộc vào chi tiết về dạng nghịch đảo như một hàm đối với vị trí dọc theo chiều dài sợi quang. Trong phương trình (2.12), (2.13) có hai tham số $N_1(z)$ và $N_2(z)$ là hàm theo vị trí z dọc theo sợi quang được cho bởi

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^{(a)}\Gamma_s}{hf_sA}P_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^{(a)}\Gamma_p}{hf_sA}P_p(z)}{\frac{\tau(\sigma_s^{(a)}+\sigma_s^{(e)})\Gamma_s}{hf_sA}P_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^{(a)}+\sigma_p^{(e)})\Gamma_p}{hf_sA}P_p(z)} N \qquad (2.15)$$

$$N_1(z) = N - N_2(z) \qquad (2.16)$$

Trong đó:

- τ: thời gian sống của ion erbium ở trạng thái kích thích $^4I_{13/2}$.
- Ps(z): công suất của tín hiệu tại vị trí z trong sợi quang.
- Pp(z): công suất bơm tại vị trí z trong sợi quang.
- Γ_s : hệ số chồng lắp tại bước sóng tín hiệu.
- Γ_p : hệ số chồng lắp tại bước sóng bơm.
- f_p : tần số tín hiệu.
- f_p : tần số bơm.
- N : mật độ ion erbium tổng cộng.
- $\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)})$: tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng tín hiệu.
- $\sigma_p^{(a)}, \sigma_p^{(e)}$: tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng bơm.
- h : hằng số Planck; h = $6{,}625.10^{-34}$J.s.

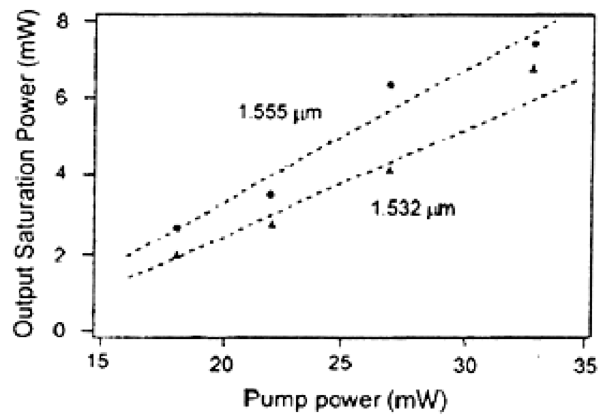
Từ công thức (2.15) ta thấy hệ số khuếch đại của EDFA phụ thuộc vào các yếu tố sau:

- Phụ thuộc vào nồng độ ion Er^{+3}: Khi nồng độ Er^{+3} trong sợi quang của bộ EDFA tăng thì khả năng chúng được chuyển lên mức năng lượng cao hơn càng nhiều, do đó hệ số khuếch đại tăng. Nhưng nếu nồng độ Er^{+3} tăng quá cao sẽ gây tích tụ dẫn đến hiện tượng tiêu hao quang làm cho hệ số khuếch đại giảm.
- Phụ thuộc vào công suất tín hiệu đến và công suất bơm quang: Khi công suất vào tăng, bức xạ bị kích tăng nhanh, nghĩa là ion Er^{+3} ở mức năng lượng cao trở về mức năng lượng cơ bản càng nhiều làm giảm nồng độ số ion Er^{+3} ở mức năng lượng cao, làm yếu đi khả năng bức xạ của ion Er^{+3} khi tín hiệu quang được đưa tới, do đó hệ số khuếch đại giảm. Sẽ có một mức giới hạn mà công suất tín hiệu vào tăng nhưng công suất ra không tăng nữa gọi là công suất bão hoà.
- Phụ thuộc vào chiều dài sợi: Khi chiều dài sợi ngắn thì tín hiệu không được khuếch đại nhiều do đó độ lợi tín hiệu nhỏ. Ngược lại, khi chiều dài tăng lên, tín hiệu được khuếch đại nhiều hơn, do đó độ lợi lớn hơn. Tuy nhiên, khi chiều dài quá dài so với công suất bơm thì độ lợi tín hiệu sẽ bị giảm do chiều dài quá lớn mà công suất bơm lại không đáp ứng hết chiều dài sợi thì tín hiệu sẽ bị suy hao dần và do đó làm giảm độ lợi.
- Phụ thuộc vào công suất bơm: Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn.

Do vậy, tùy theo ứng dụng của EDFA, các yếu tố trên sẽ được hiệu chỉnh sau cho độ lợi của EDFA đạt giá trị yêu cầu với hiệu suất cao nhất. Thông thường, độ lợi của EDFA vào khoảng 20-40 dB tuỳ theo ứng dụng của EDFA là bộ khuếch đại công suất, khuếch đại đường truyền hay tiền khuếch đại.

b. Công suất ra bão hoà (Output saturation power)

Sự bão hoà xảy ra khi công suất tín hiệu vào EDFA lớn gây ra sự giảm hệ số khuếch đại. Vì vậy, nó giới hạn công suất ra của bộ khuếch đại. Sự bão hoà hệ số khuếch đại này xuất hiện khi công suất tín hiệu tăng cao và gây ra sự phát xạ kích thích ở một tỷ lệ cao và do đó làm giảm sự nghịch đảo nồng độ. Điều đó có nghĩa là số các ion erbium ở trạng thái kích thích giảm một cách đáng kể. Hệ quả là, công suất tín hiệu ở ngõ ra bị hạn chế bởi sự bão hoà công suất. Công suất ra bảo hòa $P_{out.sat}$ được định nghĩa là tín hiệu ra mà ở đó hệ số khuếch đại bị giảm đi 3 dB so với khi khuếch đại tín hiệu nhỏ.



Hình 7.22. Công suất ra bão hoà tăng tuyến tính theo công suất bơm vào tại bước sóng bơm 975 nm đối với bước sóng tín hiệu là 1555 nm và 1532 nm.

Công suất ra bão hoà không phải là một hằng số mà tăng lên tuyến tính với công suất bơm (xem hình 8). Công suất bão hoà có thể được xác định bằng công suất tín hiệu ngõ ra mà tại đó độ lợi bằng độ lợi tín hiệu nhỏ trừ 3 dB. Như vậy bằng cách xác định độ lợi tín hiệu nhỏ ta có thể suy ra điểm bão hoà và từ đó xác định công suất bão hoà.

Công suất ra bão hoà cũng thay đổi tùy theo bước sóng của tín hiệu vì mật độ các ion Er^{3+}phân bố tại vùng năng lượng giả bền không bằng nhau. Hình 2.16 cho thấy công suất ra bảo hòa tại 1.55 µm cao hơn tại 1.53 µm với cùng công suất bơm.

7.4.6. Ưu khuyết điểm của EDFA

a. Ưu điểm

- Nguồn laser bơm bán dẫn có độ tin cậy cao, gọn và công suất cao.
- Cấu hình đơn giản: hạ giá thành của hệ thống.
- Cấu trúc nhỏ gọn: có thể lắp đặt nhiều EDFA trong cùng một trạm, dễ vận chuyển và thay thế.

- Công suất nguồn nuôi nhỏ: thuận lợi khi áp dụng cho các tuyến thông tin quang vượt biển.
- Không có nhiễu xuyên kênh khi khuếch đại các tín hiệu WDM như bộ khuếch đại quang bán dẫn.
- Hầu như không phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu.

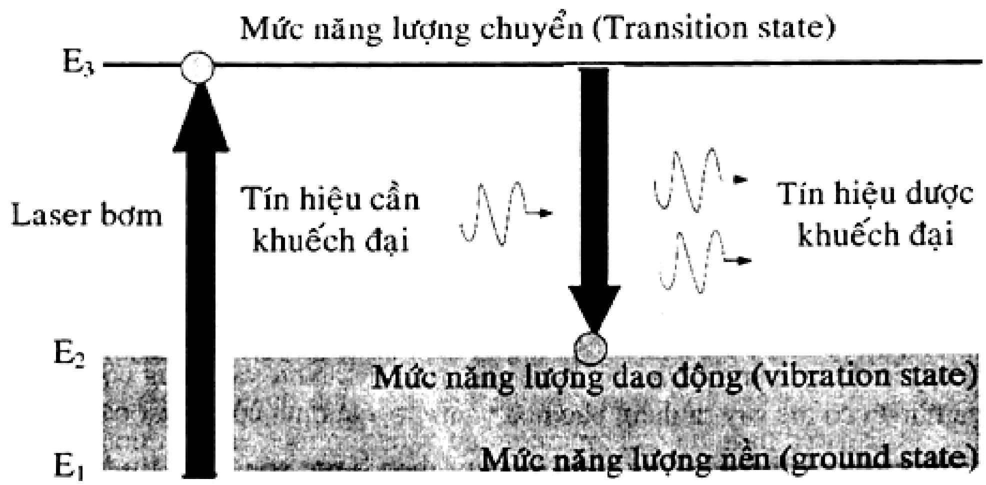
b. Khuyết điểm

- Phổ độ lợi của EDFA không bằng phẳng.
- Băng tần hiên nay bị giới hạn trong băng C và băng L.
- Nhiễu được tích lũy qua nhiều chặng khuếch đại gây hạn chế cự ly truyền dẫn.

2.4. Bộ khuếch đại quang RAMAN (RA)

2.4.1. Nguyên lý hoạt động

Khuếch đại Raman dựa trên hiện tượng tán xạ Raman kích thích (Stimulated Raman Scattering). Tán xạ Raman kích thích là hiện tượng một nguyên tử hấp thụ năng lượng của một photon, sau đó tạo ra một photon có năng lượng khác. Vì vậy, tán xạ Raman kích thích được định nghĩa là hiện tượng photon thứ cấp được sinh ra do kích thích từ nguồn bên ngoài.



Hình 7.23. Sơ đồ chuyển năng lượng trong khuếch đại Raman

Để có khuếch đại Raman thì phải tạo ra sự nghịch đảo nồng độ. Điều này đạt được bằng cách cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang từ một laser bơm có bước sóng thấp hơn bước sóng của tín hiệu. Khi đó, các nguyên tử của sợi quang sẽ hấp thụ năng lượng bơm có năng lượng cao (bước sóng ngắn) và chuyển lên mức năng lượng cao hơn. Khi có tín hiệu đến, nó sẽ kích thích các nguyên tử đang ở mức năng lượng cao chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn và giải phóng ra một năng lượng dưới dạng photon ánh sáng có cùng bước sóng (dài hơn bước sóng bơm) và cùng pha với tín hiệu đến. Do đó, tín hiệu đã được khuếch đại.

Dựa trên giản đồ năng lượng trên, tần số ánh sáng bơm $f_{bơm}$ và tần số ánh sáng được khuếch đại $f_{khuếch\ đại}$ được xác định như sau:

$$f_{bơm} = (E_3 - E_1)/h$$

$$f_{khuếch\ đại} = (E_2 - E_1)/h$$

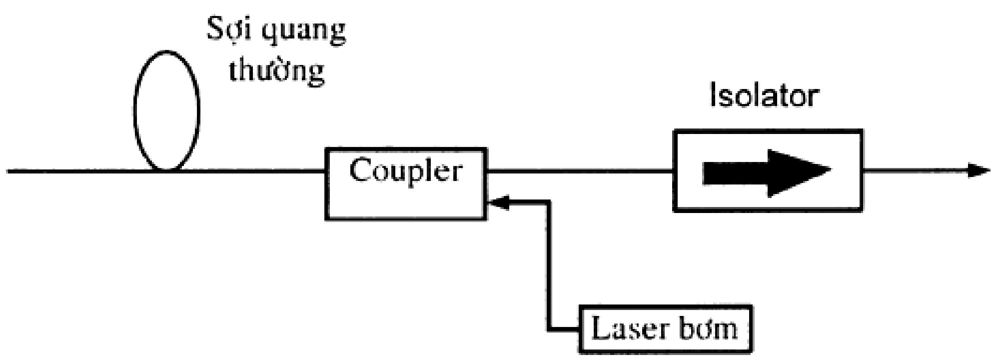
Trong đó:

- h là hằng số Plank;
- E_1, E_2, E_3 là năng lượng của các trạng thái năng lượng cao (transition state), trạng thái năng lượng trung gian (vibration state) và trạng thái năng lượng thấp (ground state) của các nguyên tử trong sợi quang.

Không giống như nguyên lý khuếch đại của EDFA, khuếch đại Raman không cần một sợi quang riêng và đặc biệt (pha trộn ion Er3+).

Trong khuếch đại Raman, tín hiệu quang được khuếch đại dọc theo toàn bộ chiều dài của sợi quang silic bình thường.

Cấu trúc của một bộ khuếch đại Raman được minh họa trong hình 2.19.



Hình 7.24. Cấu trúc của bộ khuếch đại Raman

Sợi quang là nơi xảy ra quá trình khuếch đại. Sợi quang này cũng là sợi quang truyền tín hiệu như sợi SMF, DSF, ...

Trong khuếch đại quang không cần sử dụng sợi quang đặc biệt (pha ion Erbium) như bộ khuếch đại EFDA.

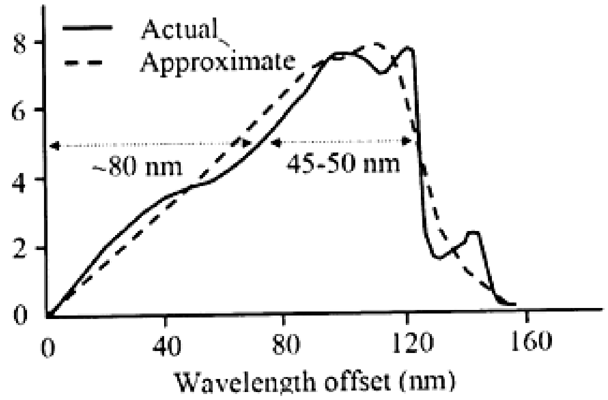
Bộ ghép (Coupler): dùng để ghép bước sóng tín hiệu vào với sóng bơm.

Laser bơm (Pump laser): dùng để cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang chuyển lên trạng thái kích thích, giúp tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Bộ cách ly (Isolator): đặt ở hai đầu của bộ khuếch đại quang để ngăn chặn tín hiệu phản xạ ở hai đầu bộ khuếch đại. Đồng thời nó cũng giúp loại trừ nhiễu ASE theo hướng ngược về phía đầu vào có thể gây ảnh hưởng đến tín hiệu đầu vào.

2.4.2. Độ rộng băng tần và hệ số khuếch đại

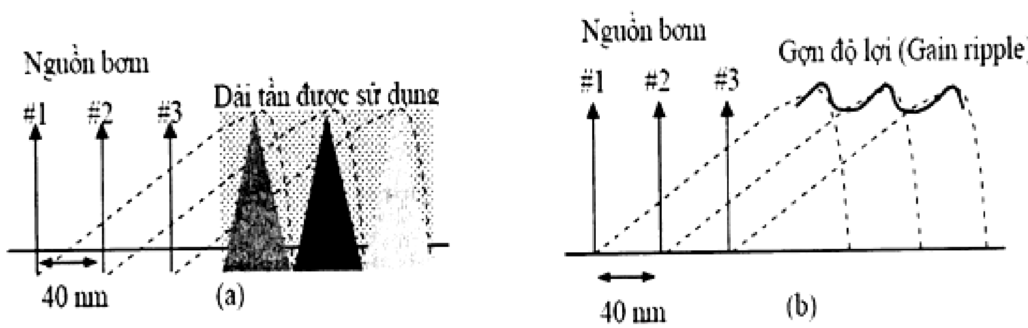
Hệ số khuếch đại Raman tăng hầu như tuyến tính với độ chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset), đạt giá trị đỉnh tại 100 nm và giảm nhanh chóng sau đó. Trong hình cũng cho thấy, băng thông độ lợi của khuếch đại Raman có thể đạt được từ 45-50nm.



Hình 7.25. Hệ số độ lợi Raman thay đổi theo độ chênh lệch bước sóng của tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset)

Nếu dải tần của các tín hiệu cần khuếch đại Raman lớn hơn băng thông độ lợi của khuếch đại Raman (giả sử 40nm), cần phải sử dụng nhiều nguồn bơm khác nhau. Mỗi nguồn bơm có bước sóng cách nhau khoảng 40nm (bằng với băng thông độ lợi). Khi đó, dải tần lớn của các tín hiệu có thể được khuếch đại một cách hiệu quả (xem *Hình 7.26.*-a). Tuy nhiên, do đặc tính khuếch đại của khuếch đại Raman và do khoảng của các bước sóng bơm, băng thông độ lợi tổng cộng có dạng gợn sóng như hình *Hình 7.26.*-b.

Với ưu điểm băng thông độ lợi lớn, khuếch đại Raman được quan tâm đến trong các ứng dụng thông tin quang. Tuy nhiên hiệu suất độ lợi của khuếch đại Raman không cao. Để đạt được hệ số khuếch đại lớn, cần phải sử dụng công suất bơm tương đối cao.



Hình 7.26.

(a) Với khoảng cách các nguồn bơm 40nm, các kênh nằm trong dải tần rộng được khuếch đại.

(b) Gợn độ lợi do khuếch đại Raman và do khoảng cách cách nguồn bơm.

2.4.3. Ưu khuyết điểm của khuếch đại Raman

So với các loại khuếch đại quang khác, khuếch đại Raman có những ưu điểm sau:

- Tạp âm nhiễu thấp.
- Cấu trúc đơn giản, không cần sợi đặc biệt.
- Dễ chọn băng tần.
- Có thể đạt được băng thông rộng nhờ kết hợp vài laser bơm.

Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm đó bộ khuếch đại Raman cũng có những nhược điểm như sau:

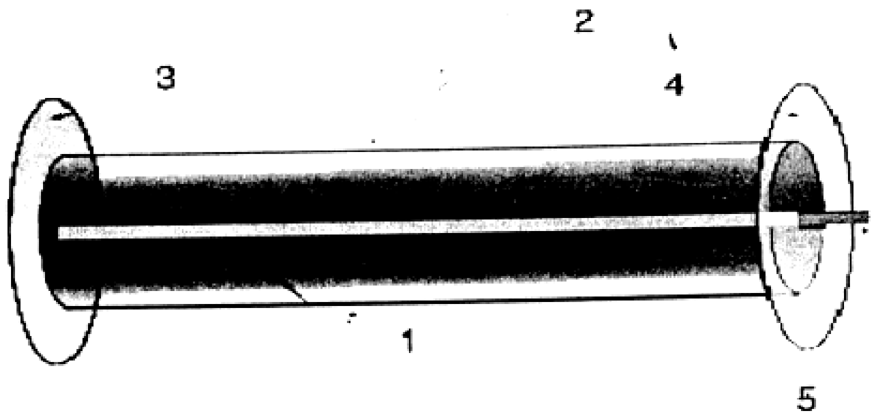
- Xuyên âm giữa các kênh tín hiệu do hiện tượng tán xạ Raman kích thích SRS. Đây là một trong các hiệu hứng phi tuyến của sợi quang có thể gây ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống ghép kênh theo bước sóng WDM.
- Hệ số khuếch đại thấp.
- Hiệu suất khuếch đại thấp hơn so với EDFA: khuếch đại Raman cần một công suất bơm lớn hơn để đạt cùng một giá trị độ lợi.

Chương 8
LASER

Giới thiệu chung

Laser là tên viết tắt của cụm từ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation có nghĩa là ("khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức"). Laser được phỏng theo maser (Microwave Amplication by Stimulated Emission of Radiation-Sự khuếch đại sóng viba do Sự phát xạ cưỡng bức), một thiết bị có cơ chế tương tự nhưng tạo ra tia vi sóng hơn là các bức xạ ánh sáng. Maser đầu tiên được tạo ra bởi Charles H. Townes và sinh viên tốt nghiệp J.P. Gordơn và H.J. Zeiger vào năm 1953. Maser đầu tiên đó không tạo ra tia sóng một cách liên tục. Nikolay Gennadiyevich Basov và Aleksandr Mikhailovich Prokhorov của Liên bang Xô Viết đã làm việc độc lập trên lĩnh vực lượng tử dao động và tạo ra hệ thống phóng tia liên tục bằng cách dùng nhiều hơn 2 mức năng lượng. Hệ thống đó có thể phóng ra tia liên tục mà không cho các hạt xuống mức năng lượng bình thường. Năm 1964, Charles Townes, Nikolai Basov và Aleksandr Prokhorov cùng nhận giải thưởng Nobel vật lý về nền tảng cho lĩnh vực điện tử lượng tử, dẫn đến việc tạo ra máy dao động và phóng đại dựa trên thuyết maser-laser.

8.1. Các phần tử của quang laser



Hình 8.1. Các phần tử của quang laser

(1) Buồng cộng hưởng (vùng bị kích thích)
(2) Nguồn nuôi (năng lượng bơm vào vùng bị kích thích)
(3) Gương phản xạ toàn phần
(4) Gương bán mạ
(5) Tia laser

Buồng cộng hưởng chứa hoạt chất laser, đó là một chất đặc biệt có khả năng khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức để tạo ra laser. Tính chất của laser phụ thuộc vào hoạt chất đó, do đó người ta căn cứ vào hoạt chất để phân loại laser.

Nguồn nuôi là phần cung cấp năng lượng cho hệ thống laser. Bao gồm cực phóng điện, đèn nháy, đèn hồ quang, ánh sáng từ laser khác. Việc lựa chọn loại nguồn nuôi nào để sử dụng dựa chủ yếu vào môi trường kích thích là loại gì, và điều này là yếu tố chủ chốt quyết định làm sao mà năng lượng truyền vào trong môi trường.

Ví dụ: Laser He-Ne dùng cực phóng điện trong hỗn hợp khí Heli Neon. Laser Nd:YAG dùng ánh sáng hội tụ từ đèn nháy Xenon.

Môi trường kích thích là yếu tố chính quyết định bước sóng, và các tính chất khác của tia laser. Có hàng trăm môi trường kích thích có thể làm được. Môi trường kích thích bị kích thích bằng nguồn bơm tạo ra sự kích thích đồng đều giữa các electron, cần thiết cho sự phát xạ cưỡng bức các hạt photon, dẫn đến hiện tượng khuếch đại ánh sáng.

Một ví dụ về cơ chế hoạt động của laser có thể được miêu tả cho laser thạch anh. Dưới sự tác động của hiệu điện thế cao, các electron của thạch anh di chuyển từ mức năng lượng thấp lên mức năng lượng cao tạo nên trạng thái đảo nghịch mật độ của electron.

Ở mức năng lượng cao, một số electron sẽ rơi ngẫu nhiên xuống mức năng lượng thấp, giải phóng hạt ánh sáng được gọi là photon. Các hạt photon này sẽ toả ra nhiều hướng khác nhau từ một nguyên tử, và phải các nguyên tử khác, kích thích eletron ở các nguyên tử này rơi xuống tiếp, sinh thêm các photon cùng tần số, cùng pha và cùng hướng bay, tạo nên một phản ứng dây chuyền khuếch đại dòng ánh sáng.

Các hạt photon bị phản xạ qua lại nhiều lần trong vật liệu, nhờ các gương để tăng hiệu suất khuếch đại ánh sáng. Một số photon ra ngoài nhờ có gương phản xạ tại một đầu của vật liệu. Tia sáng đi ra chính là tia laser.

8.2. Nguyên tắc hoạt động laser

8.2.1. Sự phát xạ cưỡng bức

Ta đã biết rằng sự phát xạ bởi các hạt (nguyên tử, phân tử, ion) trong các nguồn sáng thông thường là các quá trình xảy ra một cách tự phát, hoàn toàn ngẫu nhiên. Khi nhận được một năng lượng thích hợp, hạt sẽ từ trạng thái bền nhảy lên trạng thái kích thích có mức năng lượng cao hơn. Sau một thời gian, hạt sẽ rơi trở về trạng thái bền và phóng thích năng lượng (đã hấp thụ) dưới dạng ánh sáng, nghĩa là phát ra photon.

Năm 1917, khi nghiên cứu quá trình tương tác giữa ánh sáng và vật chất, Einstein cho rằng : Không những các hạt phát xạ một cách ngẫu nhiên như trên mà còn có thể phát xạ do tác động của bên ngoài. Khi ta chiếu vào hệ một bức xạ, thì các hạt đang ở mức năng lượng kích thích E_2 sẽ rơi trở về trạng thái căn bản E_1 và phát ra bức xạ: Đó là hiện tượng bức xạ kích thích động (hay bức xạ cảm ứng, bức xạ cưỡng bức). Đây là cơ sở hoạt động của máy Laser.

Các hạt thay đổi giữa hai mức năng lượng E_1 (căn bản) và E_2 (kích thích). Khi ta kích thích bằng quang tử (photon) có năng lượng.

$$h\nu = E_2 - E_1$$

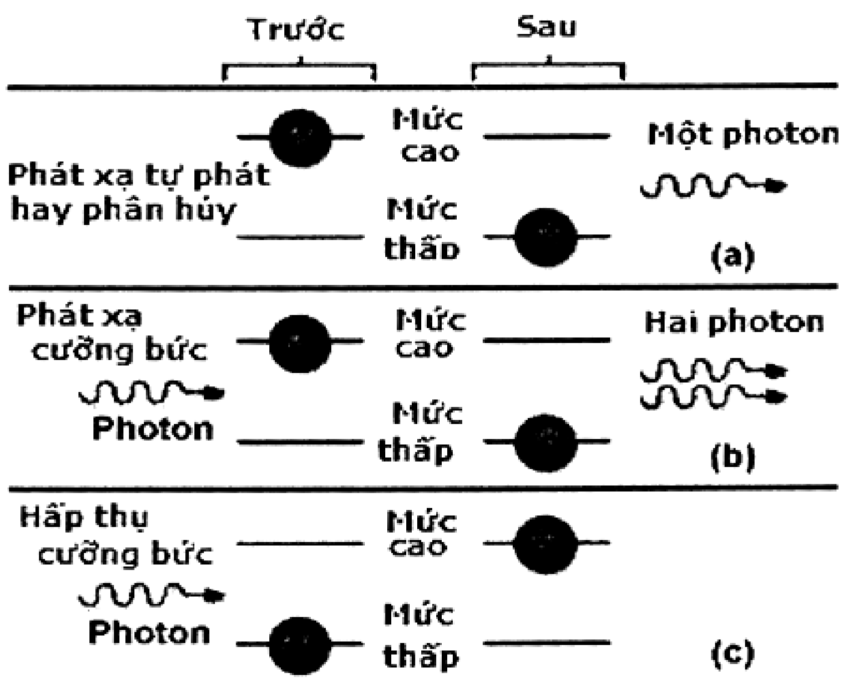
Thì các hạt từ mức E_1 sẽ nhảy lên mức E_2.

Số hạt ở mức năng lượng kích thích E_2 (cao hơn) bình thường ít hơn ở mức năng lượng căn bản E_1 (thấp hơn).

❖ Tóm lại, khi ta chiếu vào hệ một chùm tia sáng kích thích có năng lượng photon là $h\nu$ (thì trong một thời gian đó sẽ làm cho một số hạt từ trạng thái cơ bản E_1 nhảy lên trạng thái kích thích E_2 (sự hấp thụ), trong thời gian đó, một số hạt từ mức E_2 tự phát rơi trở về E_1, một số hạt khác bị đụng với photon kích thích cũng rơi trở về E_1 (sự phát xạ ngẫu nhiên và phát xạ cưỡng bức). Nhưng luôn luôn $n_2 < n_1$. Do đó, các photon kích thích $h\nu$ (gặp các hạt ở mức E_1 nhiều hơn gặp các hạt ở mức E_2, nghĩa là hiện tượng hấp thụ mạnh hơn hiện tượng phát xạ ánh sáng. Vì vậy, *ở điều kiện bình thường, khi đi qua một môi trường vật chất bao giờ ánh sáng cũng bị yếu đi.*

· Khi một photon hạt gặp một hạt ở trạng thái kích thích và làm hạt này rơi trở về mức căn bản thì photon được hạt phóng thích cũng là $h\nu$ (năng lượng do hạt hấp thụ khi đi từ E_1 lên E_2), photon mới sinh ra này hoàn toàn giống photon.

Như vậy kết quả của sự kích thích là từ một photon tới hạt, ta được hai photon phát xạ. Ta gọi là phát xạ cưỡng bức.



Hình 8.2. Các quá trình phát xạ tự phát và phát xạ cưỡng bức

8.2.2. Sự khuếch đại ánh sáng đi qua một môi trường

Bây giờ ta thử giả thuyết có một trường hợp: Trong một môi trường số hạt ở trạng thái kích thích lớn hơn số hạt ở trạng thái căn bản: $n_2 > n_1$. Trong trường hợp này, photon kích thích sẽ gặp các hạt ở trạng thái kích thích nhiều hơn ở trạng thái căn bản. Khi đó hiện tượng bức xạ sẽ mạnh hơn hiện tượng hấp thụ và kết quả ngược với trường hợp trên, khi truyền qua môi trường, ánh sáng mạnh hơn lên.

Thực vậy, khi một photon kích thích gặp một hạt ở trạng thái kích thích và gây ra sự phát xạ thì một photon thành hai. Cứ như thế số photon tăng lên rất nhanh, và khi truyền qua môi trường, ta được một chùm tia sáng có cường độ mạnh.

Như vậy, vấn đề là: Muốn có một chùm tia sáng cực mạnh bằng cách được khuếch đại lên như trên, ta phải làm cách nào có $n_2 > n_1$. Đó là sự "đảo ngược mật độ (nồng độ)". Môi trường khi bị đảo ngược mật độ (nồng độ) như vậy được gọi là môi trường hoạt tính.

Để số hạt có năng lượng cao nhiều hơn hạt số hạt có năng lượng thấp, người ta phải cung cấp năng lượng cho môi trường, phải "bơm" năng lượng cho nó. Một trong các cách làm nghịch đảo mật độ (nồng độ) là phương pháp "bơm" quang học. Kỹ thuật này đưa đến giải Nobel về vật lý cho nhà bác học Pháp Kastler năm 1966 (công trình này của Kastler được thực hiện từ năm 1950). Kastler dùng một chùm tia sáng có cường độ mạnh làm bơm để bơm năng lượng cho môi trường khiến nó trở thành hoạt tính. Phương pháp bơm quang học thường được dùng với các chất rắn và chất lỏng. Với laser khí, người ta thường nghịch đảo mật độ (nồng độ) bằng cách phóng điện trong khí kém.

8.2.3. Bộ cộng hưởng

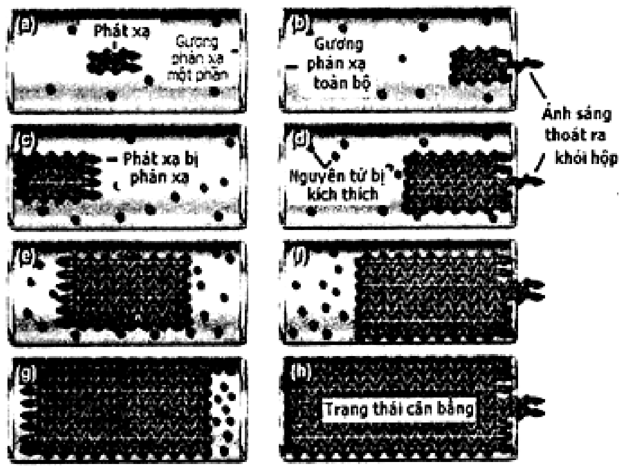
Với điều kiện $n_2 > n_1$, môi trường cho khả năng có thể thực hiện sự khuếch đại cường độ ánh sáng, nhưng muốn có được một chùm tia Laser có đặc tính định hướng cao độ thì chỉ có môi trường hoạt tính thì chưa đủ, mà còn cần một bộ phận gọi là bộ cộng hưởng. Bộ phận này vừa có tác dụng tăng cường cường độ ánh sáng, vừa có tác dụng định hướng chùm tia laser khi nó phóng ra khỏi máy. Trong trường hợp đơn giản nhất, bộ phận cộng hưởng gồm hai gương phẳng M_1 và M_2, đặt ở hai đầu máy.

Các photon có phương di chuyển thẳng góc với hai gương sẽ dội đi, dội lại nhiều lần trong môi trường hoạt tính. Như vậy bộ phận cộng hưởng đóng vai trò như một cái bẫy ánh sáng. Trong khi phản chiếu qua lại như thế, các photon đập vào các hạt ở trạng thái kích thích, làm phóng thích các photon khác. Các photon này lại phản chiếu qua lại giữa M_1 và M_2, đập vào các hạt ở trạng thái kích thích và lại làm bật ra các photon mới nữa, cứ như thế cường độ ánh sáng tăng lên rất mạnh.

Với các photon này không di chuyển thẳng góc với hai gương thì sau một hồi di chuyển, chúng bị lọt ra ngoài máy.

8.2.4. Thềm phát xạ cưỡng bức

Ta nhận thấy trong cách cấu tạo trên của máy laser, có thể một phần năng lượng sẽ bị mất đi do sự phản chiếu trên hai gương M_1, M_2 và do sự nhiễu xạ làm lệch phương di chuyển của các photon. Do đó, ta chỉ thực sự có hiện tượng khuếch đại cường độ ánh sáng nếu công suất P sinh ra do sự phát xạ cưỡng bức lớn hơn công suất P' bị mất đi.



Hình 8.3. Sự phát xạ cưỡng bức trong buồng cộng hưởng laser

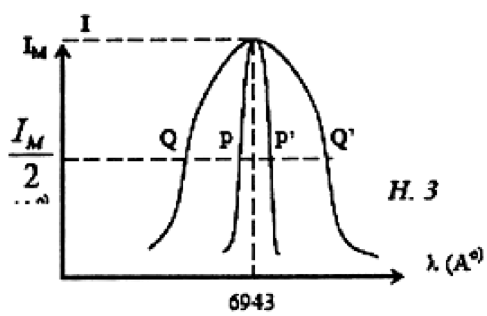
Như vậy muốn có được sự khuếch đại cường độ ánh sáng, không những ta phải có điều kiện đầu tiên $n_2 > n_1$ mà $n_2 - n_1$ phải lớn hơn một trị số (dương) xác định. Trị số này được gọi là thềm phát xạ cưỡng bức. Ta có trị số càng lớn thì thềm phát xạ cưỡng bức càng thấp.

Chỉ khi vào $n_2 - n_1$ vượt qua thềm, thì mới có ánh sáng laser phát ra.

8.2.5. Các đặc tính của tia laser

1. Tính đơn sắc

Các photon phát xạ cưỡng bức mang cùng một năng lượng hạt nên ánh sáng rất đơn sắc. Nếu xét ánh sáng phát ra bởi ngọc hồng tảo thì trong trường hợp laser, bề rộng PP' của vạch 6943A° hẹp khoảng 10^{-4} lần so với bề rộng QQ' của vạch này trong trường hợp phát xạ thông thường.



Hình 8.4. Tính đơn sắc

2. Tính đồng pha

Với một nguồn sáng thông thường, ánh sáng phát ra bởi các hạt là ánh sáng không đồng pha nhau, nghĩa là không có một sự liên hệ nào về pha giữa các dao động phát ra bởi các hạt. Trong trường hợp nguồn sáng laser, các photon phát ra đều đồng pha nên ánh sáng laser là 1 chùm ánh sáng điều hợp. Chính vì vậy, chùm tia laser có thể gây ra các tác dụng rất mạnh (tổng hợp các dao động đồng pha).

3. Tính song song

Chùm tia laser phát ra song song với trục, với một góc loe rất nhỏ.

Năm 1962, người ta tạo ra một chùm tia laser có góc loe là 3×10^{-5} rad.

8.2.6. Các chế độ hoạt động

1. Chế độ phát liên tục

Trong chế độ phát liên tục, công suất của một laser tương đối không đổi so với thời gian. Sự đảo nghịch mật độ (electron) cần thiết cho hoạt động laser được duy trì liên tục bởi nguồn bơm năng lượng đều đặn.

2. Chế độ phát xung

Trong chế độ phát xung, công suất laser luôn thay đổi so với thời gian, với đặc trưng là các giai đoạn "đóng" và "ngắt" cho phép tập trung năng lượng cao nhất có thể trong một thời gian ngắn nhất có thể.

Các dao laser là một ví dụ, với năng lượng đủ để cung cấp một nhiệt lượng cần thiết, chúng có thể làm bốc hơi một lượng nhỏ vật chất trên bề mặt mẫu vật trong thời gian rất ngắn. Tuy nhiên, nếu cùng năng lượng như vậy nhưng tiếp xúc với mẫu vật trong thời gian dài hơn thì nhiệt lượng sẽ có thời gian để xuyên sâu vào trong mẫu vật do đó phần vật chất bị bốc hơi sẽ ít hơn.

Có rất nhiều phương pháp để đạt được điều này, như:

+ Phương pháp chuyển mạch Q (Q-switching)

+ Phương pháp kiểu khoá (modelocking)

+ Phương pháp bơm xung (pulsed pumping)

Dao laser: Thiết bị là sự kết hợp giữa 2 công nghệ: laser femto giây và hiển vi huỳnh quang hai photon, thành một loại máy thăm dò linh hoạt cỡ nhỏ duy nhất. Máy thăm dò có thể xác định các tế bào đơn lẻ trong không gian 3 chiều, đâm xuyên tới 250 micromet vào trong khối mô.

8.2.7. Dạng phổ

Hiện tượng laser xảy ra do sự tương tác của hai hệ thống:

+ Hệ nguyên tử có chuyển mức năng lượng của điện tử làm phát sinh photon.

+ Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối.

1. Tương tác giữa bức xạ với hệ nguyên tử

Một photon sẽ phát sinh khi 1điện tử chuyển từ 1 mức năng lượng cao xuống 1 mức năng lượng thấp hơn:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Trong thực tế có sự mở rộng vạch phổ do 2 quá trình sau:

- Homogeneous broadening: đặc trưng cho tất cả các nguyên tử trong hệ,
- Inhomogeneous broadening: vạch phổ bị mở rộng do các hiệu ứng nguyên tử riêng biệt. Trong tinh thể các nguyên tử khác nhau có thể có các chuyển mức năng lượng khác nhau ít do các nguyên tử lân cận. Các nguyên tử trong khi chuyển động theo các hướng khác nhau với các vận tốc khác nhau, do đó gây ra các dịch chuyển Doppler khác nhau lên tần số.

* Quá trình này chiếm ưu thế với laser khí; laser Helium-neon có độ rộng bán phổ $\approx 1.1 \times 10^9$ Hz đến 1.4×10^9 Hz.

* Phổ của laser thực có thể bị ảnh hưởng do tổn hao phản xạ bởi gương và tán xạ không khí.

2. Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối

Điều kiện cộng hưởng: hành trình qua hốc 2L = số nguyên m lần bước sóng.

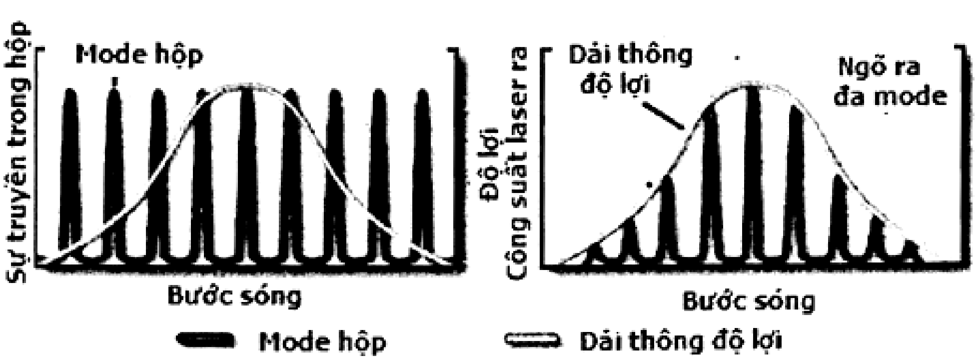
$$2L = m\lambda$$

Có rất nhiều tần số laser được phép, cách nhau các khoảng.

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

Gọi là các mode hốc cộng hưởng (cavity modes) hay mode dọc (longitudinal modes).

Người thiết kế laser phải tối ưu hoá thiết kế cho tần số mong muốn nhờ việc điều khiển hỗn hợp khí, các đặc trưng kích thích và phản xạ của hốc và có thể dùng bộ lọc, hoặc tăng khoảng cách giữa các gương (tăng L).



Hình 8.5. Mode dọc (longitudinal modes)

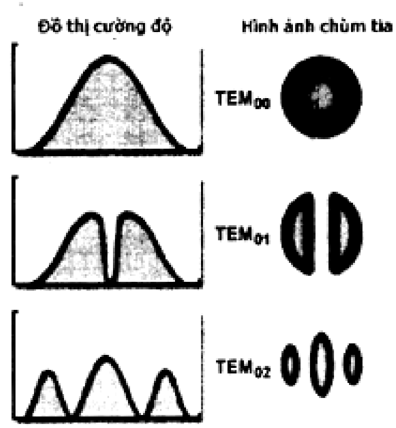
Trong thực tế chỉ có những chuyển mức năng lượng với thời gian sống tương đối lớn mới có thể tạo ra các vạch phổ có thể sử dụng được.

Năng lượng laser khả dụng nhận được khi độ lợi của hốc được điều chỉnh để chọn 1 trong các vạch laser khả dĩ.

Sự phát xạ đồng thời này được gọi là longitudinal modes.

Ngoài ra, hốc laser có thể tạo ra một số mode không gian hay TEM modes (mode ngang Tranverse Electric Magnetic). Các mode này hình thành do các tia hơi lệch so với trục chính.

Trong thực tế, mode mong muốn là TEM00, là tia đơn với phân bố năng lượng theo phân bố Gauss.



Hình 8.6. Mode ngang

8.2.8. Điều khiển Laser

Công suất bức xạ, bước sóng, dòng hoạt động và thời gian sử dụng của Laser đều thay đổi theo nhiệt độ, do đó cần có các vòng điều khiển điện và điều khiển nhiệt.

+ Vòng điều khiển điện:

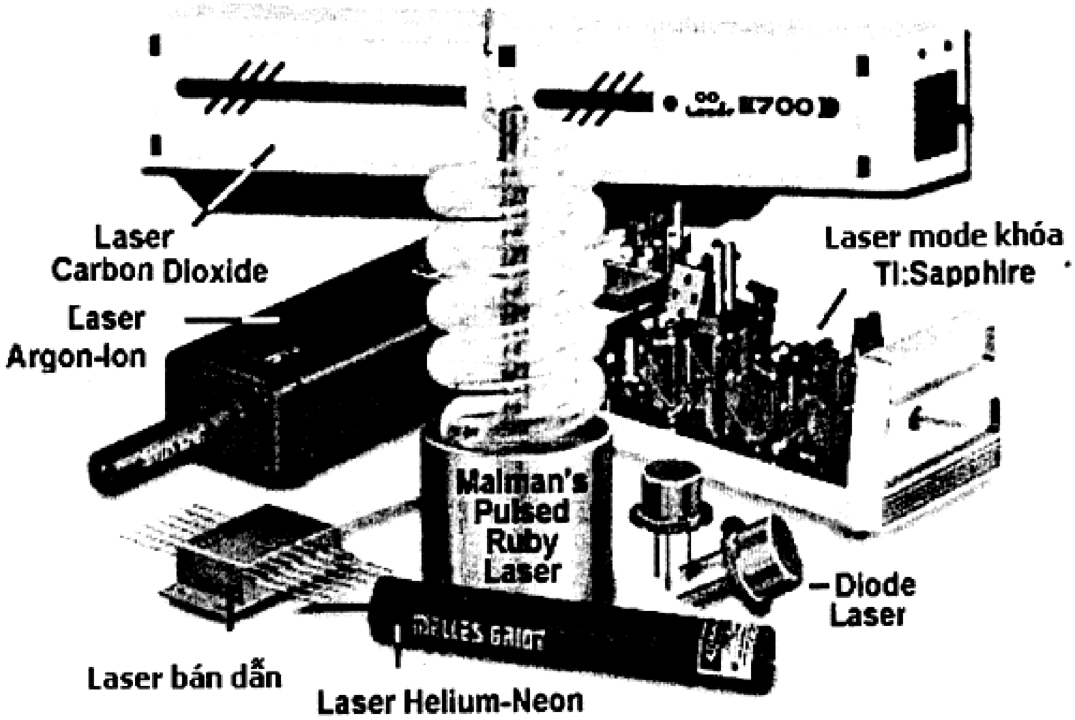
- Chống các xung dòng và thế phá huỷ
- Điều chế dòng laser
- Điều chỉnh dòng ngưỡng

+ Vòng điều khiển nhiệt:

- Tiếp xúc nhiệt với vỏ laser
- Thường chứa linh kiện bơm nhiệt bán dẫn gọi là thermoelectric cooler hoặc Peltier device có tác dụng thu nhiệt (bơm nhiệt từ laser ra vỏ ngoài của đầu laser).

Bơm nhiệt điện: dùng điện tử chuyển nhiệt lượng từ mặt hấp thụ nhiệt ra mặt truyền nhiệt thông qua dãy các bán dẫn BiTe (Bismuth Telluride) loại N và P ghép luân phiên với kim loại tiếp xúc với các mặt truyền nhiệt và mặt hấp thụ nhiệt.

8.3. Các kiểu laser



Hình 8.7. Các loại laser thông dụng

8.3.1. Laser chất rắn

Có khoảng 200 chất rắn có khả năng dùng làm môi trường hoạt chất laser. Một số loại laser chất rắn thông dụng:

+ YAG-Neodym: hoạt chất là Yttrium Aluminium Garnet (YAG) cộng thêm 2-5% Neodym, có bước sóng 1060nm thuộc phổ hồng ngoại gần. Có thể phát liên tục tới 100W hoặc phát xung với tần số 1000-10 000Hz.
+ Hồng ngọc (Rubi): hoạt chất là tinh thể Alluminium có gắn những ion chrom, có bước sóng 694,3nm thuộc vùng đỏ của ánh sáng trắng.
+ Bán dẫn: loại thông dụng nhất là diot Gallium Arsen có bước sóng 890nm thuộc phổ hồng ngoại gần (trình bày kỹ ở phần 8.4.).

8.3.2. Laser chất khí

- He-Ne: hoạt chất là khí Heli và Neon, có bước sóng 632,8nm thuộc phổ ánh sáng đỏ trong vùng nhìn thấy, công suất nhỏ từ một đến vài chục mW.
- Argon: hoạt chất là khí argon, bước sóng 488 và 514,5nm.

CO_2: bước sóng 10 600nm thuộc phổ hồng ngoại xa, công suất phát xạ có thể tới megawatt (MW). Trong y học ứng dụng làm dao mổ.

Môi trường kích thích và loại	Bước sóng	Nguồn kích thích	Ứng dụng và ghi chú
Laser khí He-Ne	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 μm, 1.52 μm, 3.3913 μm)	Cực phóng điện	Giao thoa kế, holograph, quang phổ học, đọc mã vạch, cân chỉnh, miêu tả quang học.
Laser khí ion Argon	488.0 nm, 514.5 nm, (351 nm, 465.8 nm, 472.7 nm, 528.7 nm)	Cực phóng điện	Chữa trị võng mạc bằng ánh sáng (cho người bệnh tiểu đường), in thạch bản, là nguồn kích thích các laser khác.
Laser khí Ion Kryton	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Cực phóng điện	Nghiên cứu khoa học, trình diễn ánh sáng.
Laser khí ion Xenon	Nhiều vạch từ cực tím đến hồng ngoại.	Cực phóng điện	Nghiên cứu khoa học.
Laser khí Nitơ	337.1 nm	Cực phóng điện	Là nguồn kích thích cho laser màu, đo độ ô nhiễm, nghiên cứu khoa học, Laser nitơ có khả năng hoạt động ở cường độ yếu.
Laser H-F	2.7 đến 2.9 μm (H-F) 3.6 đến 4.2 μm (D-F)	Phản ứng cháy ethylene và NF_3	Dùng cho nghiên cứu vũ khí laser, dùng sóng phát ra liên tục và có tính công phá lớn.
Laser hoá học Ôxy-Iốt	1.315 μm	Phản ứng hoá học trong giữa Ô-xy và I-ốt,	Vũ khí laser, nghiên cứu vật liệu và khoa học.

Laser khí CO_2	10.6 µm, (9.4 µm)	Phóng điện ngang (công suất cao) hay dọc (công suất thấp)	Gia công vật liệu (cắt, hàn), phẫu thuật.
Laser khí CO	2.6 đến 4 µm, 4.8 đến 8.3 µm	Cực phóng điện	Gia công vật liệu (chạm khắc, hàn), phổ học quang-âm.
Excimer laser	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	Excimer tái hợp nhờ phóng điện	Quang thạch bản cực tím cho chế tạo link kiện bán dẫn, phẫu thuật laser, LASIK.

Hình 8.8. Bảng mô tả các loại laser khí

8.3.3. Laser chất lỏng

Môi trường hoạt chất là chất lỏng, thông dụng nhất là laser màu.

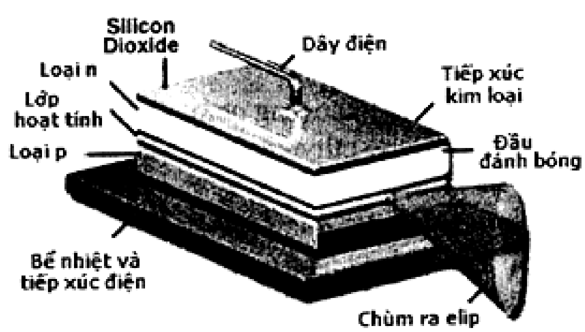
➢ Tính chất:

+ Độ định hướng cao: tia laser phát ra hầu như là chùm song song do đó khả năng chiếu xa hàng nghìn km mà không bị tán xạ.

+ Tính đơn sắc rất cao: chùm sáng chỉ có một màu (hay một bước sóng) duy nhất. Đây là tính chất đặc biệt nhất mà không nguồn sáng nào có.

+ Tính đồng bộ của các photon trong chùm tia laser: Có khả năng phát xung cực ngắn: cỡ mili giây (ms), nano giây, pico giây, cho phép tập trung năng lượng tia laser cực lớn trong thời gian cực ngắn.

8.4. Laser Diode (LD)



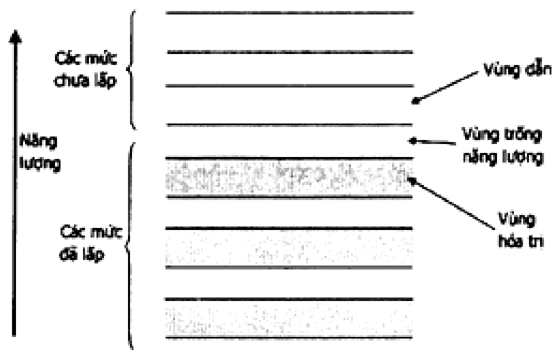
Hình 8.9. Diode laser bán dẫn

Một loại laser có cấu tạo tương tự như một diod. Nó có môi trường kích thích là chất bán dẫn. Diod laser hoạt động gần giống với diod phát quang. Nó cũng được gọi là đèn diode nội xạ và được viết tắt là LD hay ILD.

Chất bán dẫn (Semiconductor) là vật liệu trung gian giữa chất dẫn điện và chất cách điện. Chất bán dẫn hoạt động như một chất cách điện ở nhiệt độ thấp và có tính dẫn điện ở nhiệt độ phòng. Gọi là "bán dẫn" nghĩa là có thể dẫn điện ở một điều kiện nào đó, hoặc ở một điều kiện khác sẽ không dẫn điện.

8.4.1. Vùng năng lượng trong chất bán dẫn

Tính chất dẫn điện của các vật liệu rắn được giải thích nhờ lý thuyết vùng năng lượng. Như ta biết, điện tử tồn tại trong nguyên tử trên những mức năng lượng gián đoạn (các trạng thái dừng). Nhưng trong chất rắn, khi mà các nguyên tử kết hợp lại với nhau thành các khối, thì các mức năng lượng này bị phủ lên nhau, và trở thành các vùng năng lượng và sẽ có ba vùng chính.



Hình 8.10. Vùng năng lượng trong chất bán dẫn

8.4.2. Cấu trúc năng lượng điện tử trong mạng nguyên tử của chất bán dẫn

Vùng hóa trị được lấp đầy, trong khi vùng dẫn trống. Mức năng lượng Fermi nằm ở vùng trống năng lượng.

- Vùng hoá trị (valence band): Vùng có năng lượng thấp nhất theo thang năng lượng, là vùng mà điện tử bị liên kết mạnh với nguyên tử và không linh động.
- Vùng dẫn (Conduction band): Vùng có mức năng lượng cao nhất, là vùng mà điện tử sẽ linh động (như các điện tử tự do) và điện tử ở vùng này sẽ là điện tử dẫn, có nghĩa là chất sẽ có khả năng dẫn điện khi có điện tử tồn tại trên vùng dẫn. Tính dẫn điện tăng khi mật độ điện tử trên vùng dẫn tăng.
- Vùng cấm (Forbidden band): Vùng nằm giữa vùng hoá trị và vùng dẫn, không có mức năng lượng nào do đó điện tử không thể tồn tại trên vùng cấm. Nếu bán dẫn pha tạp, có thể xuất hiện các mức năng lượng trong vùng cấm (mức pha tạp). Khoảng cách giữa đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hoá trị gọi là độ rộng vùng cấm, hay năng lượng vùng cấm (Band Gap). Tuỳ theo độ rộng vùng cấm lớn hay nhỏ mà chất có thể là dẫn điện hoặc không dẫn điện.

Như vậy, tính dẫn điện của các chất rắn và tính chất của chất bán dẫn có thể lý giải một cách đơn giản nhờ lý thuyết vùng năng lượng như sau:

- Kim loại có vùng dẫn và vùng hoá trị phủ lên nhau (không có vùng cấm) do đó luôn luôn có điện tử trên vùng dẫn vì thế mà kim loại luôn luôn dẫn điện.

- Các chất bán dẫn có vùng cấm có một độ rộng xác định. Ở không độ tuyệt đối (0 K), mức Fermi nằm giữa vùng cấm, có nghĩa là tất cả các điện tử tồn tại ở vùng hoá trị, do đó chất bán dẫn không dẫn điện. Khi tăng dần nhiệt độ, các điện tử sẽ nhận được năng lượng nhiệt $k_B.T$ (với k_B là hằng số Boltzmann) nhưng năng lượng này chưa đủ để điện tử vượt qua vùng cấm nên điện tử vẫn ở vùng hoá trị. Khi tăng nhiệt độ đến mức đủ cao, sẽ có một số điện tử nhận được năng lượng lớn hơn năng lượng vùng cấm và nó sẽ nhảy lên vùng dẫn và chất rắn trở thành dẫn điện. Khi nhiệt độ càng tăng lên, mật độ điện tử trên vùng dẫn sẽ càng tăng lên, do đó, tính dẫn điện của chất bán dẫn tăng dần theo nhiệt độ (hay điện trở suất giảm dần theo nhiệt độ). Một cách gần đúng, có thể viết sự phụ thuộc của điện trở chất bán dẫn vào nhiệt độ như sau:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2k_B T}\right)$$

Ta có:

R_0 là hằng số

ΔE_g là độ rộng vùng cấm.

Ngoài ra, tính dẫn của chất bán dẫn có thể thay đổi nhờ các kích thích năng lượng khác, ví dụ như ánh sáng. Khi chiếu sáng, các điện tử sẽ hấp thu năng lượng từ photon, và có thể nhảy lên vùng dẫn nếu năng lượng đủ lớn. Đây chính là nguyên nhân dẫn đến sự thay đổi về tính chất của chất bán dẫn dưới tác dụng của ánh sáng (quang - bán dẫn).

8.4.3. Bán dẫn pha tạp

Chất bán dẫn loại p có tạp chất là các nguyên tử thuộc nhóm III, dẫn điện chủ yếu bằng các lỗ trống (viết tắt cho chữ positive, nghĩa là dương). Chất bán dẫn loại n có tạp chất là các nguyên tử thuộc nhóm V, các nguyên tử này dùng 4 electron tạo liên kết và một electron lớp ngoài liên kết lỏng lẻo với nhân, đấy chính là các electron dẫn chính. Có thể giải thích một cách đơn giản về bán dẫn pha tạp nhờ vào lý thuyết vùng năng lượng như sau: Khi pha tạp, sẽ xuất hiện các mức pha tạp nằm trong vùng cấm, chính các mức này khiến cho điện tử dễ dàng chuyển lên vùng dẫn hoặc lỗ trống dễ dàng di chuyển xuống vùng hoá trị để tạo nên tính dẫn của vật liệu. Vì thế, chỉ cần pha tạp với hàm lượng rất nhỏ cũng làm thay đổi lớn tính chất dẫn điện của chất bán dẫn.

8.4.4. Các đặc tính phổ của diode laser

Trong diode Laser chỉ có một số sóng ánh sáng có bước sóng nhất định mới có thể lan truyền được trong buồng cộng hưởng. Điều kiện để truyền lan ánh sáng là sóng phản xạ và sóng tới phải đồng pha với nhau.

Như vậy Laser chỉ khuếch đại những bước sóng λ_0 thoả mãn điều kiện (n, N các số tự nhiên).

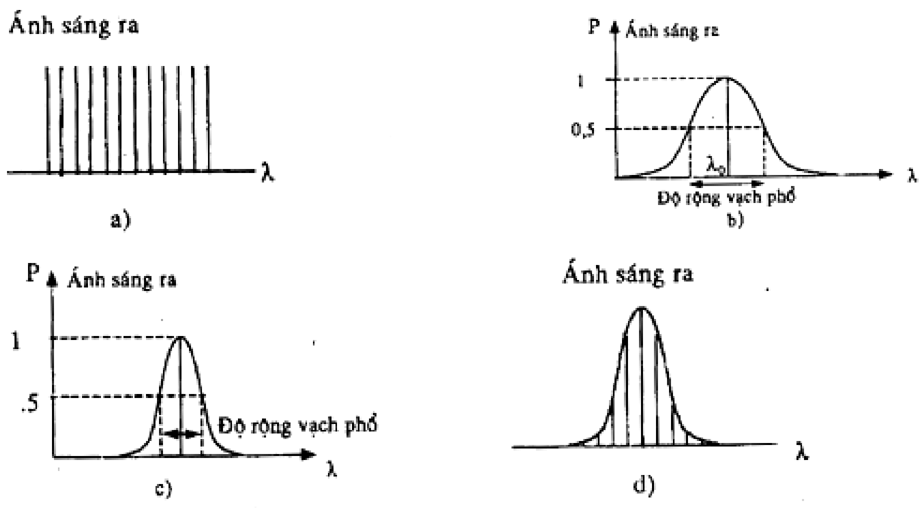
$$\lambda_0 = \frac{2nL}{N}$$

Mỗi bước sóng đó được gọi là mode dọc, hay đơn giản là mode. Tập hợp đỉnh của các mode này sẽ tạo thành đường bao phổ bức xạ của diode Laser.

Ta sẽ tìm được khoảng cách về mặt tần số giữa hai mode liên tiếp nhau.

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

Phổ bức xạ của Laser phụ thuộc rất nhiều vào dòng điện định thiên. Khi Laser hoạt động ở chế độ dưới ngưỡng, bức xạ tự phát chiếm ưu thế và do đó độ rộng vạch phổ giống với LED. Tuy nhiên, nếu diode Laser hoạt động ở chế độ lớn hơn chế độ ngưỡng thì độ vạch phổ sẽ giảm xuống. Vạch phổ hẹp lại do tác động của buồng cộng hưởng và khuếch đại theo hàm mũ những mode đạt tới mức ngưỡng, đồng thời bỏ qua tất cả các mode khác.



Hình 8.11.

a) Các mode trong Laser bán dẫn;

b) Đường bao vạch phổ khi Laser hoạt động dưới mức ngưỡng;

c) Đường bao vạch phổ khi Laser hoạt động trên mức ngưỡng;

d) Phổ bức xạ.

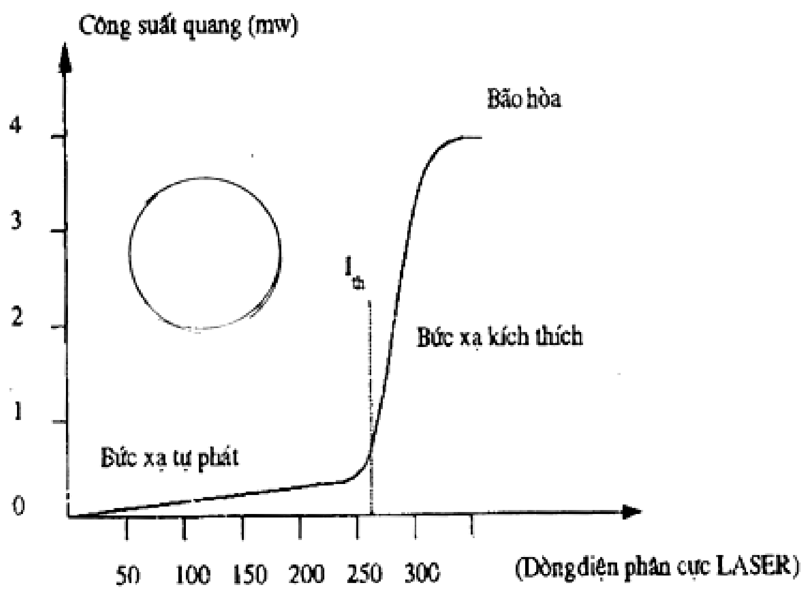
Khi diode Laser hoạt động dưới mức ngưỡng thì tất cả các mode truyền dẫn được khuếch đại như nhau. Nếu tăng dòng điện phân cực diode lên thì hệ số khuếch đại tăng. Tuy nhiên mode có bước sóng gần với bước sóng hoạt động danh định hơn cả sẽ được khuếch đại nhiều nhất. Hiện tượng này được biểu diễn như hình trên. Như vậy có thể thấy rằng, khi diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng thì độ rộng vạch phổ sẽ hẹp đáng kể so với LED.

Bên cạnh các mode dọc, còn có các mode ngang và các mode bên (lateral mode). Các mode này có xu hướng làm cho các chùm tia ra phân kì mạnh, kết quả là việc ghép nối với sợi quang sẽ kém hiệu quả. Trạng thái lý tưởng chỉ có một trong các mode ngang cơ bản và mode bên của nó tồn tại (điều này sẽ làm cho chùm sáng ra song song và có đường kính ngang nhỏ).

Với hầu hết các diode Laser, vùng hoạt tính đều có bề dày nhỏ hơn 1 μm

8.4.5. Sự biến thiên công suất quang theo dòng điều khiển

Ta nhận thấy rằng với diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng, công suất ra tỉ lệ trực tiếp với dòng điện chênh lệch so với mức ngưỡng. Trong thực tế, diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng không thể hiện quan hệ tuyến tính hoàn toàn giữa lượng ánh sáng ra và dòng điện định thiên. Điều này có nguyên nhân từ hiện tượng mode-hopping.



Hình 8.12. Sự biến thiên công suất quang theo dòng điều khiển.

Biểu diễn sự biến thiên của công suất ra theo dòng điện diode đối với một diode Laser phát quang ở bước sóng 850nm. Hình vẽ này cho thấy, ở trên điểm ngưỡng diode Laser mới hoạt động như một Laser. Ta cũng biết rằng công suất ra sẽ bão hoà khi dòng điện đủ lớn. Bởi vì do dòng điện có cường độ cao làm nóng diode, điều này làm giảm hiệu suất nghịch đảo.

8.4.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ của Laser

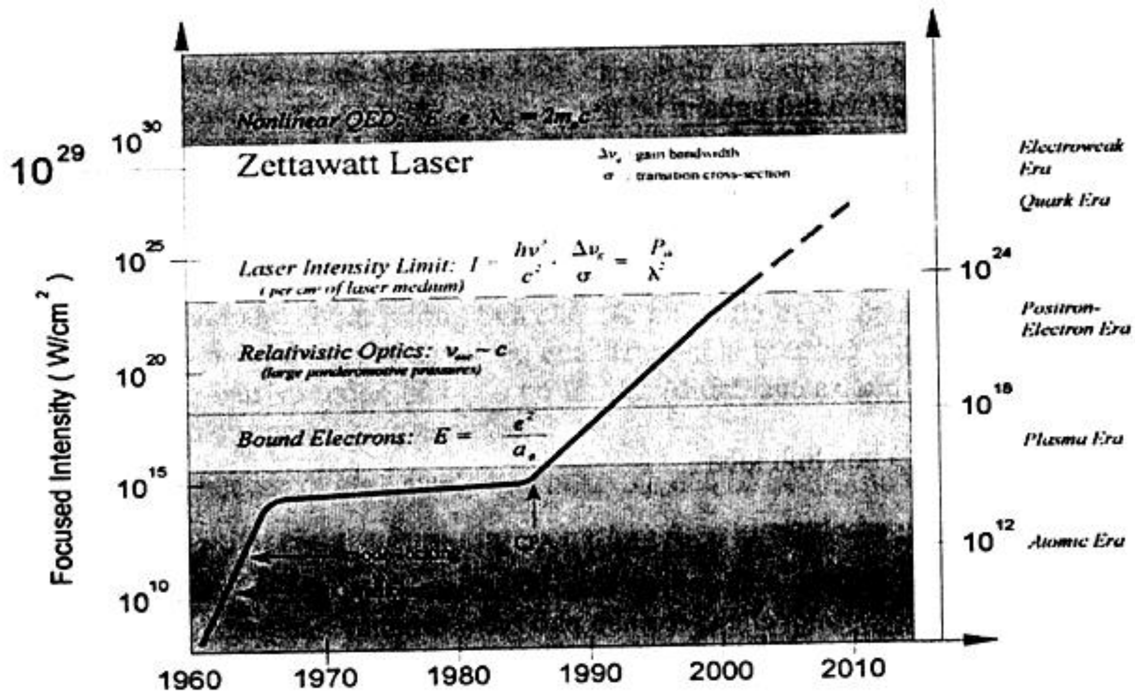
- Lắp đặt và thử nghiệm
- Các xung điện từ phát sinh bên ngoài trong thời gian ngắn
- Mức dòng
- Nhiệt độ
- Mức bức xạ cực đại
- Sự già hoá linh kiện

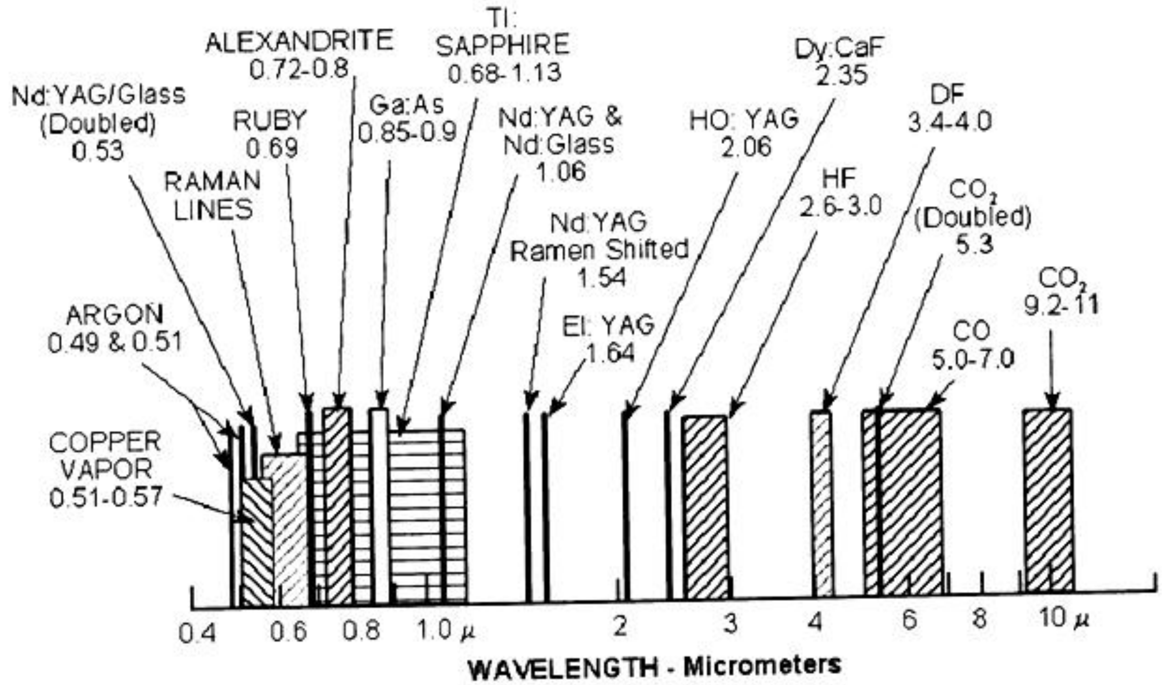
8.5. Các ứng dụng của laser

Vào thời điểm được phát minh năm 1960, laser được gọi là "giải pháp để tìm kiếm các ứng dụng". Từ đó, chúng trở nên phổ biến, tìm thấy hàng ngàn tiện ích trong các ứng dụng khác nhau trên mọi lĩnh vực của xã hội hiện đại, như phẫu thuật mắt, hướng dẫn phương tiện trong tàu không gian, trong các phản ứng hợp nhất hạt nhân... Laser được cho là một trong những phát minh ảnh hưởng nhất trong thế kỷ20.

Ích lợi của laser đối với các ứng dụng trong khoa học, công nghiệp, kinh doanh nằm ở tính đồng pha, đồng màu cao, khả năng đạt được cường độ sáng cực kỳ cao, hay sự hợp nhất của các yếu tố trên. Ví dụ, sự đồng pha của tia laser cho phép nó hội tụ tại một điểm có kích thước nhỏ nhất cho phép bởi giới hạn nhiễu xạ, chỉ rộng vài nanômét đối với laser dùng ánh sáng. Tính chất này cho phép laser có thể lưu trữ vài gigabyte thông tin trên các rãnh của DVD. Cũng là điều kiện cho phép laser với công suất nhỏ vẫn có thể tập trung cường độ sáng cao và dùng để cắt, đốt và có thể làm bốc hơi vật liệu trong kỹ thuật cắt bằng laser. Ví dụ, một laser Nd:YAG, sau quá trình nhân đôi tần số, phóng ra tia sáng xanh tại bước sóng 523 nm với công suất 10 W có khả năng, trên lý thuyết, đạt đến cường độ sáng hàng triệu W trên một cm vuông. Trong thực tế, thì sự tập trung hoàn toàn của tia laser trong giới hạn nhiễu xạ là rất khó.

Tia sáng laser với cường độ cao có thể cắt thép và các kim loại khác. Tia từ laser thường có độ phân kì rất nhỏ, (độ chuẩn trực cao). Độ chuẩn trực tuyệt đối là không thể tạo ra, bởi giới hạn nhiễu xạ. Tuy nhiên, tia laser có độ phân kỳ nhỏ hơn so với các nguồn sáng. Một tia laser được tạo từ laser He-Ne, nếu chiếu từ Trái Đất lên Mặt Trăng, sẽ tạo nên một hình tròn đường kính khoảng 1 dặm (1,6 kilômét). Một vài laser, đặc biệt là với laser bán dẫn, có với kích thước nhỏ dẫn đến hiệu ứng nhiễu xạ mạnh với độ phân kỳ cao. Tuy nhiên, các tia phân kỳ đó có thể chuyển đổi về tia chuẩn trực bằng các thấu kính hội tụ. Trái lại, ánh sáng không phải từ laser không thể làm cho chuẩn trực bằng các thiết bị quang học dễ dàng, vì chiều dài đồng pha ngắn hơn rất nhiều tia laser. Định luật nhiễu xạ không áp dụng khi laser được truyền trong các thiết bị dẫn sóng như sợi thuỷ tinh. Laser cường độ cao cũng tạo nên các hiệu ứng thú vị trong quang học phi tuyến tính.


Nonlinear QED
10^29
10^30
Zettawatt Laser
Δν gain bandwidth
σ transition cross-section
10^25
Laser Intensity Limit
Relativistic Optics
Bound Electrons
10^20
10^15
10^10
Focused Intensity (W/cm²)
1960
1970
1980
1990
2000
2010
10^24
10^18
10^12
Electroweak Era
Quark Era
Positron-Electron Era
Plasma Era
Atomic Era


ALEXANDRITE 0.72-0.8
TI: SAPPHIRE 0.68-1.13
Dy:CaF 2.35
Nd:YAG/Glass (Doubled) 0.53
RUBY 0.69
Ga:As 0.85-0.9
Nd:YAG & Nd:Glass 1.06
HO: YAG 2.06
DF 3.4-4.0
RAMAN LINES
HF 2.6-3.0
CO2 (Doubled) 5.3
Nd:YAG Ramen Shifted 1.54
CO2 9.2-11
ARGON 0.49 & 0.51
El: YAG 1.64
CO 5.0-7.0
COPPER VAPOR 0.51-0.57
0.4
0.6
0.8
1.0 μ
2
3
4
6
8
10 μ
WAVELENGTH - Micrometers

MỤC LỤC