

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...

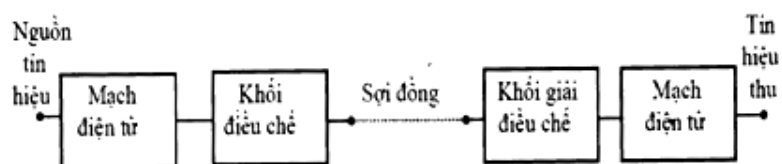
Mạch điện tử: có nhiệm vụ xử lý nguồn thông tin để tạo ra các tín hiệu điện dưới dạng analog hoặc digital.

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).

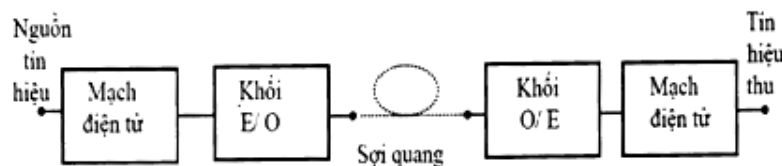
Sợi quang có nhiệm vụ truyền dẫn tín hiệu quang từ nơi phát đến nơi thu.

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.



a. Hệ thống thông tin điện



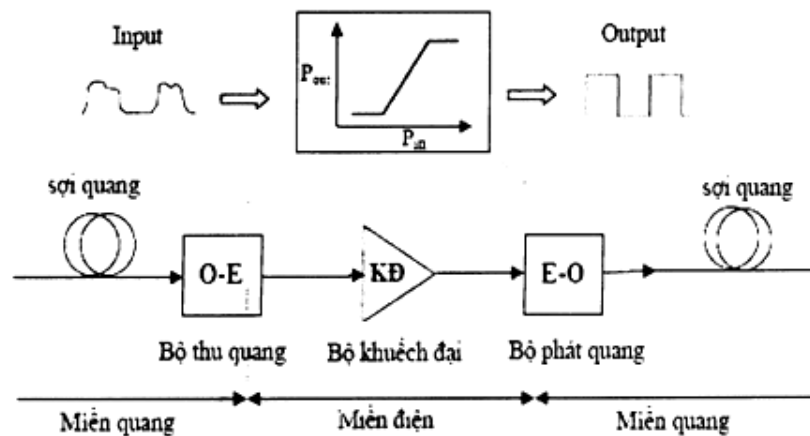
b. Hệ thống thông tin quang

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 thủy 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

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

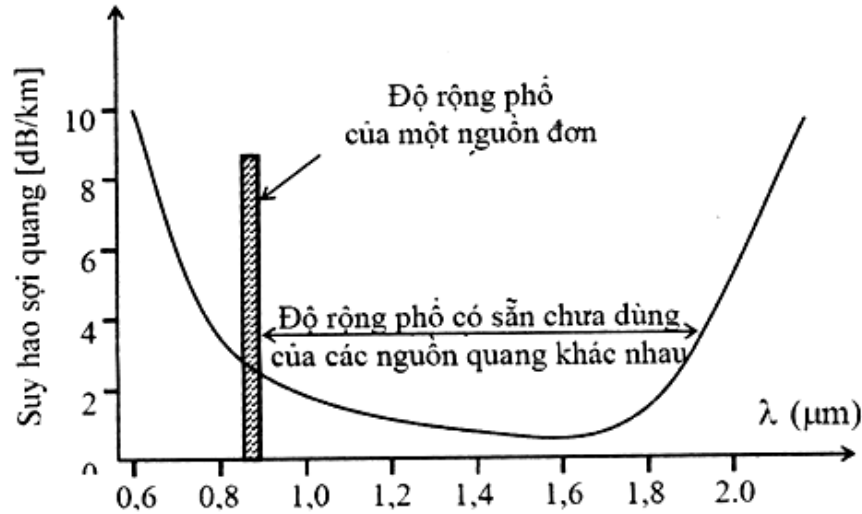
Trong đó:

- ν - tần số bức xạ của ánh sáng ($\nu = c/\lambda$).
- h - hằng số Planck ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s = $4,16 \cdot 10^{-15}$ eV.s).
- c - vận tốc của ánh sáng ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).
- λ - độ dài bước sóng của bức xạ ánh sáng phát ra.

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

6.2.2. Khái niệm về kỹ thuật thông tin quang WDM

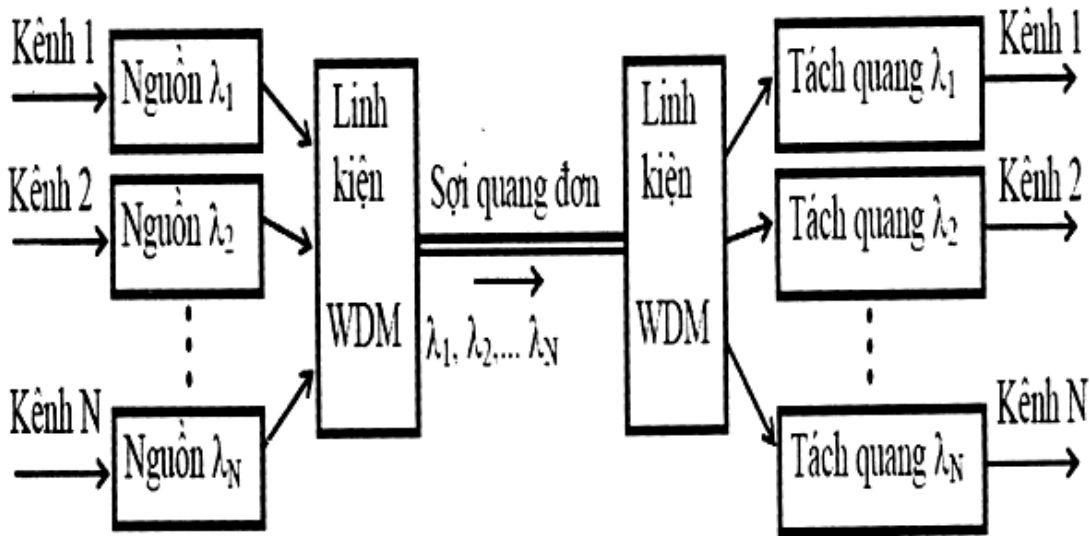
Bộ lọc quang liên quan đến kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng - WDM. Vì mỗi một nguồn sáng đơn sắc có độ rộng phổ hẹp, nên trong truyền dẫn nó chỉ sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của một sợi quang. Ghép kênh phân chia theo bước sóng sẽ tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.



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 định bức xạ đặt cách nhau một cách chính xác. Bởi mỗi nguồn sáng hoạt động tại một bước sóng định khác nhau, tính toàn vẹn của các tín hiệu 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).

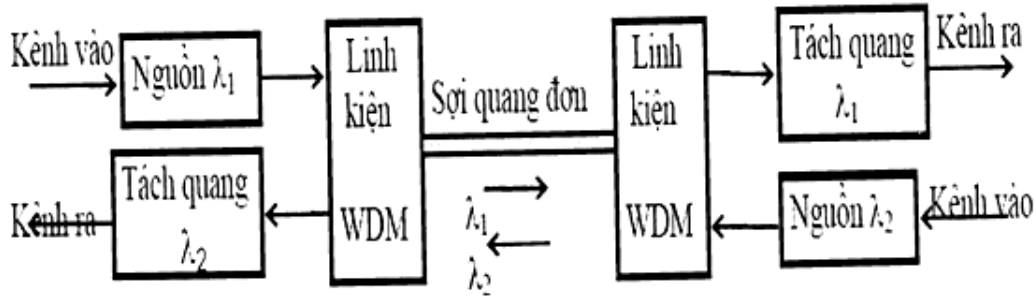
Hai cơ cấu WDM khác nhau mô tả trong hình sau:



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

Chương 6: Linh kiện của hệ thống thông tin quang

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.

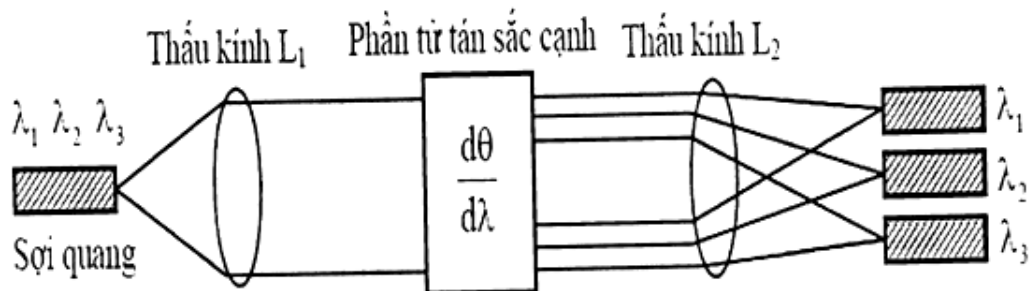
Sơ đồ hệ thống WDM hai hướng được mô tả trong hình trên.

Sơ đồ này gồm việc gửi tín hiệu 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 một.

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.

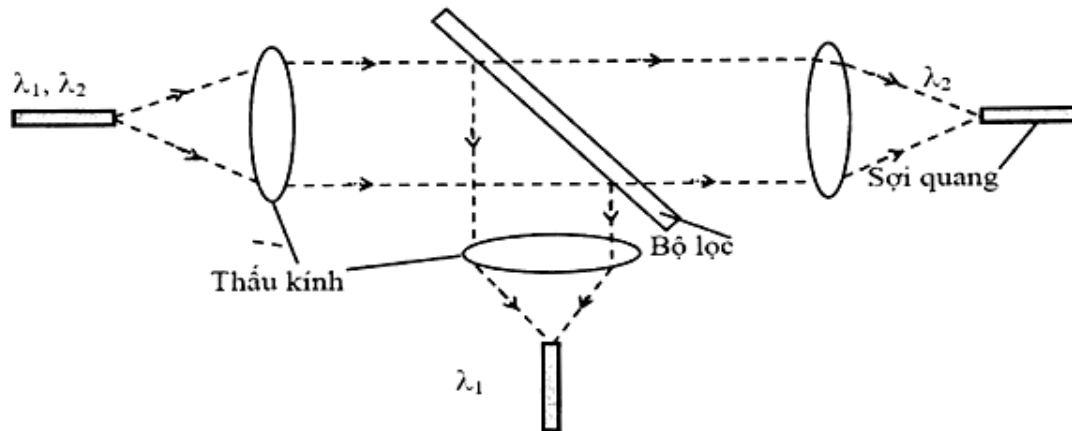
6.3. Bộ lọc quang màng mỏng

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 tùy 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).

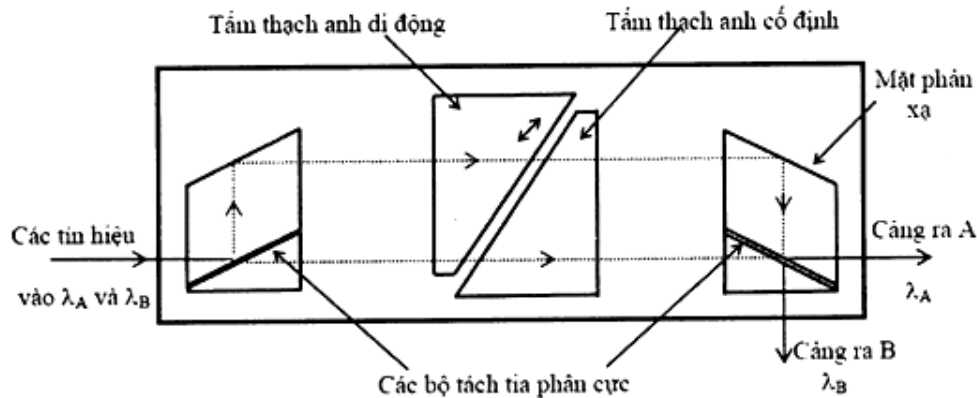


Hình 6.7. Bộ lọc màng mỏng nhiều lớp phản xạ sử dụng cho WDM.

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 wavelength-tunable-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

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

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 -).

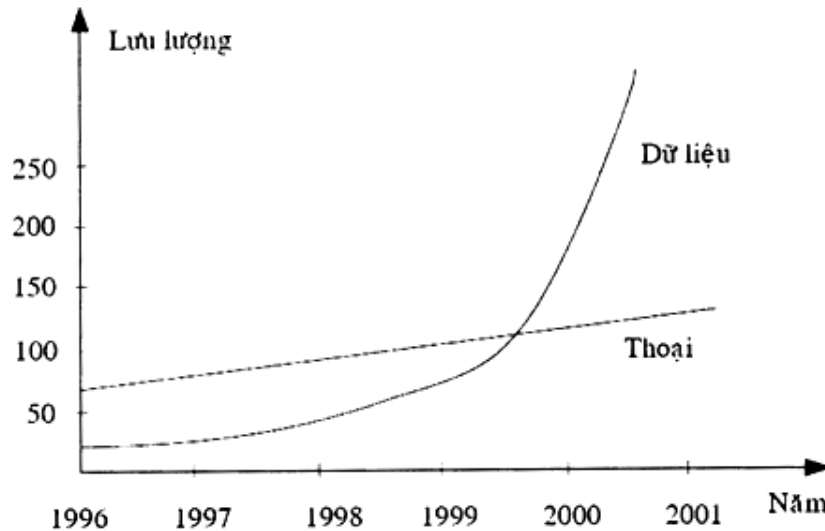
Sự biến đổi hình sin của phổ ra có thể được thay đổi bằng cách thay đổi độ dài đường truyền L đi qua tinh thể. Điều này đạt được bằng cách di chuyển một trong các tấm thạch anh lên trên hoặc xuống dưới. Sự thay đổi chiều dài theo cấp bậc chu kỳ quay phân cực sẽ xác định vị trí của kênh.

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 lý 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 họa 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. (Nhu 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 Division 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:

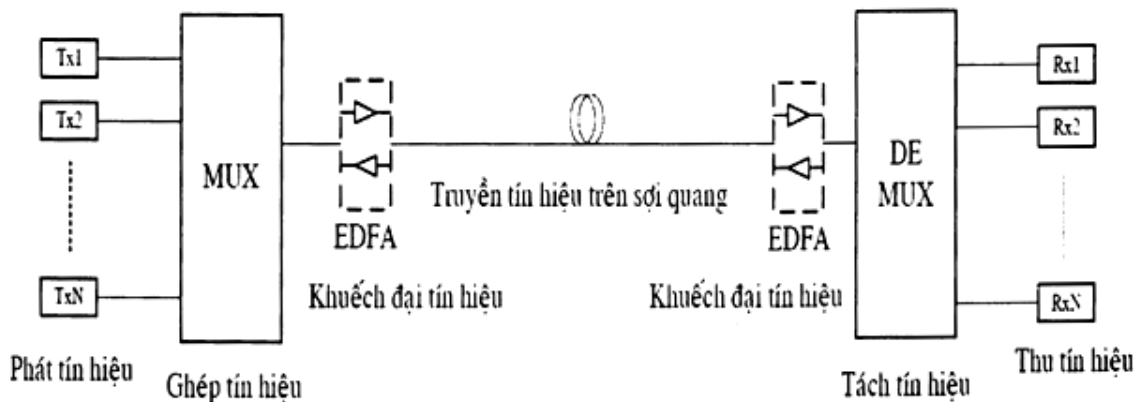
Phát tín hiệu

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

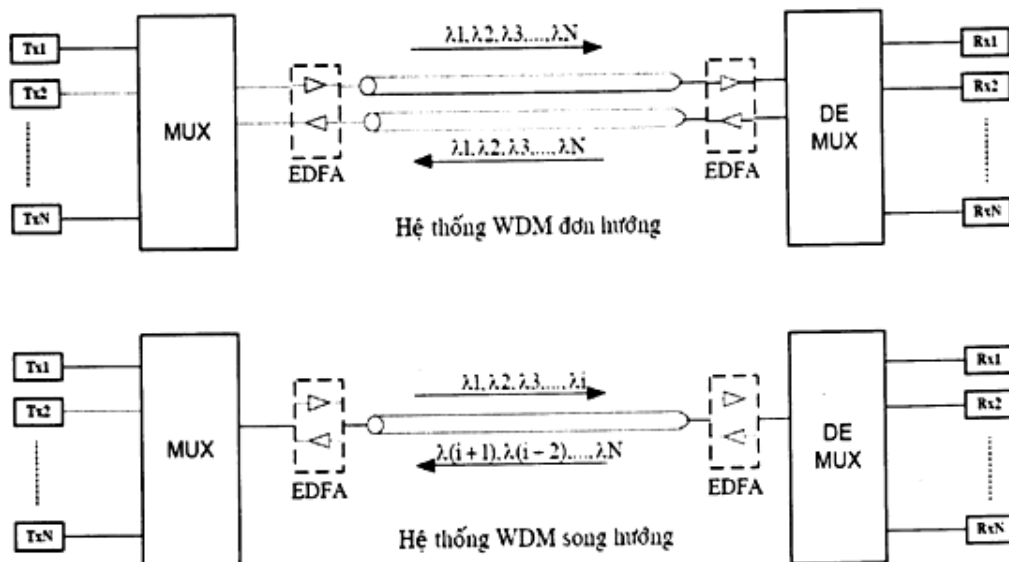
Hệ thống WDM hiện tại chủ yếu sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Tuy nhiên bộ khuếch đại Raman hiện nay cũng đã được sử dụng trên thực tế. Có ba chế độ khuếch đại: khuếch đại công suất, khuếch đại đường và tiền khuếch đại. Khi dùng bộ khuếch đại EDFA cho hệ thống WDM 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 họa 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 $\frac{1}{2}$ 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.

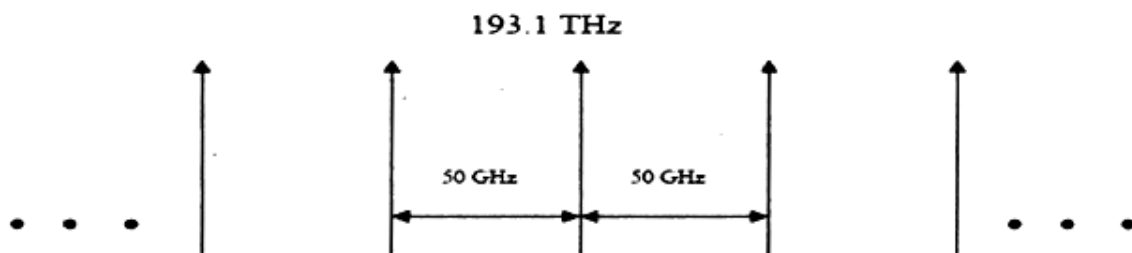
6.4.4. Lưới ITU

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 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 1.55 μ m 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 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 hệ thống WDM

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

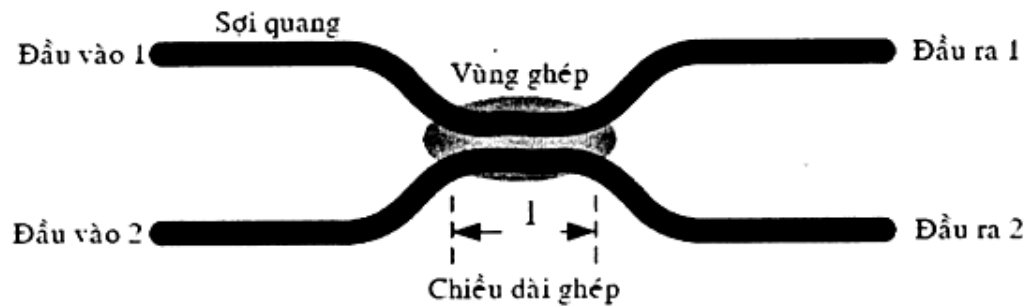
- Các bộ ghép/tách (couplers)
- Bộ phát laser (lasers)
- Bộ tách quang (photodetectors)
- Bộ khuếch đại quang (optical amplifiers)
- Bộ chuyển mạch quang (optical switches)
- Bộ lọc (filters)
- Bộ ghép/tách kênh (multiplexers)

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).

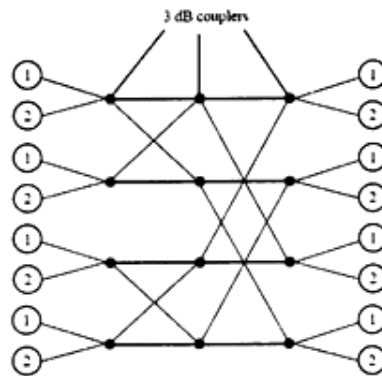
(Coupler thông dụng nhất là coupler FBT (Fused Biconical Taper). Coupler này được chế tạo bằng cách đặt 2 sợi quang cạnh nhau, sau đó vừa nung chảy để chúng kết hợp với nhau vừa kéo giãn ra để tạo thành một vùng ghép (coupling region). Một coupler 2 x 2 đặc trưng bởi tỉ số ghép α ($0 < \alpha < 1$). α là tỉ lệ công suất ánh sáng ngõ vào 1 đến ngõ ra 2 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 1. 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 $\alpha = 1/2$, coupler được dùng để chia công suất tín hiệu ngõ vào thành hai phân 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 một 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:

$$E_{o1}(f) = e^{-i\beta l} \cos(\kappa l) E_{i1}(f)$$

$$E_{o2}(f) = e^{-i\beta l} e^{i(\pi/2)} \sin(\kappa l) E_{i1}(f)$$

Ta nhận xét rằng ở 2 đầu ngõ ra có sự lệch pha $\pi/2$.

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 $\alpha \approx 1$ 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 $n \times n$ ghép n tín hiệu khác nhau vào một sợi quang.

6.5.2. Bộ isolator/circulator

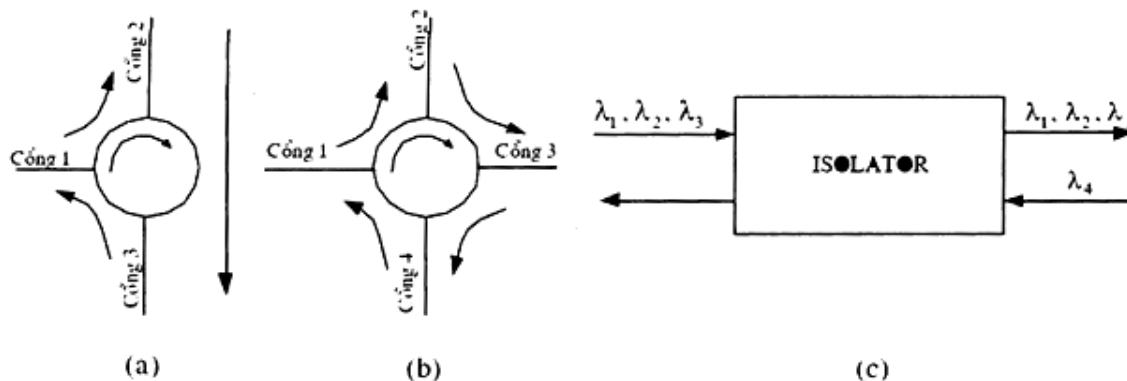
a. Định nghĩa

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.

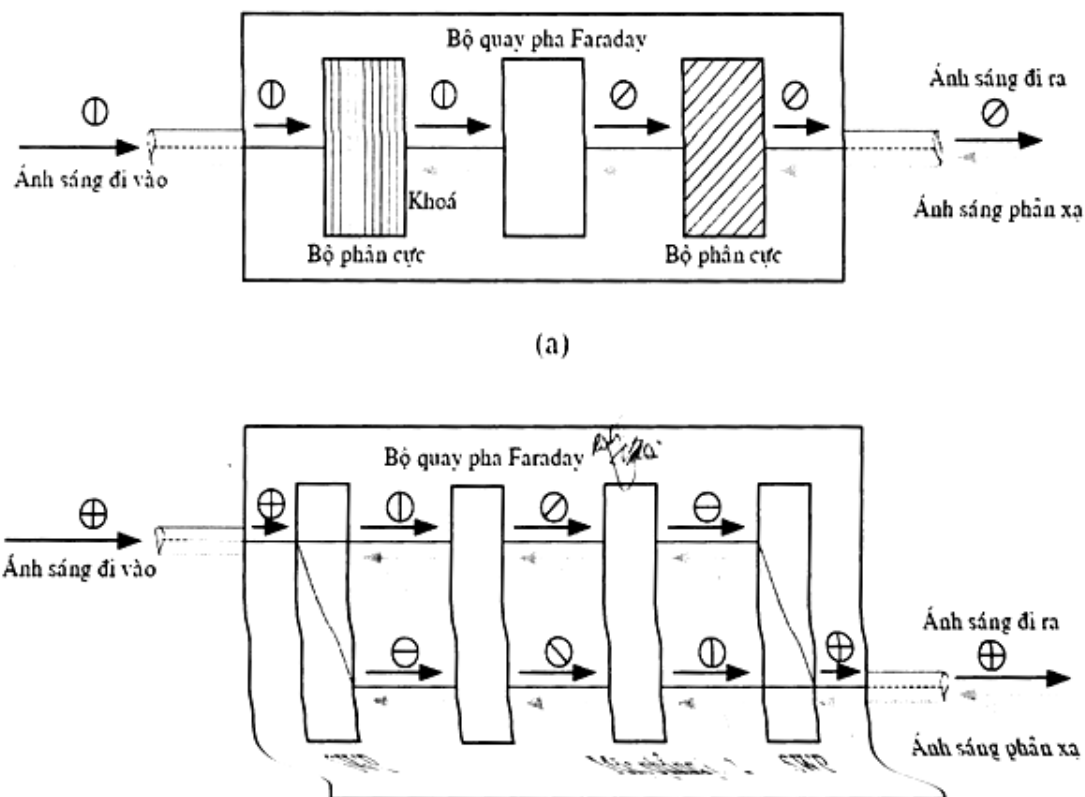
Chương 6: Linh kiện của hệ thống thông tin quang

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.



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



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 họa 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 kỳ 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 họa trên Hình 6.16.

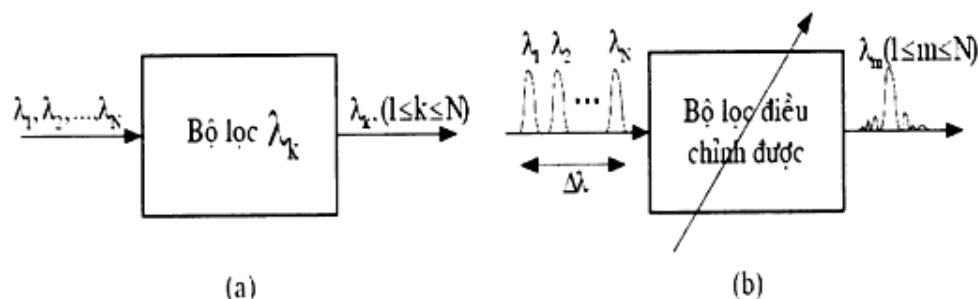
c. Ứng dụng

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 rút quang OADM.

6.5.3. Bộ lọc quang

a. Tổng quan



Hình 6.17. Sơ đồ khối của bộ lọc.

(a) Bộ lọc cố định bước sóng λ_k .

(b) Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng được trong khoảng $\Delta\lambda$.

Định nghĩa

(Bộ lọc là thiết bị chỉ cho phép một kênh bước sóng đi qua, khóa đối với 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 chia bộ lọc làm hai loại: bộ lọc cố định (fixed filter) và bộ lọc điều chỉnh được (tunable filter).

Yêu cầu đối với bộ lọc

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

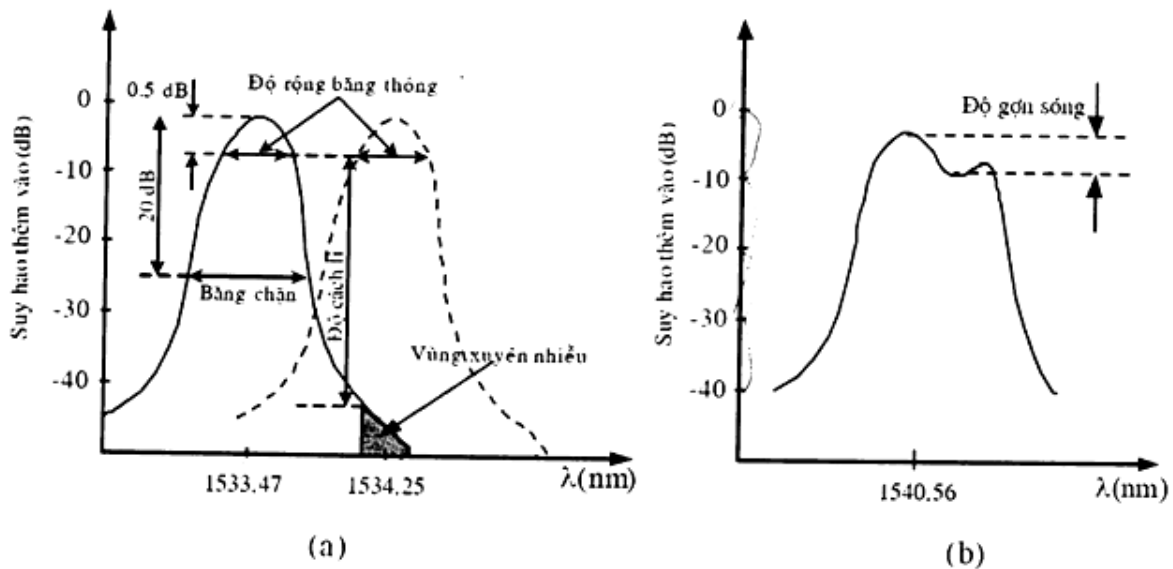
- Bộ lọc tốt phải có giá trị suy hao xen IL thấp. IL : insertion loss
- Bộ lọc phải không phụ thuộc nhiều vào trạng thái phân cực của tín hiệu đưa vào.
- Dải thông hoạt động của bộ lọc phải không nhạy cảm với sự thay đổi nhiệt độ của môi trường.
- Bộ lọc phải đảm bảo trong khoảng nhiệt độ hoạt động (thường là khoảng 0°C), độ dịch dải thông hoạt động phải không vượt quá khoảng cách giữa các kênh bước sóng hoạt động gần nhất.
- Khi ứng dụng ghép nối tiếp nhiều bộ lọc trong hệ thống WDM, băng thông hoạt 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 vòm 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 họa 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.