

TS. Lê Quốc Cường, ThS. Đỗ Văn Việt Em
ThS. Phạm Quốc Hợp, ThS. Nguyễn Huỳnh Minh Tâm

HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG

TẬP
2

EBOOKKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí



NHÀ XUẤT BẢN THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG

HEÄTHÔNG
THÔNG TIN QUANG
Tập 2

**TS. LÊ QUỐC CƯỜNG, THS. ĐỖ VĂN VIỆT EM,
THS. PHẠM QUỐC HỢP, THS. NGUYỄN HUỖNH MINH TÂM**

**HEÄTHÔNG
THÔNG TIN QUANG**
(Tập 2)

EBOOKBKMT.COM
Tài liệu kỹ thuật miễn phí

NHÀ XUẤT BẢN THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG

LÔI GIỚI THIỆU

Thế kỷ 21 là thế kỷ của công nghệ thông tin. Sự bùng nổ của các loại hình dịch vụ thông tin, đặc biệt là sự phát triển nhanh chóng của Internet và World Wide Web làm gia tăng không ngừng nhu cầu về dung lượng mạng. Điều này đòi hỏi phải xây dựng và phát triển các mạng quang mới dung lượng cao. Công nghệ ghép kênh theo bước sóng quang (DWDM) là một giải pháp hoàn hảo cho phép tận dụng hữu hiệu băng thông rộng lớn của sợi quang, nâng cao rõ rệt dung lượng truyền dẫn đồng thời hạ giá thành sản phẩm. Sự phát triển của hệ thống WDM cùng với công nghệ chuyển mạch quang sẽ tạo nên một mạng thông tin thế hệ mới - mạng thông tin toàn quang. Trong mạng toàn quang này, giao thức IP - giao thức chuẩn cho mạng viễn thông thế hệ sau (NGN) sẽ được tích hợp với WDM. Sự tích hợp này sẽ tạo ra một kết cấu mạng trực tiếp nhất, đơn giản nhất, kinh tế nhất, rất thích hợp sử dụng cho cả mạng đường trục và mạng đô thị.

Nhằm đáp ứng nhu cầu học hỏi, nghiên cứu về hệ thống thông tin quang, nhóm tác giả TS. Lê Quốc Cường, ThS. Đỗ Văn Việt Em, ThS. Phạm Quốc Hợp, ThS. Nguyễn Huỳnh Minh Tâm, hiện đang giảng dạy tại Học viện Bưu chính Viễn thông và Công nghệ thông tin – Cơ sở TP. Hồ Chí Minh phối hợp với Nhà xuất bản Thông tin và Truyền thông xuất bản cuốn sách “Hệ thống thông tin quang” – tập 2. Cấu trúc của cuốn sách bao gồm bốn chương:

- *Chương 1: Hệ thống thông tin quang WDM. Chương này trình bày các nguyên lý cơ bản của DWDM, khảo sát chi tiết các hiện tượng phi tuyến ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM, và các linh kiện được sử dụng cho hệ thống WDM.*
- *Chương 2: Khuếch đại quang. Chương này tìm hiểu nguyên lý hoạt động của các loại khuếch đại quang, tính năng và các ứng dụng của chúng trong mạng truyền dẫn quang*
- *Chương 3: Truyền tải IP/WDM. Chương này nghiên cứu về xu hướng tích hợp IP trên WDM, đặc biệt quan tâm đến vấn đề định tuyến và gán bước sóng trong mạng WDM.*
- *Chương 4: Hệ thống thông tin quang Coherent. Chương này tìm hiểu các nguyên lý cơ bản của hệ thống Coherent, những ưu điểm của nó so với hệ thống IM/DD và triển vọng của công nghệ này trong tương lai.*

Cuốn sách được biên soạn nhằm phục vụ cho sinh viên hệ đại học và cao đẳng chuyên ngành Điện tử - Viễn thông của Học viện Công nghệ Bru chính Viễn thông. Ngoài ra cuốn sách cũng có thể sử dụng để làm tài liệu tham khảo cho các kỹ sư công tác trong lĩnh vực Viễn thông.

Do khuôn khổ giới hạn cũng như tính ứng dụng thực tế của tài liệu, các mô hình toán học được trình bày trong cuốn sách này đôi khi chỉ là các kết quả cuối cùng và được giải thích, minh họa bằng các ý nghĩa vật lý cụ thể. Để hiểu thêm về việc dẫn xuất và chứng minh các kết quả này, bạn đọc có thể đọc thêm các tài liệu tham khảo.

Do tính chất phức tạp cũng như sự phát triển nhanh chóng của công nghệ, cuốn sách “Hệ thống thông tin quang” - tập 2 không thể tránh khỏi những thiếu sót. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn tất cả các ý kiến đóng góp của các bạn đọc để hoàn thiện hơn cuốn sách này.

Xin trân trọng giới thiệu cuốn sách cùng bạn đọc./.

Hà Nội, tháng 4 năm 2009

NHÀ XUẤT BẢN THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1: HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG WDM.....	11
GIỚI THIỆU	11
I. NGUYÊN LÝ GHÉP KÊNH THEO BƯỚC SÓNG QUANG (WDM).....	11
1. Giới thiệu chung.....	12
2. Sơ đồ khối tổng quát.....	14
3. Đặc điểm của hệ thống WDM.....	16
4. Lưới ITU.....	17
II. CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN CHẤT LƯỢNG CỦA HỆ THỐNG WDM.....	18
1. Tổng quan về các hiệu ứng phi tuyến.....	18
2. Tán xạ do kích thích Brillouin.....	22
3. Tán xạ do kích thích Raman.....	22
4. Lan truyền trong môi trường phi tuyến.....	24
5. Hiệu ứng tự điều pha SPM.....	25
6. Hiệu ứng điều chế xuyên pha.....	26
7. Hiệu ứng trộn bốn bước sóng.....	26
III. CÁC LINH KIỆN TRONG HỆ THỐNG WDM.....	28
1. Bộ ghép/tách tín hiệu.....	29
2. Bộ isolator/circulator.....	33
3. Bộ lọc quang.....	35
4. Bộ ghép/tách kênh bước sóng.....	35
5. Bộ chuyển mạch quang.....	58
6. Bộ chuyển đổi bước sóng.....	68
IV. MẠNG WDM.....	72
1. Tổng quan.....	72
2. Tô pô vật lý và tô pô logic.....	74
3. Các phân tử mạng (NE) WDM.....	77
4. Bảo vệ mạng WDM.....	94
TÓM TẮT	106

BÀI TẬP.....	108
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	117
CHÖÔNG 2: KHUẾCH NẢÌ QUANG.....	118
I. TỔNG QUAN VỀ KHUẾCH ĐẠÌ QUANG.....	118
1. Giới thiệu khuếch đạì quang.....	118
2. Nguyên lý khuếch đạì quang.....	119
3. Phân loại khuếch đạì quang.....	121
4. Các thông số kỹ thuật của khuếch đạì quang.....	122
5. Ứng dụng của khuếch đạì quang.....	124
II. BỘ KHUẾCH ĐẠÌ QUANG BÁN DẪN (SOA).....	125
1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động.....	125
2. Đặc tính của bộ khuếch đạì FPA và TWA.....	126
3. Nhiễu xuyên âm (Crosstalk) trong SOA.....	129
4. Ưu khuyết điểm và ứng dụng của SOA.....	130
III. BỘ KHUẾCH ĐẠÌ QUANG SỢÌ PHA TRỘN ERBIUM (EDFA).....	131
1. Các cấu trúc EDFA.....	131
2. Lý thuyết khuếch đạì trong EDFA.....	132
3. Yêu cầu đốì với nguồn bơm.....	136
4. Phổ khuếch đạì.....	138
5. Các tính chất của EDFA.....	140
6. Nhiễu trong bộ khuếch đạì.....	143
7. Ưu khuyết điểm của EDFA.....	145
IV. BỘ KHUẾCH ĐẠÌ QUANG RAMAN (RA).....	145
1. Nguyên lý hoạt động.....	145
2. Độ rộng băng tần và hệ số khuếch đạì.....	147
3. Ưu khuyết điểm của khuếch đạì Raman.....	148
V. TÍCH LŨY NHIỄU TRONG HỆ THÖNG THÖNG TIN QUANG CỰ LY DÀI.....	149
CÂU HỎÌ ÖN TẬP.....	150
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	154
CHÖÔNG 3: TRUYỀN TẢI IP/WDM.....	155
I. GIÖI THIỆU CHUNG.....	155

1. Xu hướng tích hợp IP qua WDM.....	155
2. Cấu trúc mạng IP/WDM.....	156
3. Các mô hình liên mạng IP/WDM.....	157
II. IP VÀ GIAO THỨC ĐỊNH TUYẾN	159
1. IPv4 và IPv6	159
2. Các giao thức định tuyến IP.....	160
III. MPLS, GMPLS và MPλS	163
1. MPLS.....	163
2. GMPLS và MPλS.....	164
IV. ĐỊNH TUYẾN MẠNG IP/WDM	164
1. Định tuyến và gán bước sóng tĩnh trong IP/WDM	164
2. Định tuyến và gán bước sóng động trong IP/WDM (D-RWA).....	172
3. Dành bước sóng (WR) trong IP/WDM.....	188
V. ĐIỀU KHIỂN TRONG MẠNG IP/WDM.....	191
1. Cơ chế điều khiển tập trung.....	191
2. Cơ chế điều khiển phân bố	192
VI. THIẾT KẾ TỐI ƯU TẬP Ô LOGIC QUANG.....	192
1. Khái niệm tập ô mạng	192
2. Tóm tắt bài toán thiết kế tập ô logic	193
3. Định tuyến cho lưu lượng trên tập ô logic.....	195
4. Định tuyến cho các đường quang trên tập ô vật lý.....	195
CÂU HỎI ÔN TẬP	196
TÀI LIỆU THAM KHẢO	199
CHƯƠNG 4: HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG COHERENT.....	201
I. GIỚI THIỆU CHUNG	201
1. Khái niệm về thông tin quang Coherent.....	201
2. Cấu trúc cơ bản của hệ thống thông tin quang Coherent.	202
3. Các dạng điều chế quang Coherent.....	203
II. MÁY THU QUANG COHERENT	208
1. Các nguyên lý tách sóng:.....	208
2. Sơ đồ khối tổng quát của bộ thu quang Coherent.....	210
3. Tách sóng Heterodyne đồng bộ.....	211

4. Tách sóng Heterodyne không đồng bộ.....	213
5. Tách sóng Homodyne.....	213
6. Vòng khoá pha trong máy thu quang Coherent.....	214
III. TỈ SỐ LỖI BIT (BER) TRONG HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG COHERENT	215
1. Nhiễu trong máy thu quang Coherent.....	215
2. Tách sóng heterodyne ASK.....	217
3. Tách sóng heterodyne FSK.....	220
4. Tách sóng heterodyne PSK.....	221
5. Tách sóng Homodyne ASK và PSK.....	222
6. Hàm xác suất lỗi.....	223
7. So sánh độ nhạy của các hệ thống Coherent.....	227
IV. CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐỘ NHẠY MÁY THU	232
1. Nhiễu pha.....	232
2. Nhiễu cường độ	233
3. Không tương xứng về phân cực.....	234
4. Tán sắc trong sợi quang	234
5. Các yếu tố hạn chế khác	234
V. NHỮNG ƯU ĐIỂM CỦA HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG COHERENT	235
1. Nâng cao độ nhạy thu	235
2. Nâng cao khả năng truyền dẫn.....	236
3. Khả năng kết hợp thu Coherent với kỹ thuật khuếch đại quang	236
TÓM TẮT	236
CÂU HỎI ÔN TẬP VÀ BÀI TẬP	238
TÀI LIỆU THAM KHẢO	242
ÁP DỤNG VÀ GỒM YẾU TỐ LỖI MỘT SỐ CÂU HỎI ÔN TẬP VÀ BÀI TẬP	243
CÁC CHỖ VIẾT TẮT	245

CHƯƠNG 1

HEÌ THỐNG THÔNG TIN QUANG WDM

GIỚI THIỆU

Bước vào thiên niên kỷ mới, chúng ta chứng kiến nhiều sự thay đổi quan trọng trong nền công nghiệp viễn thông có ảnh hưởng to lớn đến cuộc sống của chúng ta. Có nhiều nguyên nhân gây ra sự thay đổi này:

- Trước hết đó là sự gia tăng liên tục về dung lượng mạng. Nhân tố chính cho sự gia tăng này là sự phát triển nhanh chóng của Internet và World Wide Web. Bên cạnh đó là việc các nhà kinh doanh ngày nay dựa vào các mạng tốc độ cao để thực hiện việc kinh doanh của mình. Những mạng này được dùng để kết nối các văn phòng trong một công ty cũng như giữa các công ty cho việc giao dịch thương mại. Ngoài ra còn có một sự tương quan lớn giữa việc gia tăng nhu cầu và giá thành băng thông của mạng. Các công nghệ tiên tiến đã thành công trong việc giảm liên tục giá thành của băng thông. Việc giảm giá thành của băng thông này lại làm thúc đẩy sự phát triển của nhiều ứng dụng mới sử dụng nhiều băng thông và mô hình sử dụng hiệu quả hơn. Chu kỳ hồi tiếp dương này cho thấy không có dấu hiệu giảm bớt trong một tương lai gần.
- Bãi bỏ và phá vỡ sự độc quyền trong lĩnh vực viễn thông. Sự bãi bỏ độc quyền này đã kích thích sự cạnh tranh trong thị trường, điều này dẫn đến kết quả là giảm giá thành cho những người sử dụng và triển khai nhanh hơn những kỹ thuật và dịch vụ mới.
- Sự thay đổi quan trọng trong thể loại lưu lượng chiếm ưu thế trong mạng. Ngược lại với lưu lượng thoại truyền thống, nhiều nhu cầu mới dựa trên dữ liệu ngày càng phát triển. Tuy nhiên nhiều mạng hiện nay đã được xây dựng chỉ để hỗ trợ hiệu quả cho lưu lượng thoại, không phải là dữ liệu. Việc thay đổi này là nguyên nhân thúc đẩy những nhà cung cấp dịch vụ kiểm tra lại cách thức mà họ xây dựng nên mạng, kiểu dịch vụ phân phối và trong nhiều trường hợp ngay cả mô hình kinh doanh toàn thể của họ.

Những nhân tố này đã dẫn đến sự phát triển của mạng quang dung lượng cao. Công nghệ để đáp ứng việc xây dựng các mạng quang dung lượng cao này là công

nghe ghép kênh theo bước sóng DWDM. Trong chương này chúng ta sẽ tìm hiểu về hệ thống thông tin quang WDM, cụ thể sẽ nghiên cứu:

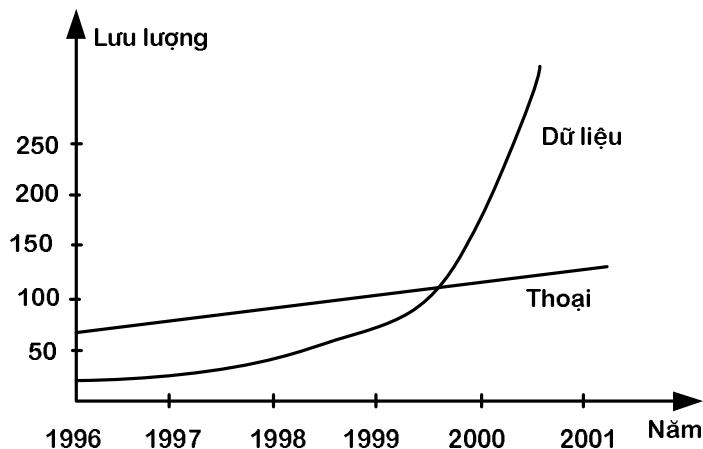
- Nguyên lý ghép kênh phân chia theo bước sóng quang (WDM).
- Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM do sự lan truyền của tín hiệu WDM trong sợi quang, trong đó tập trung vào việc tìm hiểu các hiệu ứng phi tuyến.
- Các linh kiện, phần tử trong mạng WDM.
- Mô hình mạng WDM bao gồm các phần tử mạng, tô pô vật lý, tô pô logic và các kỹ thuật chuyển mạch bảo vệ.

I. NGUYÊN LÝ GHÉP KÊNH THEO BƯỚC SÓNG QUANG (WDM)

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 (xem hình 1.1). 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 1.1 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:

- **Truyền dẫn ghép kênh phân chia theo không gian SDM (Space Division 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 tăng vọt do mỗi hệ thống lắp thêm đều cần một số lượng bộ lặp, bộ khuếch đại... như hệ thống cũ.
- **Truyền dẫn ghép kênh phân chia theo thời gian TDM (Time Division 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.
- **Truyền dẫn ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM (Wavelength Division 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. 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.

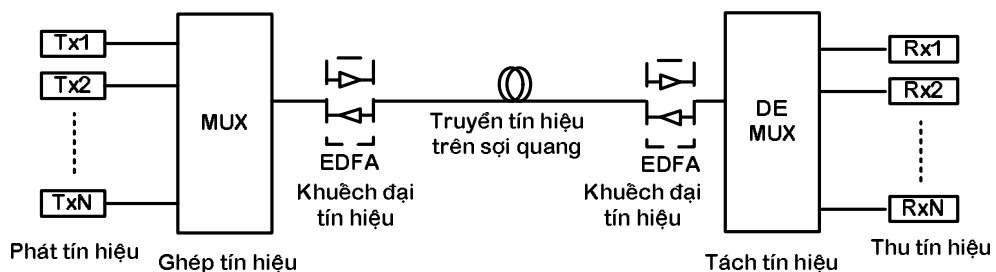
Băng sóng	Mô tả	Phạm vi bước sóng (nm)
Băng O	Gốc (Original)	1260 - 1360
Băng E	Mở rộng (Extended)	1360 - 1460
Băng S	Ngắn (Short)	1460 - 1530
Băng C	Quy ước (Conventional)	1530 - 1565
Băng L	Dài (Long)	1565 - 1625
Băng U	Siêu dài (Ultra-long)	1625 - 1675

2. Sơ đồ khối tổng quát

a) Định nghĩa

Ghép kênh phân chia 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

Hình 1.2 Sơ đồ chức năng hệ thống WDM.

Như minh họa trên hình 1.2, để đảm bảo việc truyền nhận nhiều bước sóng trên một sợi quang, hệ thống WDM phải thực hiện các chức năng sau:

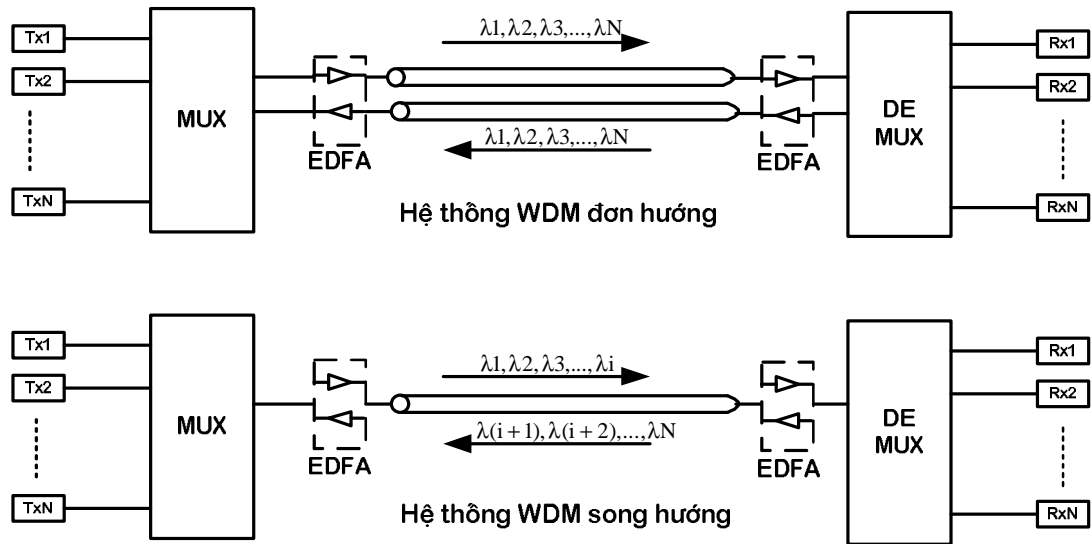
- Phát tín hiệu: Trong hệ thống WDM, nguồn phát quang được dùng là laser. Hiện tại đã có một số loại nguồn phát như: laser điều chỉnh được bước sóng (Tunable Laser), laser đa bước sóng (Multiwavelength Laser)... Yêu cầu đối với nguồn phát laser là phải có độ rộng phổ hẹp, bước sóng phát ra ổn định, mức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

- 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...
- 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...) mà ta sẽ xét cụ thể trong phần II. *Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM.*
- 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

Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng như minh họa trên hình 1.3. 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:

Hình 1.3 Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng

- 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.

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:

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...

Nhược điểm của công nghệ WDM

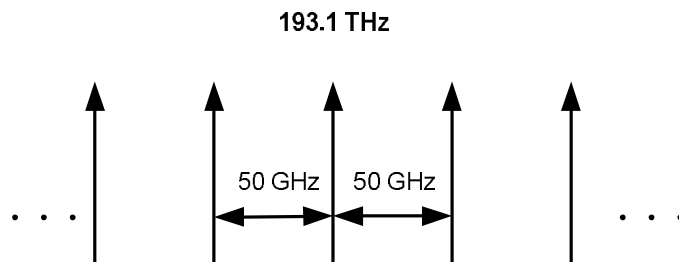
- Vẫn chưa khai thác hết băng tần hoạt động có thể của sợi quang (chỉ mới tận dụng được băng C và băng L).
- Quá trình khai thác, bảo dưỡng phức tạp hơn gấp nhiều lần.
- Nếu hệ thống sợi quang đang sử dụng là sợi DSF theo chuẩn G.653 thì rất khó triển khai WDM vì xuất hiện hiện tượng trộn bốn bước sóng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

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 1.55µm 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.

Hình 1.4 Lưới bước sóng theo ITU.



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.

II. 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. Ví dụ:

- 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.

Hiện tượng suy hao và tán sắc đã được trình bày chi tiết trong “Hệ thống thông tin quang” - Tập 1. Trong phần này sẽ tập trung trình bày về các hiện tượng phi tuyến.

1. Tổng quan về các hiệu ứng phi tuyến

a) Định nghĩa

Hiệu ứng quang được gọi là phi tuyến nếu các tham số của nó phụ thuộc vào cường độ ánh sáng (công suất). Các hiện tượng phi tuyến có thể bỏ qua đối với các hệ thống thông tin quang hoạt động ở mức công suất vừa phải (vài mW) với tốc độ bit lên đến 2.5 Gbps. Tuy nhiên, ở tốc độ bit cao hơn như 10 Gbps và cao hơn và/hay ở mức công suất truyền dẫn lớn, việc xét các hiệu ứng phi tuyến là rất quan trọng. Trong các hệ thống WDM, các hiệu ứng phi tuyến có thể trở nên quan trọng thậm chí ở công suất và tốc độ bit vừa phải.

Các hiệu ứng phi tuyến có thể chia ra làm 2 loại. Loại thứ nhất phát sinh do tác động qua lại giữa các sóng ánh sáng với các phonon (rung động phân tử) trong môi trường silica- một trong nhiều loại hiệu ứng tán xạ mà chúng ta đã xem xét là tán xạ Rayleigh. Hai hiệu ứng chính trong loại này là tán xạ do kích thích Brillouin (SBS) và tán xạ do kích thích Raman (SRS).

Loại thứ hai sinh ra do sự phụ thuộc của chiết suất vào cường độ điện trường hoạt động, tỉ lệ với bình phương biên độ điện trường. Các hiệu ứng phi tuyến quan trọng trong loại này là hiệu ứng tự điều pha (SPM - Self-Phase Modulation), hiệu ứng điều chế xuyên pha (CPM - Cross-Phase Modulation) và hiệu ứng trộn 4 bước sóng (FWM - Four-Wave Mixing). Loại hiệu ứng này được gọi là hiệu ứng Kerr.

Trong các hiệu ứng tán xạ phi tuyến, năng lượng từ một sóng ánh sáng được chuyển sang một sóng ánh sáng khác có bước sóng dài hơn (hoặc năng lượng thấp hơn). Năng lượng mất đi bị hấp thụ bởi các dao động phân tử hoặc các phonon (loại phonon liên quan đến sự khác nhau giữa SBS và SRS). Sóng thứ hai được gọi là sóng Stokes. Sóng thứ nhất có thể gọi là sóng bơm (Pump) gây ra sự khuếch đại sóng Stokes. Khi sóng bơm truyền trong sợi quang, nó bị mất năng lượng và sóng Stokes nhận thêm năng lượng. Trong trường hợp SBS, sóng bơm là sóng tín hiệu và sóng Stokes là sóng không mong muốn được tạo ra do quá trình tán xạ. Trong trường hợp SRS, sóng bơm là sóng có năng lượng cao và sóng Stokes là sóng tín hiệu được khuếch đại từ sóng bơm.

Nói chung, các hiệu ứng tán xạ được đặc trưng bởi hệ số độ lợi g , được đo bằng m/w (meters per watt) và độ rộng phổ Δf (đối với độ lợi tương ứng) và công suất ngưỡng P_{th} của ánh sáng tới - mức công suất mà tại đó suy hao do tán xạ là 3 dB, tức là một nửa công suất trên toàn bộ độ dài sợi quang. Hệ số độ lợi là một đại lượng chỉ cường độ của hiệu ứng phi tuyến.

Trong trường hợp tự điều pha SPM, các xung truyền bị hiện tượng chirp (tần số xung truyền đi thay đổi theo thời gian). Điều này làm cho hệ số chirp (chirped factor) trở nên đáng kể ở các mức năng lượng cao. Sự có mặt của hiện tượng chirp làm cho hiệu ứng giãn xung do tán sắc màu tăng lên. Do vậy, chirp xảy ra do SPM (SPM induced chirp) có thể gây tăng độ giãn xung do tán sắc màu trong hệ thống. Đối với các hệ thống tốc độ bit cao, chirp do SPM có thể làm tăng một cách đáng kể độ giãn xung do tán sắc màu thậm chí ở các mức công suất vừa phải. Ảnh hưởng của SPM không chỉ phụ thuộc vào dấu tham số GVD (Group Velocity Dispersion) mà còn phụ thuộc vào chiều dài của hệ thống.

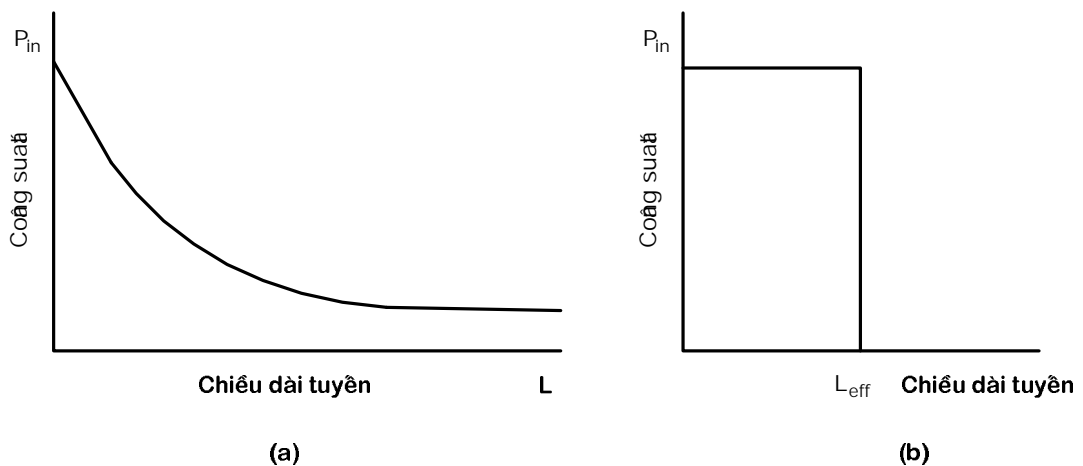
Trong hệ thống WDM đa kênh, chirp xảy ra trong một kênh phụ thuộc vào sự thay đổi chiết suất theo cường độ của các kênh khác. Hiệu ứng này được gọi là hiệu ứng điều chế xuyên pha (CPM - Cross-Phase Modulation). Khi xem xét hiện tượng chirp trong một kênh do sự thay đổi chiết suất theo cường độ của chính kênh đó, ta gọi hiệu ứng này là SPM.

Trong các hệ thống WDM, một hiệu ứng quan trọng khác đó là hiệu ứng trộn bốn bước sóng. Nếu hệ thống WDM bao gồm các tần số f_1, f_2, \dots, f_n , hiệu ứng trộn bốn bước sóng sinh ra các tín hiệu tại các tần số như là $2f_i - f_j$ và $f_i + f_j - f_k$. Các tín hiệu mới này gây ra xuyên kênh (crosstalk) với các tín hiệu có sẵn trong hệ thống. Xuyên kênh này ảnh hưởng đặc biệt nghiêm trọng khi khoảng cách giữa các kênh hẹp. Việc giảm tán sắc màu làm tăng xuyên kênh gây ra bởi hiệu ứng trộn bốn bước sóng. Vì vậy, hệ thống sử dụng sợi quang dịch chuyển tán sắc chịu ảnh hưởng của hiệu ứng trộn bốn bước sóng nhiều hơn là hệ thống sử dụng sợi đơn một.

b) Chiều dài và diện tích hiệu dụng

Sự tác động phi tuyến phụ thuộc vào cự ly truyền dẫn và mặt cắt ngang của sợi quang. Tuyến càng dài, sự tác động qua lại giữa ánh sáng và vật liệu sợi quang càng lớn và ảnh hưởng của phi tuyến càng xấu. Tuy nhiên, khi tín hiệu lan truyền trong sợi quang, công suất của tín hiệu giảm đi do suy hao của sợi quang. Vì vậy, hầu hết các hiệu ứng phi tuyến xảy ra ngay trong khoảng đầu của sợi quang và giảm đi khi tín hiệu lan truyền.

Hình 1.5 Tính chiều dài truyền dẫn hiệu dụng. (a) Phân bố công suất đặc trưng dọc theo chiều dài L của tuyến. Công suất đỉnh là P_{in} . (b) Phân bố công suất giả định dọc theo tuyến đến độ dài hiệu dụng L_{eff} . Chiều dài L_{eff} được chọn sao cho diện tích của vùng dưới đường cong trong (a) bằng diện tích của hình vuông trong (b).



Mô hình của ảnh hưởng này có thể rất phức tạp. Trong thực tế, có thể sử dụng một mô hình đơn giản với giả thuyết năng lượng không thay đổi qua một độ dài hiệu dụng cố định L_{eff} . Giả sử P_{in} là công suất truyền trong sợi quang và $P(z) = P_{in}e^{-\alpha z}$ là công suất tại điểm z trên tuyến, với α là hệ số suy hao. L được kí hiệu là chiều dài thực của tuyến. Chiều dài hiệu dụng của tuyến được kí hiệu là L_{eff} được định nghĩa như sau [1]:

$$P_{in} L_{eff} = \int_{z=0}^L P(z) dz \tag{1.1}$$

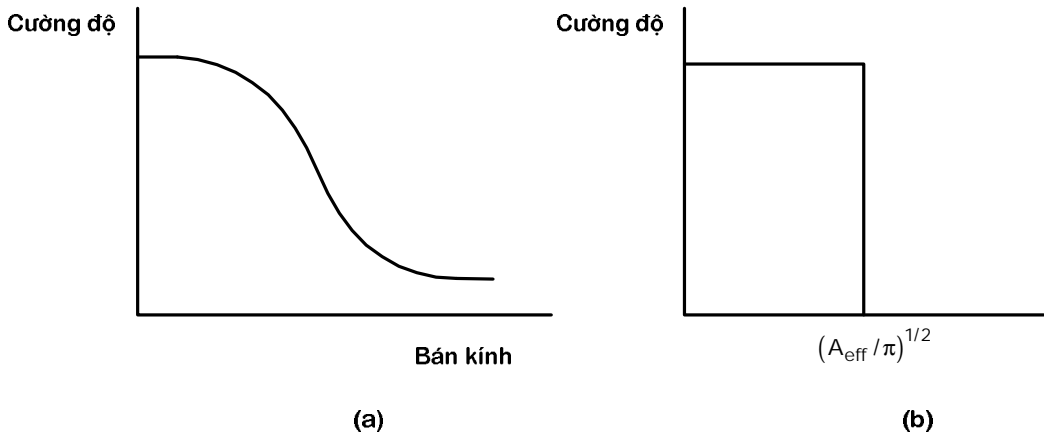
Do đó:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \tag{1.2}$$

Thường thì tuyến đủ dài do đó $L \gg 1/\alpha$ cho nên $L_{eff} \approx 1/\alpha$. Chẳng hạn như $\alpha = 0.22$ dB/km tại $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ và, ta có $L_{eff} \sim 20$ km.

Ảnh hưởng của phi tuyến cũng tăng theo cường độ năng lượng trong sợi. Với một công suất cho trước, cường độ tỉ lệ nghịch với diện tích lõi. Do năng lượng phân bố không đồng đều theo mặt cắt ngang của sợi, do đó để thuận tiện khái niệm diện tích vùng lõi hiệu dụng A_{eff} (effective cross-sectional area) thường được sử dụng (xem hình 1.6). Diện tích này liên quan đến diện tích thực của lõi A và phân bố trên mặt cắt ngang của mode cơ bản $F(r, \theta)$ như sau [1]:

Hình 1.6 Diện tích mặt cắt ngang hiệu dụng. (a) Phân bố đặc trưng cường độ tín hiệu dọc theo bán kính của sợi quang. (b) Phân bố cường độ giả định tương đương với (a) cho thấy cường độ khác không chỉ trong vùng A_{eff} xung quang tâm sợi quang.



$$A_{eff} = \frac{\left[\int \int_q |F(r, q)|^2 r dr dq \right]^2}{\int \int_q |F(r, q)|^4 r dr dq} \tag{1.3}$$

với r và θ là tọa độ cực.

Thường có thể đánh giá giá trị A_{eff} thông qua công thức đơn giản hơn [2]

$$A_{eff} \approx \pi w_0^2 \tag{1.4}$$

Với w_0 là bán kính trường mốt.

Diện tích hiệu dụng như được định nghĩa ở trên có một ý nghĩa là sự phụ thuộc của hầu hết các hiệu ứng phi tuyến có thể được biểu diễn bằng diện tích hiệu dụng đối với mode cơ bản truyền trong sợi quang cho trước. Chẳng hạn như cường độ hiệu dụng của một xung có thể được tính $I_{\text{eff}} = P/A_{\text{eff}}$, với P là công suất xung, để tính toán ảnh hưởng của các hiệu ứng phi tuyến như SPM được xem xét dưới đây. Diện tích hiệu dụng của SMF khoảng $85 \mu\text{m}^2$ và của DSF khoảng $50 \mu\text{m}^2$. Các sợi quang bù tán sắc có diện tích hiệu dụng nhỏ hơn và do đó có ảnh hưởng phi tuyến lớn hơn.

2. Tán xạ do kích thích Brillouin

Trong trường hợp SBS, các phonon liên quan đến sự tác động tán xạ là các phonon âm học và sự tương tác này xảy ra trên dải tần hẹp $\Delta f = 20$ MHz ở bước sóng 1550 nm. Sóng bơm và sóng Stokes truyền theo hai hướng ngược nhau. Do đó, SBS không gây ra bất kỳ tác động qua lại nào giữa các bước sóng khác nhau khi mà khoảng cách bước sóng lớn hơn 20 MHz (là trường hợp đặc trưng cho WDM). Tuy nhiên, SBS cũng có thể tạo nên méo khá quan trọng trong một kênh đơn lẻ. SBS tạo ra độ lợi theo hướng ngược lại với hướng lan truyền tín hiệu, nói cách khác là hướng về phía nguồn. Vì vậy, nó làm suy giảm tín hiệu được truyền cũng như tạo ra một tín hiệu có cường độ mạnh về hướng phát, nên phải dùng một bộ cách ly để bảo vệ. Hệ số độ lợi SBS g_B xấp xỉ 4×10^{-11} m/W, không phụ thuộc vào bước sóng.

Công suất ngưỡng cho SBS có thể tính bằng công thức sau [2]:

$$P_{\text{thSBS}} = 21A_{\text{eff}}/g_B L_{\text{eff}} \quad (1.5)$$

Với g_B là độ lợi của SBS. Như đã nói trong mục (2.3.1) $L_{\text{eff}} \approx 1/\alpha$ nên:

$$P_{\text{thSBS}} = (21\alpha A_{\text{eff}})/g_B \quad (1.6)$$

Giá trị đặc trưng của $g_B \approx 5 \times 10^{-11}$ m/W tại $\lambda = 1550$ nm. Lấy $\alpha = 0.046$, 1/km = 0.2dB/Km và $A_{\text{eff}} = 55 \mu\text{m}^2$, tính được $P_{\text{thSBS}} = 8$ mW cho một kênh.

Một cách khác để tính công suất ngưỡng này là [3]:

$$P_{\text{thSBS}} = 4.4 \times 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha \Delta f \text{ W} \quad (1.7)$$

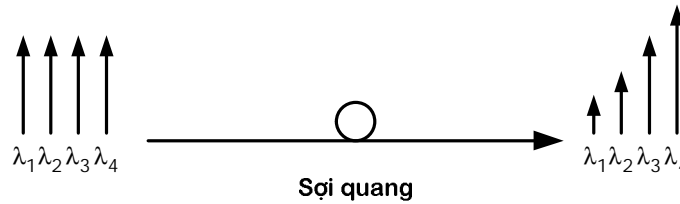
- Với
- d : đường kính lõi sợi quang (μm);
 - λ : bước sóng hoạt động (μm);
 - α : hệ số suy hao (dB/Km);
 - Δf : độ rộng phổ của nguồn quang (GHz).

3. Tán xạ do kích thích Raman

Nếu đưa vào trong sợi quang hai hay nhiều tín hiệu có bước sóng khác nhau thì SRS gây ra sự chuyển năng lượng từ các kênh có bước sóng thấp sang các kênh có bước sóng cao hơn (xem hình 1.7). Sự chuyển năng lượng từ kênh tín hiệu có

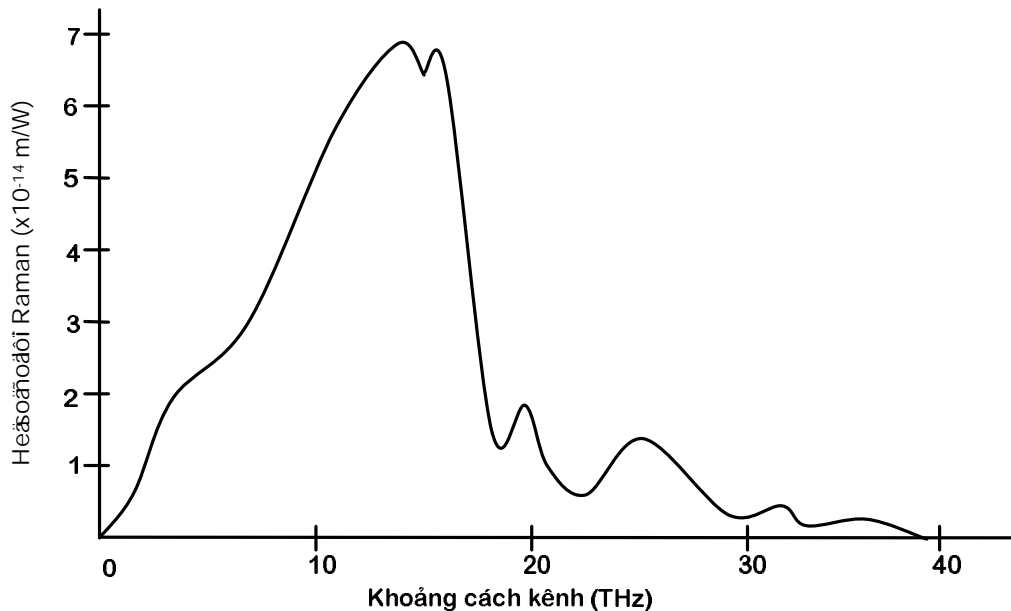
bước sóng thấp sang kênh tín hiệu có bước sóng cao là một hiệu ứng cơ bản làm cơ sở cho khuếch đại quang và laser. Năng lượng của photon ở bước sóng λ là hc/λ với h là hằng số Planck (6.63×10^{-34} Js). Do đó, photon của bước sóng thấp có năng lượng cao hơn. Sự chuyển năng lượng từ tín hiệu bước sóng thấp sang tín hiệu bước sóng cao tương ứng với việc sinh ra các photon năng lượng thấp từ các photon năng lượng cao hơn.

Hình 1.7 Ảnh hưởng của SRS. Năng lượng từ kênh bước sóng thấp được chuyển sang kênh bước sóng cao hơn.



Không giống như SBS, SRS là một hiệu ứng băng rộng. Hình 1.8 cho thấy độ lợi là một hàm của khoảng cách bước sóng. Giá trị đỉnh của hệ số độ lợi g_R xấp xỉ 6×10^{-14} m/W ở bước sóng 1550 nm nhỏ hơn nhiều so với độ lợi của SBS. Tuy nhiên, các kênh cách nhau đến 15 THz (125 nm) sẽ bị tác động của SRS. SRS gây ảnh hưởng trên cả hướng truyền và hướng ngược lại. Mặc SRS giữa các kênh trong hệ thống WDM ảnh hưởng xấu cho hệ thống, SRS có thể được dùng để khuếch đại hệ thống.

Hình 1.8 Hệ số độ lợi SRS là hàm của khoảng cách kênh.



Công suất ngưỡng cho SRS có thể tính bằng công thức sau [2]:

$$P_{\text{thSRS}} = 16A_{\text{eff}}/g_R L_{\text{eff}} = (16\alpha A_{\text{eff}})/g_R \quad (1.8)$$

Giá trị đặc trưng của $g_R \approx 1 \times 10^{-13}$ m/W tại $\lambda = 1550$ nm. Lấy $\alpha = 0.046$, 1/km = 0.2dB/Km và $A_{\text{eff}} = 55 \mu\text{m}^2$, tính được $P_{\text{thSRS}} = 405$ mW cho một kênh. Con số này cho thấy có thể bỏ qua SRS trong hệ thống đơn kênh.

Một cách khác để tính công suất ngưỡng này là [3]:

$$P_{\text{thSRS}} = 5.9 \times 10^{-2} d^2 \lambda \alpha W \quad (1.9)$$

Với:

- d: đường kính lõi sợi quang (μm).
- λ : bước sóng hoạt động (μm).
- α : hệ số suy hao (dB/Km).

4. Lan truyền trong môi trường phi tuyến

Theo [1,2] đối với môi trường tuyến tính, vector phân cực P có mối liên hệ với điện trường tác động E như sau:

$$P(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \chi_e(\mathbf{r}, t) E(\mathbf{r}, t) \quad (1.10)$$

Với χ_e là độ cảm điện (electric susceptibility). Mối liên hệ giữa χ_e với chiết suất của môi trường n có thể biểu diễn bằng:

$$n = \sqrt{1 + \chi_e} \quad (1.11)$$

Các hiệu ứng khúc xạ phi tuyến xảy ra là do sự phụ thuộc của độ cảm điện vào cường độ điện trường E. Trong sợi quang, các hiện tượng phi tuyến có thể xem xét thông qua biểu thức gần đúng sau:

$$P(\mathbf{r}, t) = P_L(\mathbf{r}, t) + P_{\text{NL}}(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \chi_e(\mathbf{r}, t) E(\mathbf{r}, t) + \epsilon_0 \chi_e^{(3)} E^3(\mathbf{r}, t) \quad (1.12)$$

Số hạng thứ nhất trong công thức (1.12) là phân cực điện môi tuyến tính, còn số hạng thứ hai là phân cực điện môi phi tuyến.

Chiết suất khúc xạ của môi trường sẽ là:

$$n(\omega, E) = n_L(\omega) + n_{\text{NL}} E^2 \quad (1.13)$$

Với ω là tần số góc của ánh sáng. Số hạng thứ nhất trong công thức (1.13) là chiết suất tuyến tính và là nguyên nhân gây ra tán sắc vật liệu. Số hạng thứ hai thể hiện hiệu ứng phi tuyến bởi vì nó tỉ lệ với cường độ ánh sáng $I = 0.5 \epsilon_0 c n E^2$. Hệ số khúc xạ phi tuyến:

$$n_{\text{NL}} = 3/8 n \chi_e^{(3)} \quad (1.14)$$

Có thể biểu diễn sự khúc xạ phi tuyến theo một cách khác:

$$n = n_L(\omega) + n_{\text{NL}}(P/A_{\text{eff}}) \quad (1.15)$$

Với P là công suất ánh sáng. Đối với sợi quang silica, thường $n_{NL} = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ và $A_{\text{eff}} \approx 55 \mu\text{m}^2$. Giả sử $P = 1 \text{ mW}$ thì $n_{NL}(P/A_{\text{eff}}) = 5.8 \times 10^{-9}$. Đây là phần phi tuyến của chiết suất trong điều kiện bình thường. Chiết suất của silica vào khoảng 1,45 cho nên rõ ràng trong trường hợp này các hiệu ứng phi tuyến có thể bỏ qua.

Hằng số lan truyền pha $\beta = \omega n/c$ cũng phải phụ thuộc vào E^2 . Sự phụ thuộc này có thể biểu diễn như sau:

$$\beta = \omega n_L/c + (3\omega/8cn)\chi_c^{(3)}E^2 \quad (1.16)$$

Có thể biểu diễn hằng số pha phi tuyến theo một cách khác:

$$\beta = \beta_L + \gamma_{NL}P \quad (1.17)$$

Với β_L là thành phần tuyến tính của hằng số lan truyền pha và $g_{NL} = (2p/\lambda)n_{NL}/A_{\text{eff}}$ là hệ số lan truyền pha phi tuyến. Giả sử $n_{NL} = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $A_{\text{eff}} = 55 \mu\text{m}^2$ và $\lambda = 1550 \text{ nm}$, khi đó $g_{NL} = 2.35 \times 10^{-3} \text{ 1/m.W}$. Lại giả sử $P = 1 \text{ mW}$, phần phi tuyến trong hằng số lan truyền pha vào khoảng 10^{-6} . Lưu ý $g_{NL}P = (2p/\lambda)n_{NL}(P/A_{\text{eff}})$ vì vậy:

$$\beta = \beta_L + (2\pi/\lambda)n_{NL}(P/A_{\text{eff}}) \quad (1.18)$$

5. Hiệu ứng tự điều pha SPM

Xét một hệ thống đơn kênh, ánh sáng như là sóng EM có dạng (chỉ xét phần thực):

$$E(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z)$$

β được tính theo công thức (1.16) nên sẽ có độ dịch pha bổ sung. Độ dịch pha này được tính bằng:

$$\Phi = \int_0^L (\beta - \beta_L) dz = \int_0^L \gamma_{NL} P(z) dz = \gamma_{NL} P_{\text{in}} L_{\text{eff}} \quad (1.19)$$

Có thể biểu diễn sự phụ thuộc này theo một cách khác:

$$\Phi = (3\omega/8cn)\chi_c^{(3)}E^2 L_{\text{eff}} \quad (1.20)$$

Dựa vào công thức (1.19) và (1.20) có thể giải thích cơ chế SPM như sau: Độ dịch pha phi tuyến Φ của sóng mang quang thay đổi theo thời gian là do cường độ (công suất) của xung ánh sáng thay đổi theo thời gian. Sự thay đổi này là do thay đổi của công suất đầu vào $P_{\text{in}}(t)$ và/hoặc sự biến thiên theo thời gian của biên độ xung khi xung lan truyền dọc theo sợi quang. Do đó Φ trở thành một hàm số theo thời gian $\Phi(t)$. Theo định nghĩa đạo hàm của độ dịch pha $d\Phi(t)/dt \neq 0$ biểu diễn sự thay đổi của tần số. Sự thay đổi tần số này được gọi là chirping. Bây giờ đã rõ vì sao hiệu ứng này được gọi là tự điều pha: Điều chế này là sự thay đổi tần số xảy ra do sự dịch pha gây ra bởi chính xung ánh sáng.

Trong tán sắc màu, các bước sóng khác nhau (các tần số) lan truyền theo các vận tốc khác nhau. Như vậy xung mang các tần số khác nhau khi lan truyền sẽ giãn

ra. Rõ ràng SPM gây ra giãn xung thông qua tán sắc màu. Cần lưu ý một ưu điểm của SPM là: khi công suất lan truyền cao, ở khoảng đầu sợi quang, SPM có thể nén xung. Tuy nhiên khi xung lan truyền xa hơn, xung sẽ bị giãn nhiều hơn. Hiện tượng nén xung này có thể sử dụng để bù tán sắc.

Các hiệu ứng phi tuyến thường được đánh giá qua các giới hạn công suất cho hệ thống thông tin. Để ảnh hưởng của SPM là tối thiểu, độ dịch pha phi tuyến phải rất nhỏ tức là $\Phi \ll 1$. Theo công thức (1.2) $L_{\text{eff}} \approx 1/\alpha$ cho nên $P_{\text{in}} \ll \alpha/g_{\text{NL}}$. Ví dụ $\alpha = 0,2\text{dB/km}$ tức $\alpha = 0,046 \text{ 1/km}$ và $g_{\text{NL}} = 2,35 \times 10^{-3} \text{ 1/m.W}$ thì công suất đầu vào phải nhỏ hơn 19,6 mW.

6. Hiệu ứng điều chế xuyên pha

SPM là giới hạn phi tuyến chủ yếu trong hệ thống đơn kênh. Trong hệ thống đa kênh độ dịch pha của một kênh, ví dụ như kênh thứ nhất Φ_1 , phụ thuộc không những vào cường độ (công suất) của chính kênh đó mà còn phụ thuộc vào cường độ của những kênh còn lại. Hiện tượng này gọi là điều chế xuyên pha CPM. Ví dụ xem xét hệ thống ba kênh. Khi đó Φ_1 sẽ là:

$$\Phi_1 = \gamma_{\text{NL}} L_{\text{eff}} (P_1 + 2P_2 + 2P_3) \quad (1.21)$$

CMP ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn thông qua cơ chế giống như SPM: tần số chirping và tán sắc màu. CPM có thể ảnh hưởng đến hệ thống mạnh hơn SPM vì hệ số 2 trong công thức (1.21).

7. Hiệu ứng trộn bốn bước sóng

Trong hệ thống WDM sử dụng các tần số góc $\omega_1 \dots \omega_n$, sự phụ thuộc của chiết suất vào cường độ (công suất) không chỉ gây ra sự dịch pha trong mỗi kênh mà còn sinh ra tần số mới như là $2\omega_i - \omega_j$ và $\omega_i + \omega_j - \omega_k$. Hiện tượng này gọi là hiện tượng trộn bốn bước sóng (FWM_Four-wave Mixing). Trái với SPM và CPM chỉ có ảnh hưởng đối với các hệ thống tốc độ bit cao, hiệu ứng trộn bốn bước sóng không phụ thuộc vào tốc độ bit mà phụ thuộc chặt chẽ vào khoảng cách kênh và tán sắc màu của sợi. Giảm khoảng cách kênh làm tăng ảnh hưởng của hiệu ứng trộn bốn bước sóng và việc giảm tán sắc màu cũng vậy. Do đó, các ảnh hưởng của FWM phải được xem xét ngay cả ở các hệ thống tốc độ vừa phải khi khoảng cách kênh gần nhau và/hoặc khi sử dụng sợi dịch chuyển tán sắc.

Để hiểu các ảnh hưởng của hiệu ứng trộn bốn bước sóng, ta xét một tín hiệu WDM là tổng của n sóng phẳng đơn sắc. Trường điện của tín hiệu này có thể được viết một cách đơn giản:

$$E(r, t) = \sum_{i=1}^n E_i \cos(\omega_i t - b_i z)$$

Theo công thức (1.12), phân cực điện môi phi tuyến có thể được viết:

$$P_{NL}(r, t) = \epsilon_0 \chi_e^{(3)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) E_j \cos(\omega_j t - \beta_j z) E_k \cos(\omega_k t - \beta_k z)$$

$$= \frac{3\epsilon_0 \chi_e^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \left(E_i^2 + 2 \sum_{j \neq i} E_i E_j \right) E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) \quad (1.22)$$

$$+ \frac{\epsilon_0 \chi_e^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n E_i^3 \cos(3\omega_i t - 3\beta_i z) \quad (1.23)$$

$$+ \frac{3\epsilon_0 \chi_e^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} E_i^2 E_j \cos((2\omega_i - \omega_j)t - (2\beta_i - \beta_j)z) \quad (1.24)$$

$$+ \frac{3\epsilon_0 \chi_e^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} E_i^2 E_j \cos((2\omega_i + \omega_j)t - (2\beta_i + \beta_j)z) \quad (1.25)$$

$$+ \frac{6\epsilon_0 \chi_e^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \sum_{k>j} E_i E_j E_k \times$$

$$\times (\cos((\omega_i + \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j + \beta_k)z) \quad (1.26)$$

$$+ \cos((\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z) \quad (1.27)$$

$$+ \cos((\omega_i - \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j + \beta_k)z) \quad (1.28)$$

$$+ \cos((\omega_i - \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j - \beta_k)z)) \quad (1.29)$$

Như vậy, độ cảm điện phi tuyến của sợi quang tạo ra các trường mới (các sóng mới) ở tần số $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ ($\omega_i, \omega_j, \omega_k$ có thể giống nhau). Hiện tượng này gọi là hiệu ứng trộn bốn bước sóng. Nguyên nhân là do các tần số $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ tổ hợp với nhau tạo ra bước sóng thứ tư ở tần số $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. Đối với khoảng cách tần số bằng nhau và một sự lựa chọn i, j, k nào đó, bước sóng thứ tư ảnh hưởng đến ω_i . Ví dụ, cho khoảng cách tần số $\Delta\omega$ với $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ là các tần số liên tiếp, nghĩa là $\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega$ và $\omega_3 = \omega_1 + 2\Delta\omega$ sẽ có $\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 = \omega_2$ và $2\omega_2 - \omega_1 = \omega_3$.

Biểu thức (1.22) cho thấy ảnh hưởng của SPM và CPM mà ta đã đề cập đến trong mục 5. *Hiệu ứng tự điều pha SPM* và 6. *Hiệu ứng điều chế xuyên pha*, các biểu thức (1.23), (1.24) và (1.25) có thể bỏ qua do không có sự đồng pha. Dưới các điều kiện thích hợp, có thể để thỏa mãn điều kiện đồng pha đối với các biểu thức còn lại, đó là tất cả các dạng $\omega_i + \omega_j - \omega_k, i, j \neq k$ (ω_i, ω_j có thể giống nhau). Chẳng hạn, nếu các bước sóng trong hệ thống WDM là gần nhau hoặc phân bố gần vùng tán sắc không của sợi, thì β gần như là không đổi trên các tần số này và điều kiện đồng pha gần như là được thỏa mãn. Khi các điều kiện này thỏa mãn, công suất của các tần số mới được tạo ra có thể phải quan tâm đến.

Có thể xác định giá trị của hiệu ứng trộn bốn bước sóng dạng $\omega_i + \omega_j - \omega_k, i, j \neq k$ đơn giản như sau:

Định nghĩa $\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k$ và hệ số suy biến (Degeneracy Factor)

$$d_{ijk} = \begin{cases} 3, & i = j \\ 6, & i \neq j \end{cases}$$

Phân cực điện môi phi tuyến tại ω_{ijk} có thể được viết:

$$P_{NLijk}(z, t) = \frac{e_0 C_e^{(3)}}{4} d_{ijk} E_i E_j E_k \cos((w_i + w_j - w_k)t - (b_i + b_j - b_k)z) \quad (1.30)$$

Giả sử rằng các tín hiệu quang lan truyền như các sóng phẳng qua diện tích lõi hiệu dụng A_{eff} trong sợi (xem hình 1.6), theo (1.25) có thể biểu diễn công suất của tín hiệu ở tần số ω_{ijk} sau khi lan truyền qua khoảng cách L trong sợi là

$$P_{ijk} = \left(\frac{w_{ijk} d_{ijk} C_e^{(3)}}{8A_{eff} n_{eff} c} \right)^2 P_i P_j P_k L^2$$

Ở đây, P_i, P_j, P_k là các công suất ngõ vào tại các tần số $\omega_i, \omega_j, \omega_k$. Chú ý rằng chiết suất n được thay thế bởi chiết suất hiệu dụng n_{eff} của mode cơ sở. Sử dụng chiết suất phi tuyến n_{NL} , có thể viết

$$P_{ijk} = \left(\frac{w_{ijk} n_{NL} d_{ijk}}{3cA_{eff}} \right)^2 P_i P_j P_k L^2 \quad (1.31)$$

Hãy xem xét một số ví dụ cụ thể. Giả sử rằng mỗi tín hiệu quang ở các tần số $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ có công suất 1mW và diện tích lõi hiệu dụng của sợi quang là $A_{eff} = 50\mu\text{m}^2$. Cũng giả sử $\omega_i \neq \omega_j$, để $d_{ijk} = 6$. Sử dụng $n_{NL} = 3.0 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2/\text{W}$, khoảng cách lan truyền $L = 20 \text{ km}$. Công suất P_{ijk} của tín hiệu ở tần số góc ω_{ijk} sinh ra do hiệu ứng trộn bốn bước sóng khoảng $9.5\mu\text{W}$. Giá trị này chỉ thấp hơn công suất của tín hiệu 1mW khoảng 20 dB. Trong hệ thống WDM, nếu có kênh khác cũng ở tần số ω_{ijk} , hiệu ứng trộn bốn bước sóng có thể gây nhiễu kênh này.

Thực tế, các tín hiệu tạo bởi hiệu ứng trộn bốn bước sóng có năng lượng thấp do không có sự đồng pha hoàn toàn và suy giảm suy hao sợi.

III. 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) và bộ ghép/tách kênh (multiplexers). Mục này sẽ tập trung xem xét nguyên lý hoạt động của các linh kiện nêu trên. Đối với mỗi linh kiện trước tiên sẽ đưa ra mô hình mô tả đơn giản sau đó là các mô hình toán học chi tiết. Bạn đọc có thể bỏ qua phần mô tả toán học nếu thấy chưa cần thiết để tham khảo. Riêng bộ khuếch đại quang sẽ được xem xét riêng ở chương 2. Phần này cũng không trình bày

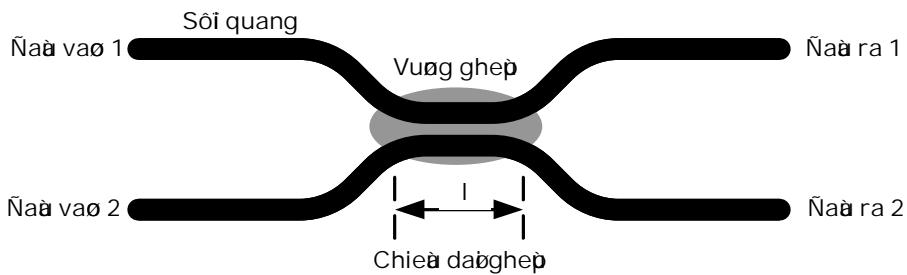
bộ phát laser. Bạn đọc có thể tìm hiểu bộ phát laser trong “Hệ thống thông tin quang – Tập 1”.

1. Bộ ghép/tách tín hiệu

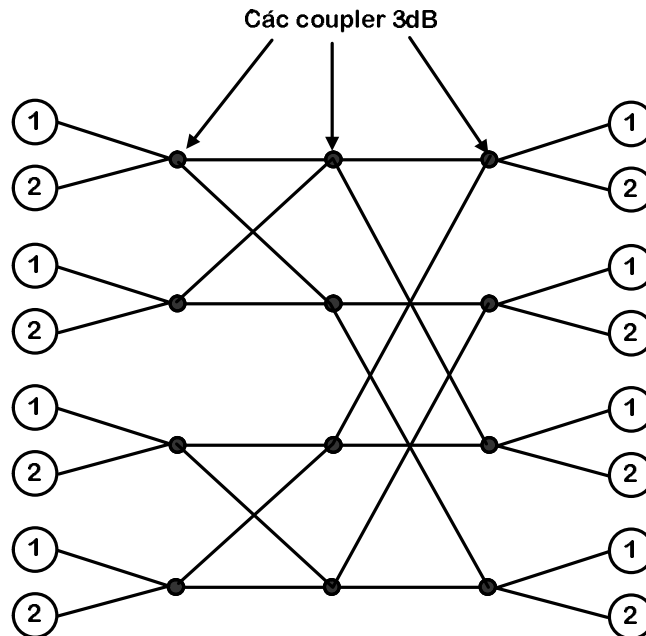
a) Định nghĩa

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).

Hình 1.9 Cấu tạo coupler FBT 2 x 2



Hình 1.10 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.



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 dần 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.

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 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 1.10.

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 mode 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_{o1} , E_{o2} được tính theo cường độ trường điện từ đầu vào E_{i1} , E_{i2} theo công thức [1]:

$$\begin{pmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{pmatrix} = e^{-i\beta l} \begin{pmatrix} \cos(kl) & i \sin(kl) \\ i \sin(kl) & \cos(kl) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{pmatrix} \quad (1.32)$$

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:

$$E_{o1}(f) = e^{-i\beta l} \cos(kl) E_{i1}(f) \quad (1.33)$$

$$E_{o2}(f) = e^{-i\beta l} e^{i(p/2)} \sin(kl) E_{i1}(f) \quad (1.34)$$

Ta nhận xét rằng ở 2 đầu ngõ ra có sự lệch pha $\pi/2$. Cũng trong điều kiện này, ta tính được hàm truyền đạt công suất:

$$\begin{pmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2(\kappa l) \\ \sin^2(\kappa l) \end{pmatrix} \tag{1.35}$$

Ở đây hàm truyền đạt công suất T_{ij} được định nghĩa:

$$T_{ij} = \frac{|E_{oj}|^2}{|E_{ii}|^2}$$

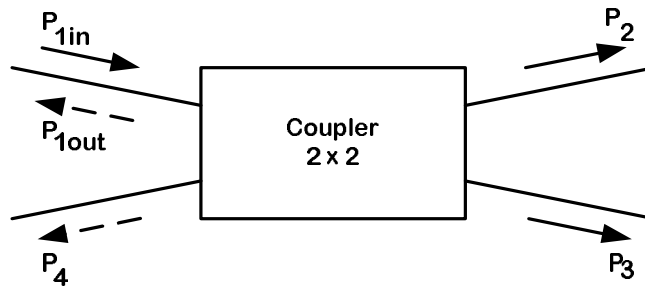
Từ công thức (1.35) để có coupler 3 dB độ dài coupler phải được chọn sau cho $\kappa l = (2k + 1)\pi / 4$ với k là số không âm.

c) Các thông số cơ bản

Bộ coupler WDM được đặc trưng bởi các thông số sau [2]:

- **Suy hao vượt mức P_{ex} (Excess Loss):** được định nghĩa:

Hình 1.11 Các thông số đặc trưng của coupler



$$P_{ex} \text{ (dB)} = -10 \log \left[\left(\sum_j P_j \right) / P_i \right] \tag{1.36}$$

Ở đây P_j : công suất tại ngõ ra j ,

P_i : công suất tại ngõ vào.

Theo hình 1.11, P_{ex} được tính:

$$P_{ex} \text{ (dB)} = -10 \log [(P_2 + P_3) / P_1]$$

- **Suy hao xen IL (Insertion Loss):** là tỉ số của công suất tín hiệu ngõ ra so với ngõ vào tại một bước sóng cụ thể. Suy hao xen là suy hao mà coupler thêm vào ngõ vào và ngõ ra.

$$IL_{12} \text{ (dB)} = -10 \log [P_2 / P_1] \tag{1.37}$$

- **Tỉ số ghép CR (Coupling Ratio):** được định nghĩa

$$CR \text{ (dB)} = -10 \log [P_2 / (P_2 + P_3)] \tag{1.38-a}$$

CR có thể được biểu diễn theo % :

$$CR(\%) = [P_2 / (P_2 + P_3)] \times 100 \quad (1.38-b)$$

Để thấy

$$IL = CR + P_{ex} \quad (1.39)$$

- **Tính đồng nhất U (Uniformity):** đặc trưng cho coupler dùng trong trường hợp chia đôi công suất (50:50). Hệ số này để chỉ độ đồng nhất giữa 2 nhánh của coupler (bằng 0 trong trường hợp coupler lí tưởng).

$$U(\text{dB}) = IL_{\max} - IL_{\min} = 10 \log[P_3/P_2] \quad (1.40)$$

- **Suy hao do phân cực PDL (Polarization-dependent Loss):** là dao động lớn nhất của suy hao xen do sự thay đổi phân cực ánh sáng đầu vào. Thường chỉ số này không vượt quá 0.15 dB.

- **Tính định hướng D (Directivity):** là phần công suất tín hiệu ngõ vào xuất hiện tại ngõ ra không mong muốn.

$$D(\text{dB}) = -10 \log[P_4/P_1] \quad (1.41)$$

- **Xuyên kênh đầu gần (near-end crosstalk):** dùng để đánh giá tính định hướng.

$$NEC(\text{dB}) = -10 \log[P_3(I_1)/P_1(I_1)] \quad (1.42)$$

- **Suy hao phản hồi RL (Return Loss):** được định nghĩa:

$$RL(\text{dB}) = -10 \log[P_{1\text{out}}/P_{1\text{in}}] \quad (1.43)$$

- **Độ cách ly (Isolator):** dùng đánh giá phần ánh sáng trên một đường bị ngăn không đạt đến một đường khác. Ví dụ λ_1 là bước sóng truyền từ cổng 1 đến cổng 2, truyền đến cổng 4 là không mong muốn. Tương tự λ_2 truyền từ cổng 1 đến cổng 4, truyền đến cổng 2 là không mong muốn. Khi đó độ cách ly được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} I_{41}(\text{dB}) &= -10 \log[P_4(I_1)/P_1(I_1)] \\ I_{21}(\text{dB}) &= -10 \log[P_2(I_2)/P_1(I_2)] \end{aligned} \quad (1.44)$$

d) 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.

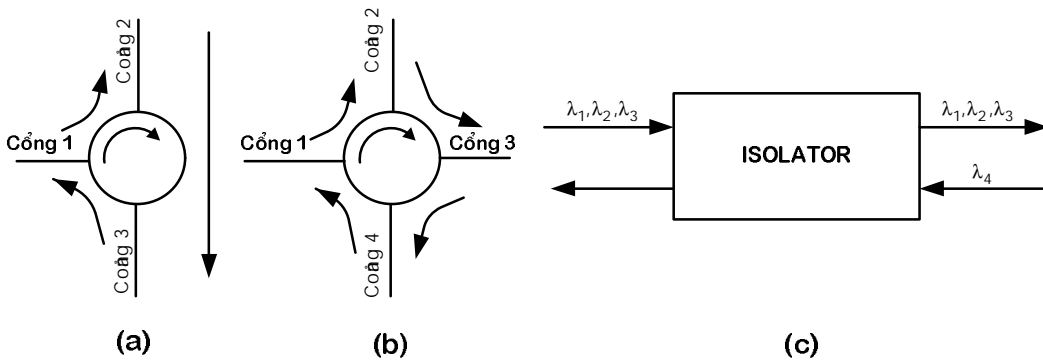
2. Bộ isolator/circulator

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 cổng. Chính vì sự tương đồng giữa hai loại thiết bị, ta sẽ chỉ trình bày hoạt động của bộ Isolator mà thôi.

Hình 1.12 (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.



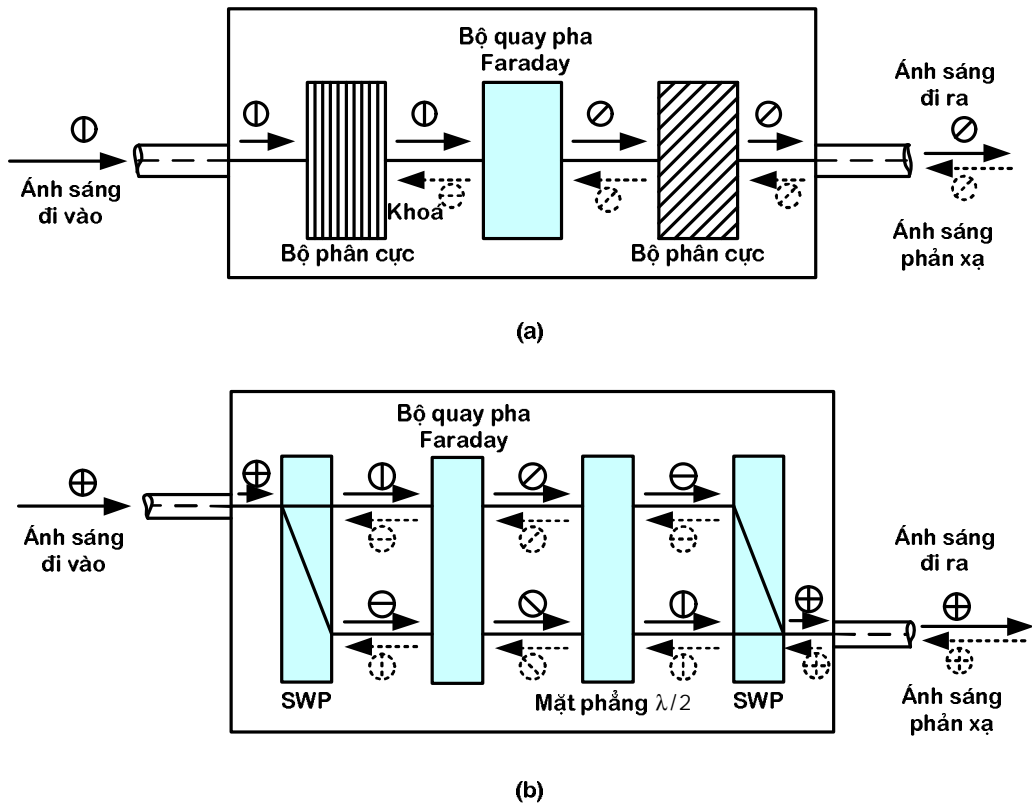
b) Nguyên lý hoạt động

Trạng thái phân cực của ánh sáng truyền trong sợi quang được định nghĩa là chiều phân cực của vector cường độ trường \vec{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 1.13 (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).

Hình 1.13 (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.



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 1.13 (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 1.13.

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.

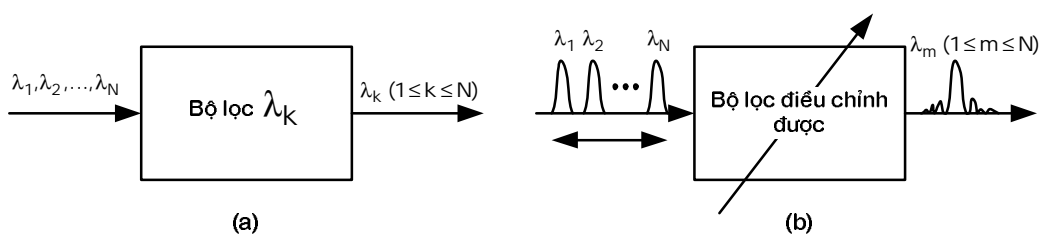
3. Bộ lọc quang

a) Tổng quan

Định nghĩa

Bộ lọc là thiết bị chỉ cho phép một kênh bước sóng đi qua, khóa đối với tất cả các kênh bước sóng khác. Nguyên lý cơ bản nhất của bộ lọc là sự giao thoa giữa các tín hiệu, bước sóng hoạt động của bộ lọc sẽ được cộng pha nhiều lần khi đi qua nó, các kênh bước sóng khác, ngược lại, sẽ bị triệt tiêu về pha. Tùy 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). Hình 1.14 là sơ đồ khối của bộ lọc cố định và bộ lọc điều chỉnh được.

Hình 1.14 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 DI .



Yêu cầu đối với bộ lọc

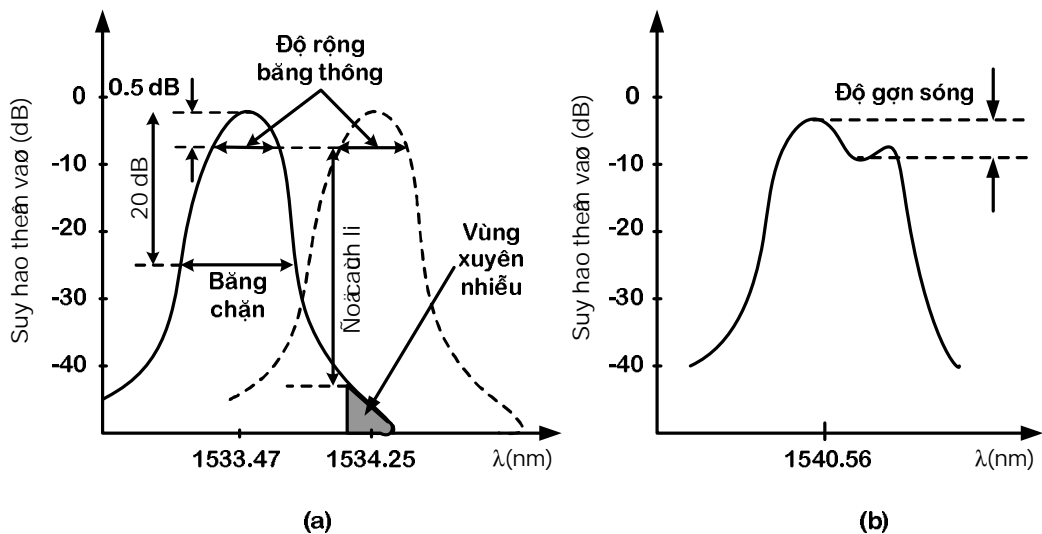
Hiện nay, có rất nhiều công nghệ chế tạo bộ lọc. Tuy nhiên, yêu cầu chung đối với tất cả các công nghệ là:

- Bộ lọc tốt phải có giá trị suy hao xen IL thấp.
- 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 100°C), độ dịch dải thông hoạt động phải không vượt quá khoảng cách giữa hai 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 hàm 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 vạt của 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.

Hình 1.15 (a) Các thông số đặc trưng của bộ lọc. (b) Độ gợn sóng của bộ lọc.



b) Thông số cơ bản

Hình 1.15 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): là 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 lí 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): là 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 li (Isolation): để chỉ công suất của một kênh bước sóng xuyên nhiễu sang các kênh bước sóng lân cận.
- Độ gợn sóng (Ripple): là độ chênh lệch đỉnh-đỉnh trong phạm vi một kênh bước sóng.
- Hệ số sử dụng băng thông BUF (Bandwidth-utilization Factor): là 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 $BUF \approx 0.4$.

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: là khoảng bước sóng mà trong phạm vi hoạt động của bộ lọc.
- Số kênh bước sóng có thể xử lý: là 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): là khoảng cách giữa giá trị công suất đỉnh so với giá trị công suất lớn nhất ở biên.
- Độ phân giải: là 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.

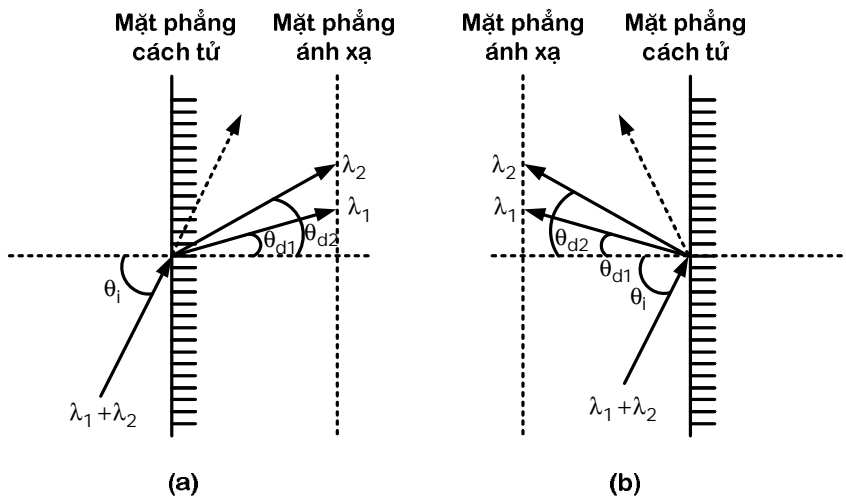
Sóng ánh sáng có lan truyền theo hướng z với tần số góc là ω và hằng số pha là β sẽ có độ dịch pha là $(\omega t - \beta z)$. Do đó độ dịch pha tương đối giữa hai sóng phát sinh từ một nguồn có thể được tạo ra bằng cách cho chúng truyền qua hai đường khác nhau.

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.

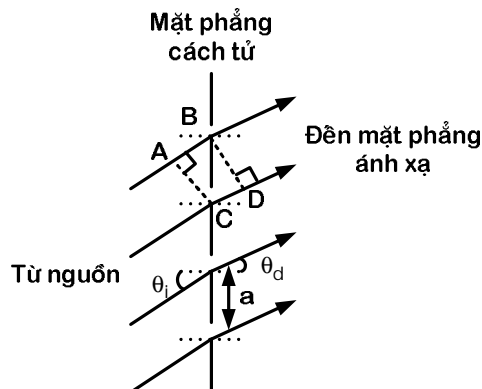
Hình 1.16 là hai ví dụ về cách tử: trên mặt phẳng cách tử (grating plane), các khe (slit) được cách đều nhau. Khoảng cách giữa hai khe kế cận gọi là pitch. Do các khe nhỏ nên theo hiện tượng nhiễu xạ (diffraction) ánh sáng truyền qua các khe này sẽ lan toả ra mọi hướng. Trên mặt phẳng ánh xạ (imaging 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 1.16(a) là cách tử truyền dẫn (transmission gratings), 1.16(b) là cách tử phản xạ (reflection gratings).

Hình 1.16: (a) Cách tử truyền dẫn và (b) Cách tử phản xạ



Hình 1.17 Nguyên tắc hoạt động của cách tử truyền dẫn. Cách tử phản xạ hoạt động tương tự. Sự chênh lệch độ dài giữa các tia khúc xạ tại góc q_d với các khe kế cận là: $\overline{AB} - \overline{CD} = a[\sin(\theta_i) - \sin(\theta_d)]$



Nguyên lý hoạt động

Theo hình 1.17 ta có sự chênh lệch dài giữa các tia khúc xạ tại góc θ_d với các khe kế cận là $\overline{AB} - \overline{CD} = a[\sin(\theta_i) - \sin(\theta_d)]$. Giao thoa xây dựng (constructive interference) xảy ra khi:

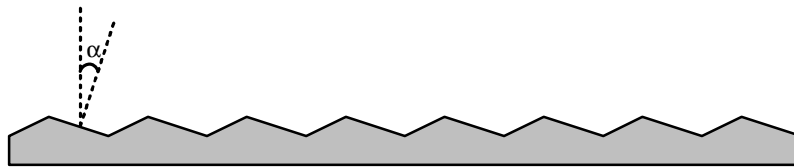
$$a[\sin(\theta_i) - \sin(\theta_d)] = m\lambda \tag{1.45}$$

Với m: bậc của cách tử. Khi $\theta_i = 0$ có thể viết lại (3.14) như sau:

$$a\sin(\theta_d) = m\lambda \tag{1.45a}$$

Trên thực tế, năng lượng tập trung tại bậc 0 khi $\theta_i = \theta_d$ đối với mọi bước sóng. Năng lượng ánh sáng tại bậc 0 là vô ích vì các bước sóng không được tách rời. Do đó cần thiết kể các cách tử khác gọi là blazing (xem hình 1.18).

Hình 1.18 Cách tử blazing với góc blaze α . Năng lượng của giao thoa tối đại tương ứng với góc blaze là cực đại.



d) Cách tử Bragg

Định nghĩa

Cách tử Bragg được sử dụng rộng rãi trong hệ thống thông tin quang. Mọi sự biến đổi tuần hoàn trong môi trường truyền sóng (thường là biến đổi tuần hoàn chiết suất môi trường) đều có thể hình thành cách tử Bragg.

Nguyên lý hoạt động

Xét hai sóng truyền theo hai chiều ngược nhau với hệ số pha là β_0, β_1 . Năng lượng của tín hiệu này được ghép sang tín hiệu kia nếu chúng thỏa mãn điều kiện về pha:

$$|\beta_0 - \beta_1| = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{1.46}$$

Trong đó: Λ là chu kỳ cách tử.

Trong cách tử Bragg, năng lượng của sóng truyền theo hướng đến được ghép vào sóng phản xạ tương ứng truyền theo hướng ngược lại. Xét sóng có hệ số pha β_0 truyền theo chiều từ trái sang phải. Năng lượng của sóng này sẽ được ghép vào sóng tán xạ của nó theo chiều ngược lại (có cùng bước sóng với sóng tới) nếu thỏa mãn điều kiện về pha:

$$|\beta_0 - (-\beta_0)| = 2\beta_0 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.47)$$

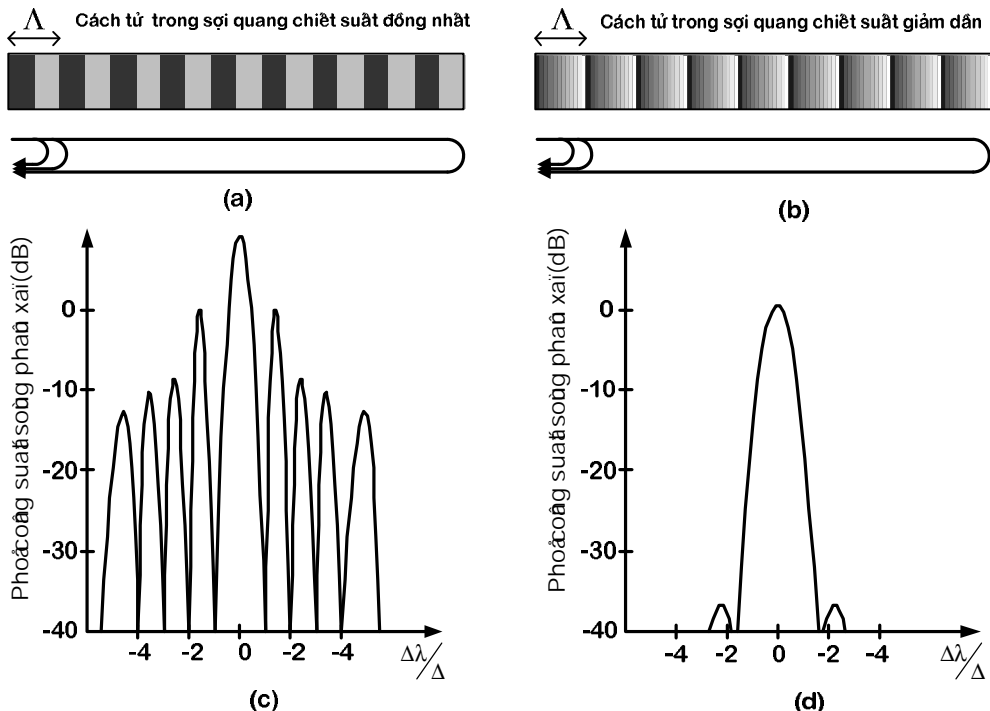
Gọi $\beta_0 = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda_0$, λ_0 là bước sóng ánh sáng tới và n_{eff} là giá trị chiết suất hiệu dụng của sợi quang hoặc ống dẫn sóng (vật liệu làm cách tử Bragg). Khi đó, điều kiện phản xạ được viết lại là:

$$\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1.48)$$

Công thức trên gọi là điều kiện Bragg. Trong đó, λ_0 được gọi là sóng Bragg.

Hình 1.19 (a) minh họa cơ chế hoạt động của phản xạ Bragg. Đó là một sợi quang hoạt động theo cơ chế phản xạ Bragg. Chiết suất tương đối của lõi sợi quang được làm biến đổi tuần hoàn dọc theo chiều dài của sợi đóng vai trò như cách tử Bragg. Sóng truyền trong sợi quang và nó được phản xạ lại theo mỗi chu kỳ cách tử. Các sóng phản xạ sẽ cộng pha với nhau nếu bước sóng tuân theo điều kiện Bragg ta đã trình bày ở trên.

Hình 1.19 (a) Cách tử Bragg trong sợi quang chiết suất đồng nhất. (b) Cách tử Bragg trong sợi quang chiết suất giảm dần. (c) Phổ công suất phản xạ của cách tử đồng nhất. (d) Phổ công suất phản xạ của cách tử giảm dần. D là độ rộng của dải thông và là khoảng cách giữa bước sóng đỉnh và điểm phản xạ tối thiểu đầu tiên trong trường hợp mặt cắt chiết suất đồng nhất. D tỉ lệ nghịch với chiều dài cách tử. DI là độ lệch bước sóng so với bước sóng đồng pha.



Hình 1.19 (c) và (d) là độ rộng phổ công suất của sóng phản xạ đối với hai trường hợp cách tử: cách tử đồng nhất và cách tử giảm dần. Cách tử giảm dần (apodized grating) là trường hợp chế tạo chiết suất tương đối sao cho càng xa trung tâm cách tử, sự khác biệt về chiết suất càng giảm. Dùng cách tử giảm dần sẽ giảm được công suất của sóng phản xạ lân cận, nhưng đổi lại phải chịu băng thông hoạt động tăng lên. Theo đồ thị, ta cũng thấy rằng càng xa bước sóng Bragg, phổ của sóng phản xạ càng giảm. Có nghĩa là khi hoạt động với các kênh bước sóng cách nhau một khoảng cách nhất định, chỉ có bước sóng Bragg là phản xạ trở lại khi truyền qua cách tử Bragg, các bước sóng khác sẽ truyền đi xuyên qua.

Ứng dụng của cách tử Bragg

- Cách tử Bragg là nguyên lý cơ bản dùng trong công nghệ chế tạo bộ lọc, bộ ghép xen/rót quang, dùng để bù suy hao tán sắc.
- Ứng dụng để chế tạo bộ lọc có thể điều chỉnh quang-âm học.
- Ngoài ra, đối với lĩnh vực khuếch đại quang, cách tử Bragg còn cho nhiều ứng dụng quan trọng như: ổn định độ lợi, cân bằng độ lợi cho EDFA.

e) Bộ lọc cách tử kiểu sợi quang

Định nghĩa

Cách tử Bragg kiểu sợi quang là một đoạn sợi quang nhạy với ánh sáng, được chế tạo bằng cách dùng tia cực tím UV (Ultra-violet) chiếu vào để làm thay đổi một cách tuần hoàn chiết suất bên trong lõi. Sự thay đổi chiết suất trong lõi sợi chỉ cần rất nhỏ (khoảng 10^{-4}) cũng đã đủ tạo ra cách tử Bragg. Bộ lọc cách tử Bragg kiểu sợi quang được phân làm hai loại: cách tử chu kỳ ngắn và cách tử chu kỳ dài. Cách tử chu kỳ ngắn có chu kỳ cách tử tương đương với bước sóng hoạt động (khoảng $5\mu\text{m}$). Trong khi đó cách tử chu kỳ dài có chu kỳ cách tử lớn hơn nhiều lần so với bước sóng hoạt động (khoảng vài trăm $5\mu\text{m}$ đến vài mm). Bộ lọc Bragg kiểu sợi quang cũng có thể là bộ lọc cố định hoặc bộ lọc điều chỉnh được.

Nguyên lý hoạt động của cách tử chu kỳ ngắn

Nguyên lý hoạt động của bộ lọc Bragg kiểu sợi quang hoàn toàn tương tự như ta đã đề cập ở phần trên. Bằng cách tạo sự thay đổi tuần hoàn chiết suất trong lõi sợi quang, quá trình truyền sóng trong sợi quang qua những miền chiết suất khác nhau khi đó trở nên nghiệm đúng đối với điều kiện Bragg. Khi truyền trong sợi quang đã được cách tử Bragg hoá, chỉ có bước sóng $\lambda = \lambda_B$ sẽ được phản xạ trở lại và cộng pha với nhau, cộng pha với sóng tới, làm tăng cường độ sóng phản xạ. Các bước sóng khác sẽ truyền xuyên qua hoặc phản xạ trở lại không đáng kể do triệt pha với nhau. Bước sóng Bragg λ_B của bộ lọc được tính từ công thức:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \tag{1.49}$$

- Trong đó:
- n_{eff} là chiết suất tương đối của lõi sợi.
 - Λ là chu kỳ cách tử Bragg.

Nguyên lý hoạt động của cách tử chu kỳ dài

Nguyên lý hoạt động của bộ lọc Bragg kiểu sợi quang chu kỳ dài có khác so với loại chu kỳ ngắn. Trong loại cách tử chu kỳ ngắn mà ta đã xét ở trên, khi bước sóng truyền trong lõi sợi là λ_B , sóng phản xạ trở về sẽ được ghép cộng pha với nhau và cộng pha với sóng tới. Tất cả quá trình đó chỉ diễn ra trong lõi sợi quang. Đối với cách tử chu kỳ dài, sóng truyền trong phần lớp phủ ngoài lõi sợi theo chiều đi sẽ được ghép cộng pha với sóng truyền trong phần lõi sợi ở cùng chiều. Điều kiện để có sự ghép cộng pha giữa phần mode sóng truyền trong lõi và phần mode sóng truyền trong lớp vỏ là:

$$\beta - \beta_{cl}^p = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.50)$$

Trong đó: - β là hệ số pha của mode sóng truyền trong lõi.
- β_{cl}^p là hệ số pha của mode sóng bậc p truyền trong lớp vỏ.

Thường thì hiệu số giữa hai hằng số lan truyền này rất nhỏ nên Λ sẽ trở nên rất lớn để việc ghép năng lượng có thể xảy ra. Giá trị này thường vào khoảng vài trăm μm (lưu ý đối với cách tử sợi Bragg hiệu số giữa hằng số lan truyền của mode tới và mode phản xạ là rất lớn nên chu kỳ cách tử Λ sẽ rất nhỏ). Do ta có mối liên hệ giữa hệ số pha và chiết suất tương đối:

$$\beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (1.51)$$

Nên từ công thức (1.50), ta suy ra được:

$$\lambda = \Lambda(n_{\text{eff}} - n_{\text{eff}}^p) \quad (1.52)$$

Như vậy khi biết được n_{eff} , n_{eff}^p ta có thể chế tạo một cách tử giá trị Λ một cách hợp lý sao cho việc ghép năng lượng xảy ra ở ngoài dải bước sóng mong muốn. Cách tử trong trường hợp này hoạt động như một bộ suy hao theo bước sóng.

Bộ lọc Bragg kiểu sợi quang có thể điều chỉnh được

Từ công thức (1.49) và (1.52), ta thấy ta chỉ cần thay đổi chu kỳ cách tử Λ là có thể thay đổi bước sóng hoạt động của bộ lọc Bragg kiểu sợi quang. Trên thực tế, để thay đổi chu kỳ cách tử người ta thường dùng 2 cách: dùng nhiệt hoặc dùng sức căng. Sự thay đổi bước sóng hoạt động của bộ lọc được xác định là một hàm theo chiều dài cách tử (L) và nhiệt độ (T).

$$\Delta\lambda = 0.8(\Delta L/L) + (8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C})\Delta T \quad (1.53)$$

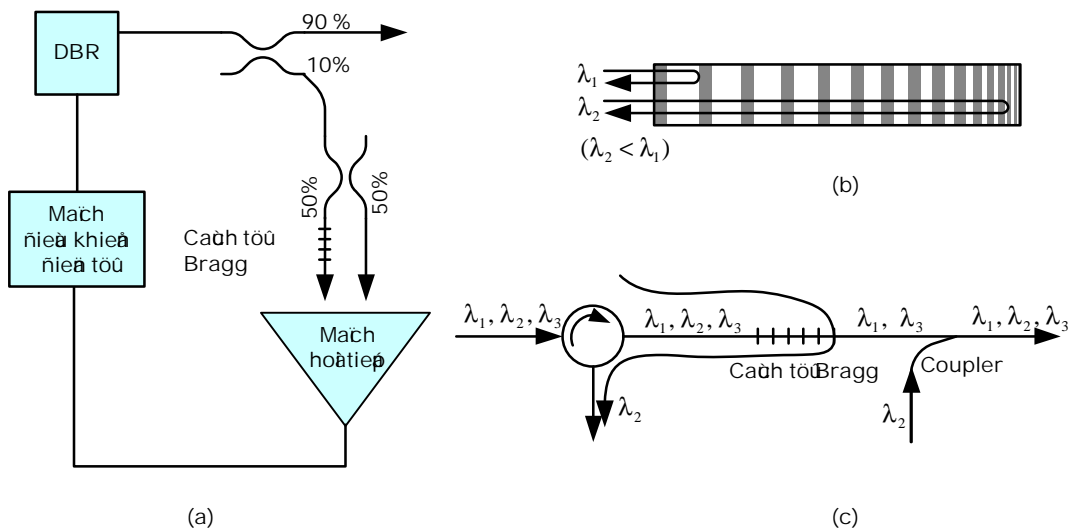
Ứng dụng của bộ lọc cách tử Bragg kiểu sợi quang

Cách tử Bragg kiểu sợi quang là thiết bị thuần quang nên có những ưu điểm của họ thiết bị này như: suy hao thấp, dễ phối ghép tín hiệu từ sợi quang vào thiết bị,

không nhạy với sự phân cực, hệ số nhiệt thấp. Nhờ các đặc tính đó cho nhiều ứng dụng khác nhau:

- Tạo nguồn laser bằng cách ghép 2 bộ lọc cách tử Bragg sợi quang cùng bước sóng hoạt động với nhau để tạo thành hốc cộng hưởng, rồi dùng một nguồn laser phát bước sóng liên tục cho chiếu vào. Nguồn laser tạo bằng phương pháp này còn có thể điều chỉnh để sóng ra ở chế độ mode-locked.
- Ổn định bước sóng: tận dụng tính chọn lọc chính xác bước sóng của bộ lọc Bragg kiểu sợi để ổn định sóng bơm bước sóng 980 nm. Dùng kết hợp với 2 coupler như minh họa trên hình 1.20 (a). Mạch hồi tiếp so sánh giữa sóng qua bộ lọc và sóng không qua bộ lọc để điều chỉnh trở lại nguồn laser DBR.
- Bù tán sắc bằng cách dùng cách tử chu kỳ giảm dần (Chirped Grating). Khi ánh sáng vào sợi quang kiểu này, những bước sóng khác nhau sẽ phản xạ ở những điểm khác nhau, đường đi khác nhau, dẫn đến bù được tán sắc nếu cấu hình thích hợp. Minh họa trên hình 1.20 (b).
- Là thành phần quan trọng trong việc chế tạo các bộ xen/rót, kết hợp với bộ Circulator. Minh họa trên hình 1.20 (c).
- Bộ lọc cách tử Bragg chu kỳ dài có thể đóng vai trò như các bộ lọc băng (băng gồm nhiều kênh bước sóng) rất hiệu quả, ứng dụng để cân bằng độ lợi khi dùng bộ khuếch đại EDFA.

Hình 1.20 Một số ứng dụng của bộ lọc cách tử Bragg kiểu sợi quang. (a) Ứng dụng tạo nguồn phát laser. (b) Bù tán sắc bằng cách dùng cách tử chu kỳ giảm dần. (c) Thành phần cấu tạo bộ xen/rót kênh bước sóng.



f) Bộ lọc Fabry-Perot
Định nghĩa

Bộ lọc Fabry-Perot gồm một khoang được tạo bởi hai gương có hệ số phản xạ cao đặt song song với nhau. Ánh sáng đi vào gương thứ nhất, một phần đi qua gương thứ hai, phần còn lại được phản xạ qua lại giữa hai bề mặt của hai gương. Bộ lọc dạng này gọi là giao thoa kế (interferometer) hay vật chuẩn (etalon) Fabry-Ferot.

Nguyên lý hoạt động

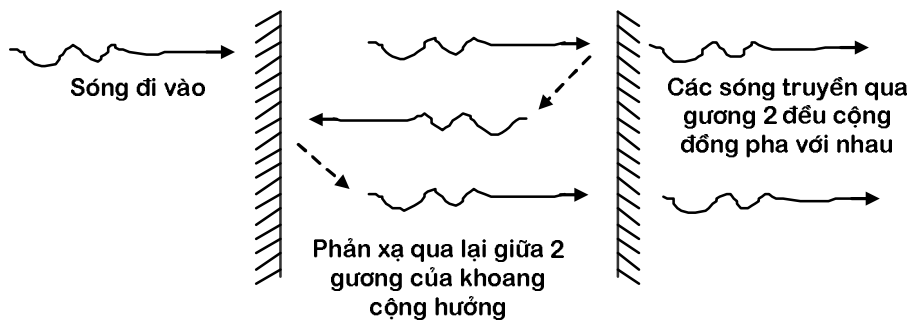
Các sóng ánh sáng có đi ra khỏi bộ lọc Fabry-Perot được cộng đồng pha với nhau. Các bước sóng này được gọi là bước sóng cộng hưởng của bộ lọc và phải thỏa mãn công thức [2]:

$$2l = \lambda_N N \quad (1.54)$$

Trong đó: - l : chiều dài khoang cộng hưởng Fabry-Perot;

- N : số nguyên tương ứng với λ_N .

Hình 1.21 Nguyên lý hoạt động của bộ lọc Fabry-Perot.



Suy ra, khoảng cách giữa 2 kênh bước sóng liên tiếp là:

$$\lambda_{N+1} - \lambda_N = \lambda_x^2 / 2l \quad (1.55)$$

Trong đó: λ_x là bước sóng đỉnh của bộ lọc trong môi trường có chiết suất n_x và $\lambda_x = \lambda / n_x$ với λ là bước sóng ánh sáng trong chân không.

Hàm truyền đạt công suất của bộ lọc Fabry-Perot được xác định là [1]:

$$T_{FP}(f) = \frac{\left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin(2pft)\right)^2\right]} \quad (1.56)$$

Công thức (1.56) có thể biểu diễn theo bước sóng như sau:

$$T_{FP}(I) = \frac{\left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin(2pnl / I)\right)^2\right]} \quad (1.56a)$$

Trong đó:

- A là suy hao do hấp thụ của gương.
- R là độ phản xạ của gương, được tính là tỉ số công suất sóng phản xạ so với sóng đến.
- l là chiều dài của khoang cộng hưởng.
- $\tau = nl/c$ với c là vận tốc ánh sáng.

Ta thấy rằng $T_{FP}(\lambda)$ là hàm tuần hoàn theo λ , chu kỳ của nó được định nghĩa là khoảng phổ tự do FSR (Free Spectral Range):

$$FSR = c/2nl \tag{1.57}$$

Băng thông 3 dB của bộ lọc Fabry-Perot tại mỗi đỉnh của hàm truyền đạt công suất được kí hiệu là FWHM. Khi bỏ qua suy hao trong bộ lọc ($A = 0$), FWHM được tính từ công thức:

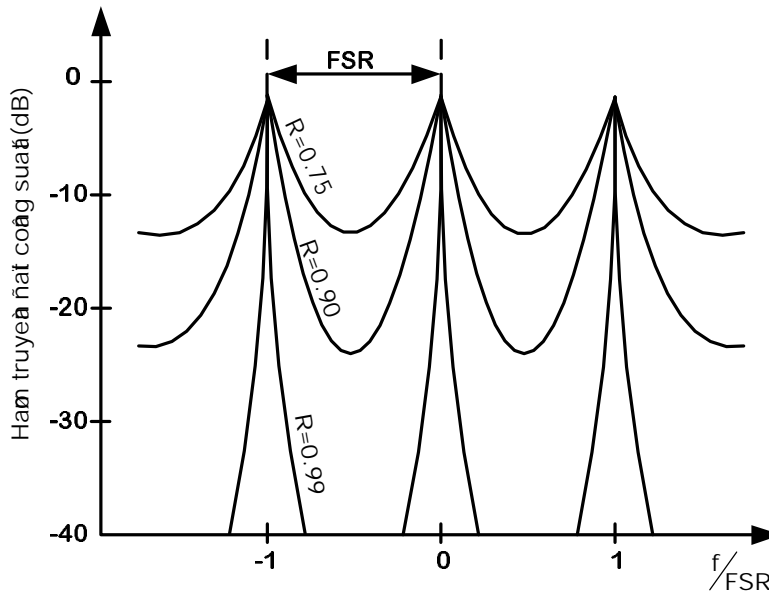
$$FWHM = \left(\frac{c}{2pln}\right)\left(\frac{1-R}{\sqrt{R}}\right) \tag{1.58}$$

Thông số đặc trưng cho bộ lọc là độ mịn F (Finesse), được định nghĩa như sau:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = p \frac{\sqrt{R}}{1-R} \tag{1.59}$$

F chỉ số bước sóng mà bộ lọc có thể phục vụ.

Hình 1.22 Hàm truyền đạt công suất của bộ lọc Fabry-Perot.



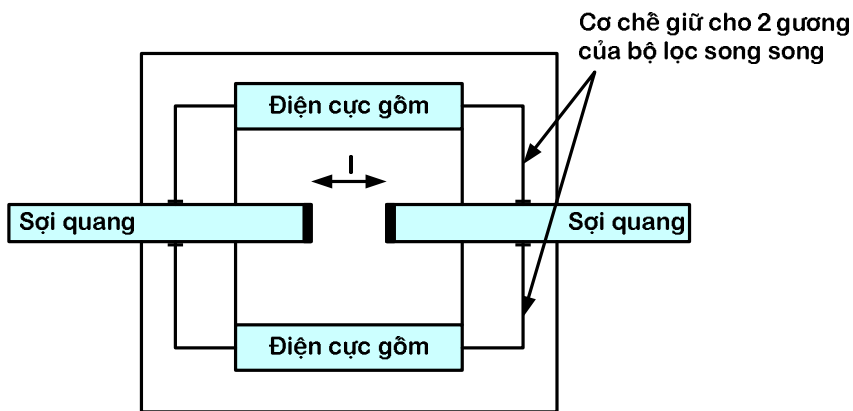
Hình 1.22 là hàm truyền đạt của bộ lọc Fabry-Perot khi $A = 0$, $R = 0.75, 0.9$ và 0.99 . Ta có thể thấy rằng R càng lớn thì khả năng chống xuyên nhiễu giữa các kênh của bộ lọc càng giảm.

Bộ lọc Fabry-Perot điều chỉnh được

Từ công thức (1.54) xác định bước sóng hoạt động của bộ lọc Fabry-Perot, ta thấy có thể thay đổi bước sóng hoạt động bằng cách thay đổi chiết suất n của khoang cộng hưởng hoặc thay đổi chiều dài l của khoang. Thay đổi chiều dài l bằng cách áp giữa mặt trên và mặt dưới của khoang một cặp điện cực làm bằng gốm. Thay đổi điện áp giữa hai điện cực sẽ làm thay đổi chiều dài của khoang. Tuy nhiên, khi di chuyển hai gương, vấn đề giữ cho hai gương song song nhau rất khó thực hiện. Do vậy, cơ chế này không đạt được tính chính xác cao. Cơ chế thực hiện được minh họa như trên hình 1.23.

Một phương pháp khác là thay đổi n bằng cách dùng tinh thể lỏng điện-từ lấp đầy khoang cộng hưởng. Chiết suất của tinh thể lỏng điện-từ sẽ thay đổi khi có dòng điện đi qua. Phương pháp này cũng có nhược điểm là các chất tinh thể lỏng điện-từ thường dễ biến động theo nhiệt độ.

Hình 1.23 Dùng điện cực để thay đổi bước sóng hoạt động của bộ lọc Fabry-Perot



Ứng dụng của bộ lọc Fabry-Perot

Bộ lọc Fabry-Perot cũng là thiết bị thuần quang nên khả năng ứng dụng khá phong phú. Tuy nhiên, khả năng vượt trội so với các thiết bị lọc kiểu khác là hệ số F của bộ lọc Fabry-Perot khá lớn (đến 2000), cộng với khả năng điều chỉnh bước sóng linh động nên thường dùng trong phòng thí nghiệm để kiểm tra, đo lường các thiết bị quang khác.

g) Bộ lọc đa khoang màng mỏng điện môi (TFMF)

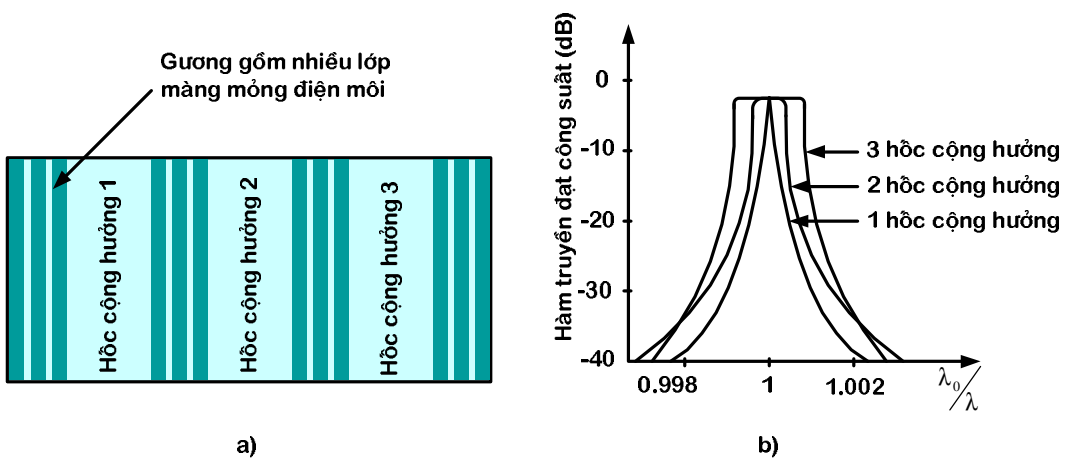
Định nghĩa

Bộ lọc màng mỏng TFF (Thin-film Filter) cũng là một dạng của giao thoa kế Fabry-Perot, trong đó các gương bao quang học cộng hưởng được hiện thực bằng

nhiều lớp màng mỏng điện môi có thể phản xạ được. Bộ lọc này là bộ lọc dải thông chỉ cho một bước sóng nhất định đi qua và phản xạ tất cả các bước sóng còn lại.

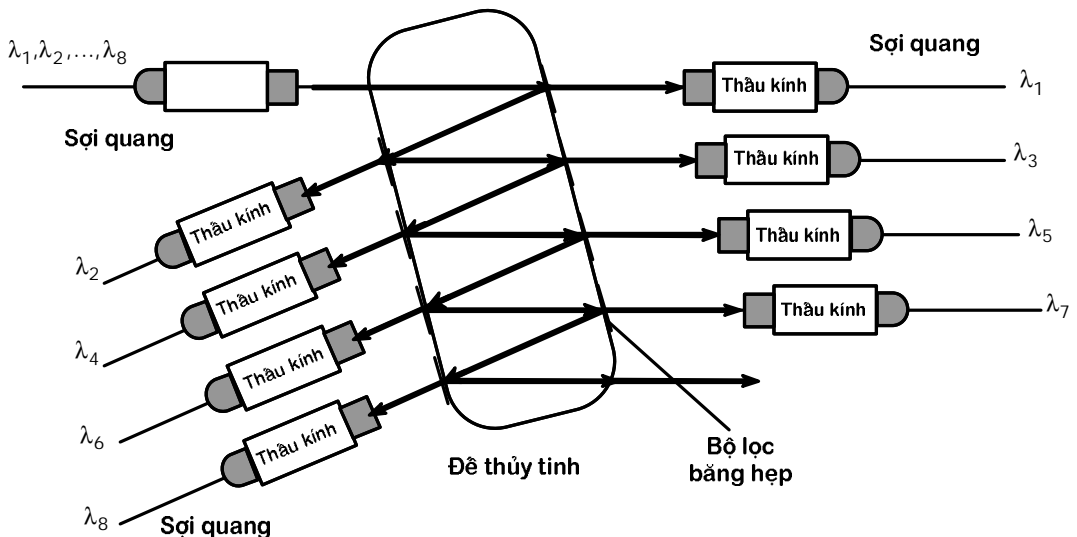
Bộ lọc đa khoang màng mỏng điện môi (TFMF) gồm nhiều hốc cộng hưởng cách nhau bằng các màng mỏng điện môi phản xạ như minh họa trong hình 1.24 (a). Số hốc cộng hưởng càng nhiều thì hàm truyền đạt công suất có đỉnh càng phẳng trong dải thông và có độ dốc càng đứng (hình 1.24).

Hình 1.24 Bộ lọc đa khoang màng mỏng TFMF (Thin-film Multicavity Filter). (a) Cấu tạo bộ lọc gồm có 3 hốc cộng hưởng. (b) Hàm truyền đạt công suất đối với các trường hợp gồm: một, hai, ba hốc cộng hưởng.



Ứng dụng của bộ lọc TFMF

Hình 1.25: Bộ lọc ghép/tách kênh được tạo từ các bộ lọc màng mỏng điện môi.



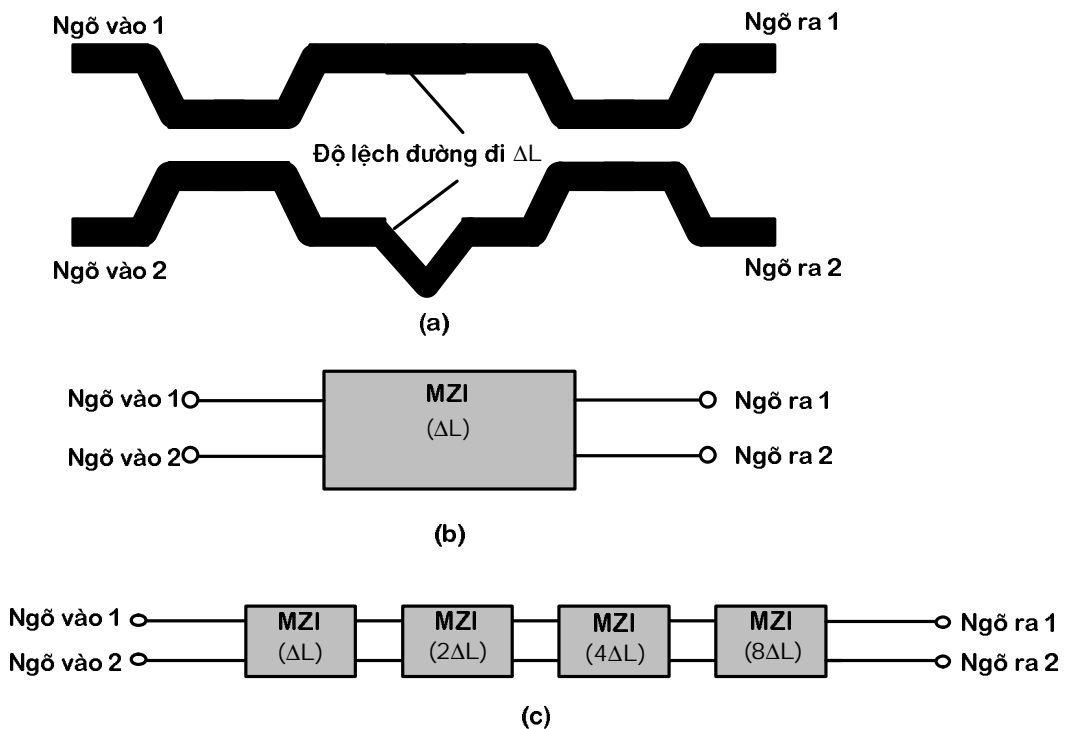
Bộ lọc TFMF có nhiều ưu điểm như: hàm truyền đạt có đỉnh bằng phẳng, độ dốc cao, thiết bị hoạt động ổn định với nhiệt độ, suy hao thấp và ít bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi trạng thái phân cực của tín hiệu nên hiện nay bộ lọc loại này được ứng dụng rộng rãi. Một ứng dụng tiêu biểu nhất là tạo bộ tách bước sóng (DEMUX), thực hiện với 8 bước sóng, như minh họa trên hình 1.25.

h) Bộ lọc Mach-Zehnder

Định nghĩa

Bộ lọc Mach-Zehnder là một loại giao thoa kế. Sóng đi vào bộ lọc được phân thành nhiều đường khác nhau, sau đó cho giao thoa với nhau. MZI thường được sản xuất dựa trên các mạch tích hợp quang và thường gồm các couple 3 dB được nối với nhau bằng các đường có các độ dài khác nhau (hình 1.26).

Hình 1.26: (a) Bộ lọc MZI được tạo thành bằng cách kết nối các coupler định hướng 3 dB. (b) Sơ đồ khối của MZI. ΔL là độ lệch về đường đi giữa hai nhánh (c) Sơ đồ khối của MZI bốn tầng sử dụng các bước sóng khác nhau ở mỗi tầng.



Nguyên lý hoạt động

Trên hình (1.26), giả sử tín hiệu đi vào ngõ số 1, sau bộ coupler đầu tiên, công suất được chia đều ở hai ngõ ra nhưng có độ lệch pha $\pi/2$. Độ lệch về đường đi ΔL làm cho độ lệch pha tăng thêm $\beta\Delta L$ ở nhánh dưới. Tại coupler thứ hai, tín hiệu ở

nhánh dưới đi vào nhánh trên và lại trễ hơn nhánh trên là $\pi/2$. Độ lệch pha tương đối tổng cộng ở nhánh trên là $\pi/2 + \beta\Delta L + \pi/2$. Tương tự tín hiệu từ nhánh trên đi vào nhánh dưới ở nhánh dưới thì độ lệch pha tương đối tổng cộng là $\pi/2 + \beta\Delta L - \pi/2 = \beta\Delta L$. Nếu $\beta\Delta L = k\pi$ với k là lẻ thì các tín hiệu ở ngõ ra thứ nhất được cộng đồng pha còn ở ngõ ra thứ hai sẽ triệt tiêu lẫn nhau do ngược pha. Do đó tín hiệu sẽ được truyền vào từ ngõ vào thứ nhất ra ngõ ra thứ nhất. Nếu k chẵn thì tín hiệu sẽ truyền từ ngõ vào thứ nhất đến ngõ ra thứ hai.

Hàm truyền đạt công suất trong trường hợp chỉ có ngõ vào 1 là tích cực:

$$\begin{pmatrix} T_{11}(f) \\ T_{12}(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^2(\beta\Delta L/2) \\ \cos^2(\beta\Delta L/2) \end{pmatrix} \quad (1.60)$$

Trên thực tế, để tăng độ dốc của hàm truyền đạt công suất, bộ lọc Mach-Zehnder thường được mắc nối tiếp với nhau. Tuy nhiên, nếu mắc nối tiếp nhiều bộ lọc sẽ dẫn đến suy hao thêm vào tăng.

Bộ lọc Mach-Zehnder có thể điều chỉnh được

Bộ lọc Mach-Zehnder có thể điều chỉnh được có cấu trúc đối xứng giữa 2 nhánh trên và nhánh dưới của ống dẫn sóng. Điều chỉnh bước sóng hoạt động bằng cách điều chỉnh chiết suất tương đối của một nhánh. Phương pháp thay đổi chiết suất tương đối có thể là dùng nhiệt hoặc tạo ống dẫn sóng bằng các chất điện-từ (chẳng hạn như LiNbO_3), sau đó áp điện áp lên để làm thay đổi chiết suất tương đối của chất đó.

Ứng dụng của bộ lọc Mach-Zehnder

Bộ lọc Mach-Zehnder thường được ứng dụng để chế tạo các bộ ghép/tách kênh. Xét trường hợp MZI đơn. Với ΔL cố định, ngõ vào 1 tích cực, MZI sẽ đóng vai trò là bộ tách kênh 1×2 nếu các bước sóng được chọn trùng với các đỉnh của hàm truyền đạt. Cụ thể nếu $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ thì bước sóng ngõ vào λ_i phải được chọn sao cho $n_{\text{eff}}\Delta L/\lambda_i = m_i/2$ với m_i là số nguyên dương. Nếu m_i là lẻ thì λ_i sẽ xuất hiện ở ngõ ra thứ nhất vì hàm truyền đạt công suất trong trường hợp này là $\sin^2(m_i\pi/2) = 1$, còn nếu m_i là chẵn thì λ_i sẽ xuất hiện ở ngõ ra thứ hai vì hàm truyền đạt công suất trong trường hợp này là $\cos^2(m_i\pi/2) = 1$. Vì MZI là thiết bị thuận nghịch nên khi các ngõ vào và ra đổi chỗ cho nhau nó sẽ là một bộ ghép kênh 2×1 . Để có bộ tách kênh $1 \times n$ với n là lũy thừa của 2 cần nối chuỗi $(n-1)$ MZI (hình 1.26c). Tuy nhiên so với TFMF thì chuỗi MZI có chất lượng kém hơn: dải thông không phẳng và vùng chuyển tiếp không dốc. Các bộ ghép/tách kênh dung lượng cao hơn thường dùng công nghệ tiên tiến hơn mà ta sẽ xét ở phần sau.

i) Bộ lọc cách tử ống dẫn sóng ma trận (AWG)

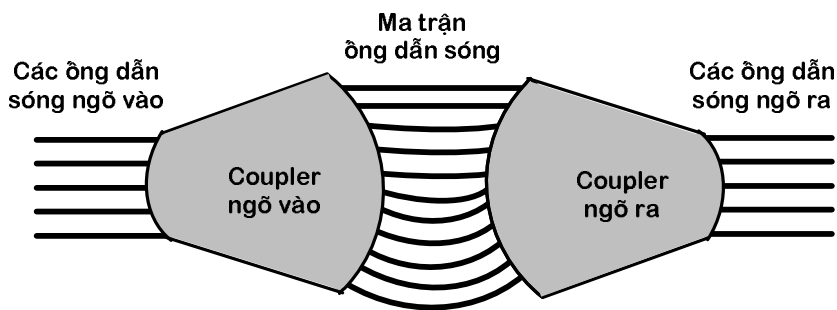
Định nghĩa

AWG là trường hợp tổng quát của bộ lọc giao thoa Mach-Zehnder (hình 1.27). Bộ lọc này bao gồm hai bộ coupler nhiều cổng (multiport coupler) được kết nối với

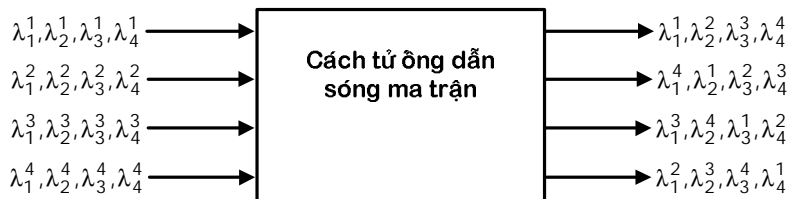
nhau bằng một ma trận ống dẫn sóng (array of waveguides). AWG có thể được xem như là một thiết bị ở đó một tín hiệu được nhân bản lên thành một loạt các tín hiệu với các độ lệch pha tương đối khác nhau rộng được cộng lại với nhau.

AWG có thể được sử dụng như là bộ ghép/tách kênh 1xn. So với chuỗi MZI, AWG có tổn hao thấp, dải thông phẳng và dễ dàng được sản xuất dựa trên các mạch quang tổ hợp (integrated optic substrate). AWG còn có thể được sử dụng như là một bộ kết nối chéo bước sóng (wavelength crossconnect). Tuy nhiên bộ kết nối chéo trong trường hợp này không có khả năng tự định tuyến (xem hình 1.28).

Hình 1.27 Cách tử ống dẫn sóng ma trận



Hình 1.28 Mẫu bộ kết nối chéo được tạo từ AWG



Nguyên lý hoạt động

Xem xét AWG trên hình (1.27). Số ngõ vào và ngõ ra của AWG là n . Coupler thứ nhất có kích thước là $n \times m$, còn coupler thứ hai có kích thước là $m \times n$. Hai coupler này được nối với nhau bằng m ống dẫn sóng, được gọi là các ống dẫn sóng dạng ma trận. Độ dài của các ống dẫn sóng được chọn sao cho độ lệch về chiều dài giữa hai ống dẫn sóng kế cận là ΔL . Coupler đầu tiên chia tín hiệu thành m phần. Độ lệch pha giữa các phần này phụ thuộc vào khoảng cách mà tín hiệu từ ngõ vào đến một ống dẫn sóng.

Kí hiệu d_{ik}^{in} là độ lệch về đường đi (tương đối với bất kỳ một ống dẫn sóng ngõ vào nào và bất kỳ một ống dẫn sóng ma trận nào) giữa ống dẫn sóng ngõ vào i và ống dẫn sóng ma trận k . Giả sử rằng ống dẫn sóng ma trận k có độ dài đường dẫn

lớn hơn ống dẫn sóng k-1 một khoảng ΔL . Tương tự kí hiệu d_{ik}^{out} là độ lệch về đường đi (tương đối với bất kỳ một ống dẫn sóng ma trận nào và bất kỳ một ống dẫn sóng ngõ ra nào) giữa ống dẫn sóng ma trận k và ống dẫn sóng ngõ ra j. Khi đó pha tương đối của các tín hiệu từ ngõ vào i đến ngõ ra j đi qua m đường khác nhau được cho bởi:

$$\phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_{ik}^{in} + n_2 k \Delta L + n_1 d_{kj}^{out}), \quad k = 1, \dots, m \quad (1.61)$$

Ở đây n_1 là chiết suất khúc xạ của các coupler ngõ vào và ngõ ra, n_2 là chiết suất khúc xạ của các ống dẫn sóng ma trận. Từ ngõ vào i, những bước sóng λ làm cho ϕ_{ijk} khác nhau một bội số của 2π thì sẽ được cộng đồng pha tại ngõ ra j.

Giả sử các coupler ngõ vào và ngõ ra được thiết kế sao cho:

$$\begin{aligned} d_{ik}^{in} &= d_i^{in} + k \delta_i^{in} \\ d_{ik}^{out} &= d_i^{out} + k \delta_i^{out} \end{aligned} \quad (1.62)$$

thì pha tương đối của các tín hiệu có thể viết lại như sau:

$$\phi_{ijk} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 d_i^{in} + n_1 d_j^{out}) + \frac{2\pi k}{\lambda} (n_1 \delta_i^{in} + n_2 \Delta L + n_1 \delta_j^{out}), \quad k = 1, \dots, m \quad (1.63)$$

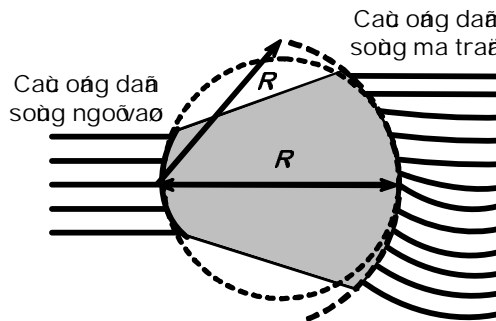
Cấu trúc này được gọi là cấu trúc vòng Rowland (hình 1.29).

Nếu bước sóng λ ở ngõ vào i thỏa mãn điều kiện:

$$n_1 \delta_i^{in} + n_2 \Delta L + n_1 \delta_j^{out} = p \lambda \quad (1.64)$$

với p là một số nguyên dương thì sẽ được cộng đồng pha ở ngõ ra j.

Hình 1.29 Vòng Rowland dùng để tạo các coupler cho AWG



Đối với trường hợp AWG sử dụng như một bộ tách kênh thì tất cả các bước sóng được đưa đến cùng một ngõ vào i. Do đó nếu các bước sóng $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ của hệ thống WDM thỏa mãn điều kiện:

$$n_1 \delta_i^{in} + n_2 \Delta L + n_1 \delta_j^{out} = p \lambda_j \quad (1.65)$$

cho một p nào đó thì các bước sóng này sẽ được tách bởi AWG. Lưu ý δ_i^{in} và ΔL cần thiết để xác định chính xác tổ hợp các bước sóng được phân kênh, khoảng cách tối thiểu giữa các bước sóng không phụ thuộc vào hai tham số đó mà chủ yếu phụ thuộc vào d_j^{out} .

Nếu có bước sóng λ_j' thỏa mãn điều kiện:

$$n_1 \delta_i^{\text{in}} + n_2 \Delta L + n_1 \delta_j^{\text{out}} = (p+1) \lambda_j' \quad (1.66)$$

thì cả hai bước sóng λ_j và λ_j' đều được tách ra ở ngõ ra j . Như vậy AWG có đáp ứng tuần hoàn và tất cả các bước sóng phải cùng nằm trong một FSR.

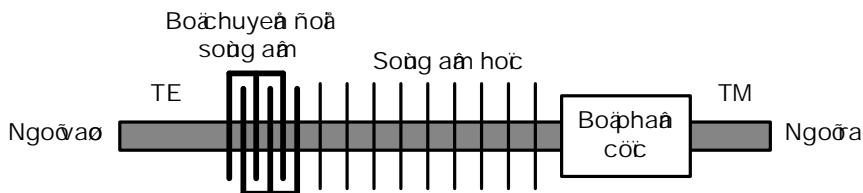
j) Bộ lọc quang – âm điều chỉnh được (AOTF)

Định nghĩa

Bộ lọc quang-âm AOTF (Acousto-Optic Tunable) là tiêu biểu cho họ thiết bị mà công nghệ chế tạo kết hợp giữa âm thanh và ánh sáng. Dùng sóng âm thanh để tạo cách tử Bragg trong ống dẫn sóng, các cách tử này thực hiện chức năng lựa chọn bước sóng. Trong điều kiện công nghệ hiện tại, bộ lọc AOTF là một trong những thiết bị duy nhất có khả năng điều chỉnh để lựa chọn nhiều bước sóng cùng một lúc. Khả năng này giúp cho bộ lọc là linh kiện chủ chốt chế tạo các bộ kết nối chéo bước sóng.

Nguyên lý hoạt động

Hình 1.30 Một AOTF đơn giản.



Xem ví dụ của một AOTF trên hình 1.30. AOTF là một ống dẫn sóng được tạo thành từ vật liệu khúc xạ kép và chỉ hỗ trợ các mode TE và TM bậc thấp nhất (ví dụ làm bằng Ti trên nền LiNbO_3). Giả sử năng lượng ánh sáng ngõ vào là TE mode. Bộ phân cực ngõ vào (input polarizer) chỉ chọn năng lượng ánh sáng trong mode TM được bố trí ở 2 đầu cuối của ống dẫn sóng.

Bộ tạo sóng âm (Acoustic transducer) tạo ra sóng âm bề mặt SAW (Surface Acoustic Wave) lan truyền dọc theo hoặc ngược chiều với hướng truyền dẫn của ánh sáng. Kết quả của sự lan truyền này là mật độ của môi trường thay đổi một cách tuần hoàn. Chu kỳ của sự thay đổi mật độ này bằng với bước sóng của sóng âm. Sự thay đổi mật độ một cách tuần hoàn này đóng vai trò như là một cách tử Bragg.

Nếu các hệ số chiết suất n_{TE} và n_{TM} của các mode TE và TM thỏa điều kiện Bragg:

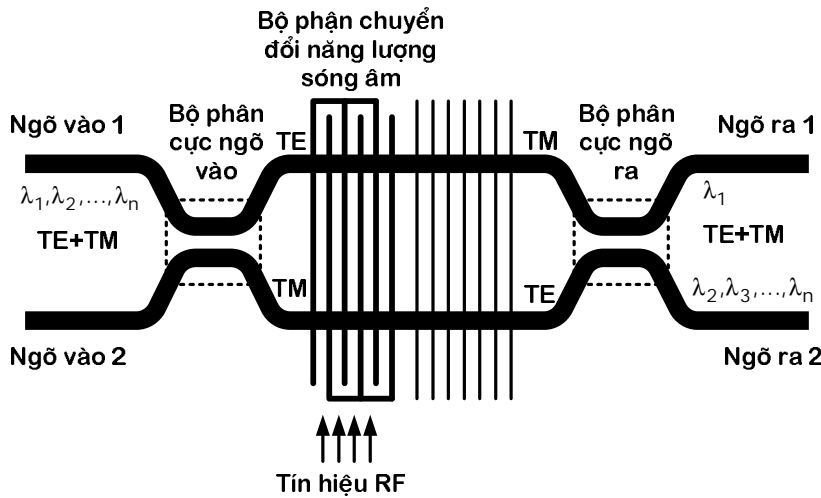
$$\frac{n_{TM}}{\lambda} = \frac{n_{TE}}{\lambda} \pm \frac{1}{\Lambda} \tag{1.67}$$

thì ánh sáng sẽ được ghép từ một mode này đến một mode khác. Năng lượng ánh sáng trong một dải phổ hẹp xung quanh bước sóng λ thỏa điều kiện phản xạ Bragg sẽ bị chuyển đổi từ TE sang TM mode. Như vậy thiết bị này đóng vai trò như một bộ lọc băng hẹp khi ở ngõ vào chỉ có năng lượng ánh sáng trong mode TE và ở ngõ ra chỉ có năng lượng ánh sáng trong mode TM là được chọn (xem hình 1.30).

Trong $LiNbO_3$, mode TE và TM có độ chênh lệch về chiết suất $\Delta n = 0.07$. Điều kiện phản xạ Bragg có thể viết lại:

$$\lambda = \Lambda(\Delta n) \tag{1.68}$$

Hình 1.31 Bộ lọc quang-âm có thể điều chỉnh được AOTF (Acousto-optic Tunable Filter).



Với một bước sóng âm học Λ thích hợp AOTF có thể chọn ra bước sóng λ phù hợp. Ví dụ để chọn được bước sóng $\lambda = 1550 \text{ nm}$ với $\Delta n = 0.07$ thì bước sóng âm học vào khoảng $\Lambda = 22\mu\text{m}$. Vận tốc âm thanh trong $LiNbO_3$ là 3.75 km/s do đó tần số RF sẽ là khoảng 170 MHz . Bộ AOTF trên hình 1.30 là thiết bị phụ thuộc vào phân cực. Hình 1.31 là AOTF không phụ thuộc vào phân cực.

Hàm truyền đạt công suất

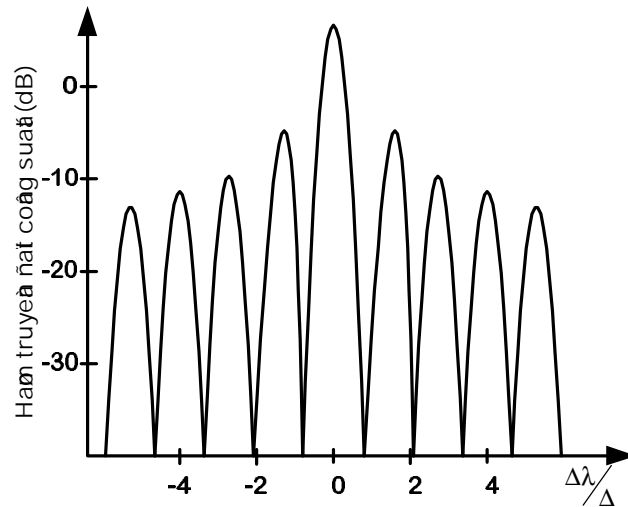
$$T(I) = \frac{\sin^2\left(\left(\frac{p}{2}\right)\sqrt{1 + (2\Delta I / \Delta)^2}\right)}{1 + (2\Delta I / \Delta)^2} \tag{1.69}$$

Với: $-\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ với λ_0 là bước sóng thỏa điều kiện Bragg;

- $\Delta = \lambda_0^2 / l \Delta n$ số đo độ rộng dải thông của bộ lọc với l là chiều dài của bộ lọc.

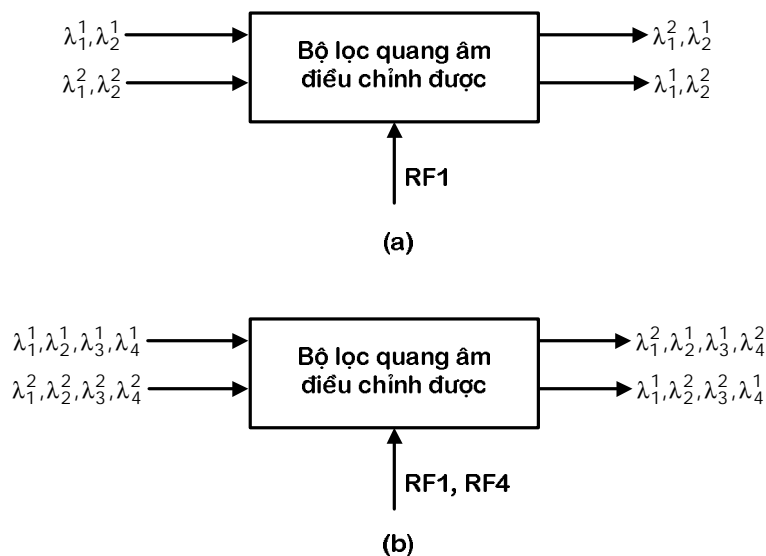
Hàm truyền đạt được vẽ trên hình (1.32). Như vậy l quyết định độ rộng của dải thông. Có thể chứng minh được $\text{FWHM} \approx 0.8\Delta$. Như vậy bộ lọc càng dài dải thông càng hẹp. Tuy nhiên lưu ý rằng tốc độ hiệu chỉnh cũng tỉ lệ thuận với l vì tốc độ này được xác định bởi thời gian cần thiết để sóng âm truyền qua hết chiều dài của bộ lọc.

Hình 1.32 Hàm truyền đạt công suất của bộ lọc AOTF



Ứng dụng của bộ lọc AOTF

Hình 1.33 Bộ kết nối chéo bước sóng được tạo từ các bộ lọc AOTF



AOTF là bộ kết nối chéo bước sóng. Nếu cấp cho AOTF nhiều sóng âm học đồng thời thì nhiều bước sóng quang có thể thỏa điều kiện Bragg đồng thời. Do đó với một AOTF có thể thực hiện việc hoán đổi các bước sóng giữa hai cổng một cách đồng thời (hình 1.33 b). Như vậy AOTF có thể thực hiện việc định tuyến bước sóng động dễ dàng bằng thay đổi bước sóng âm học. Tuy nhiên AOTF khó có ứng dụng nhiều trên thực tế vì nhiễu xuyên kênh lớn đồng thời để có khoảng cách kênh hẹp cho DWDM thì AOTF phải có chiều dài lớn nên khó sản xuất.

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 bị 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 3. *Bộ lọc quang*) 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 nên phần này ta sẽ không đi sâu vào công nghệ chế tạo nữa.

a) Định nghĩa

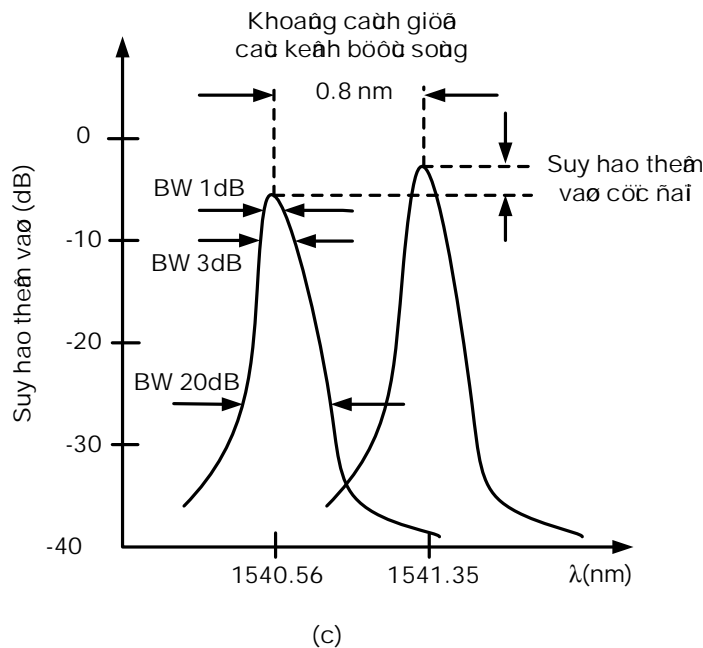
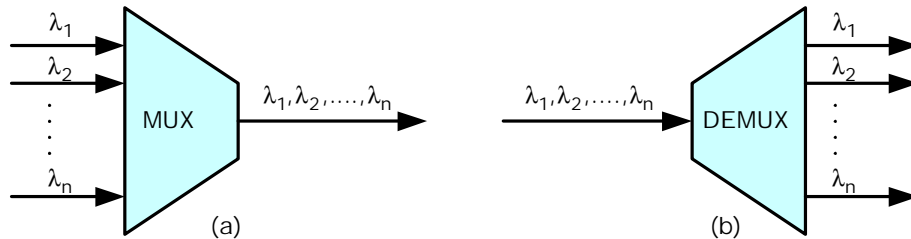
Nguyên lý hoạt động của bộ MUX/DEMUX cũng tương tự như bộ Coupler. Tuy nhiên, bộ Coupler/Splitter thực hiện ghép tách tín hiệu có cùng bước sóng, còn bộ MUX/DEMUX thực hiện ghép tách tín hiệu ở các bước sóng khác nhau. Sơ đồ khối bộ MUX/DEMUX cho trong hình 1.34 (a) và (b).

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: là 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: là 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 họa trên hình 1.34 (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.

Hình 1.34 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

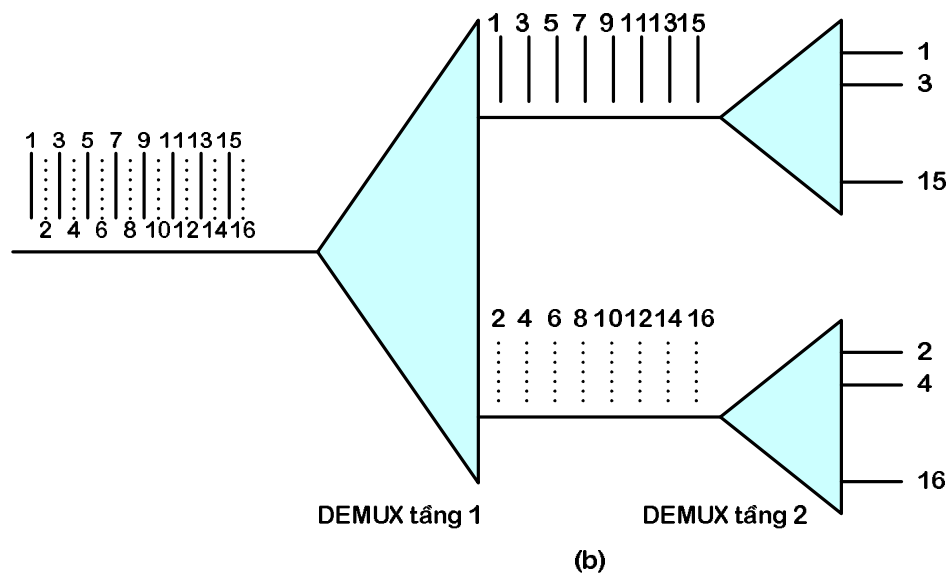
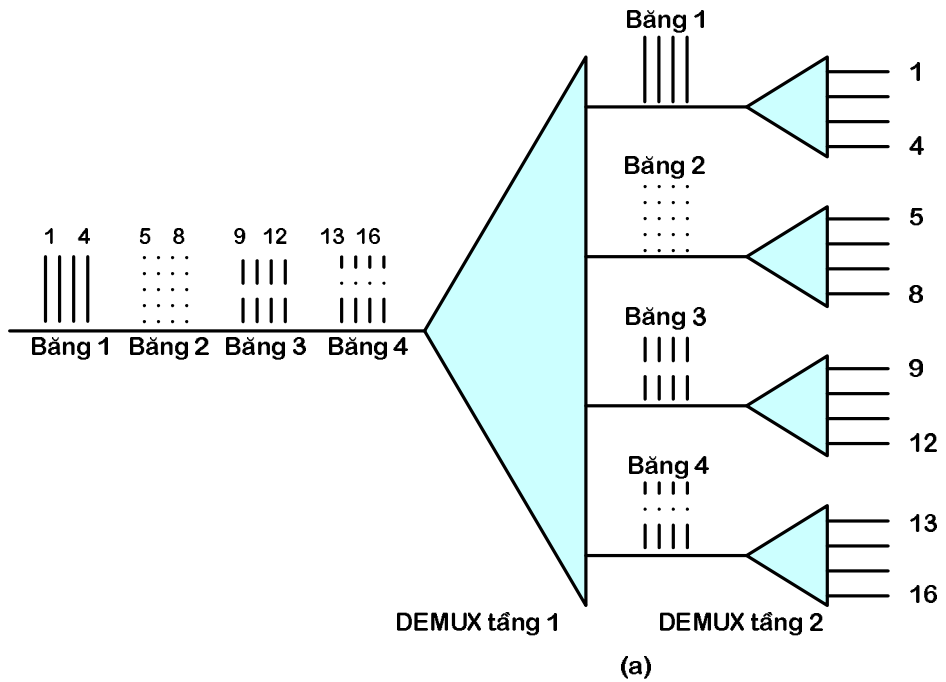
Nhu cầu về dung lượng ngày càng cao trong khi công nghệ chế tạo sợi quang vẫn còn những giới hạn nhất định, làm hạn chế tốc độ truyền dẫn một kênh bước sóng. Điều đó đòi hỏi phải tăng số lượng kênh bước sóng truyền trên một sợi quang, có nghĩa là số lượng kênh mà bộ MUX/DEMUX xử lý phải tăng lên. Trong 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 1.35.

- 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.
- 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.

Hình 1.35 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 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 (hình 1.27).
- 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.

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 1.35 (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 môđun 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, lẻ 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 1.35 (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.

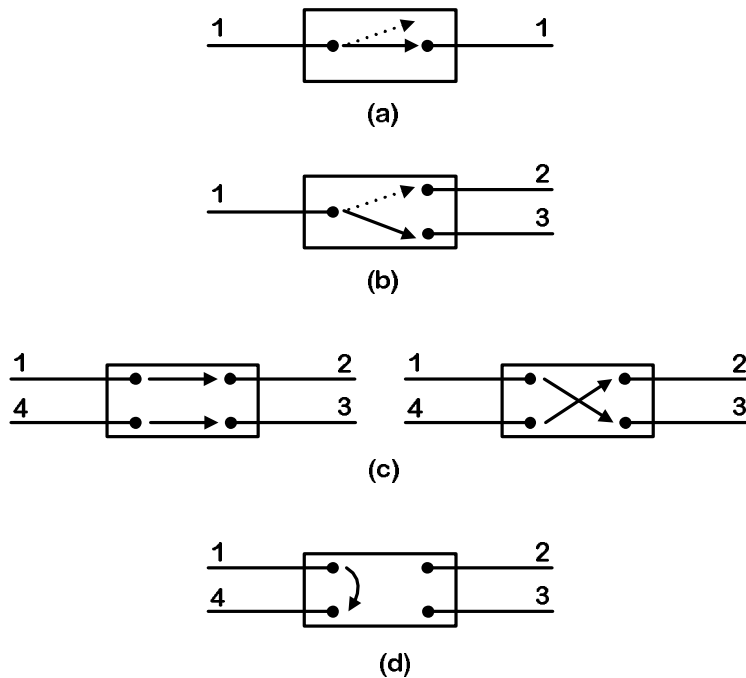
5. Bộ chuyển mạch quang

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 1.36(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 2.3(b)). Cấu hình chuyển mạch 1x2 trong hình 1.36(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 1.36(c)). Thuật ngữ không ngẽn dùng để chỉ một bộ chuyển mạch có thể kết

nổi bất kỳ ngõ vào đến bất kỳ ngõ ra. Hình 1.36(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 1.36 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.

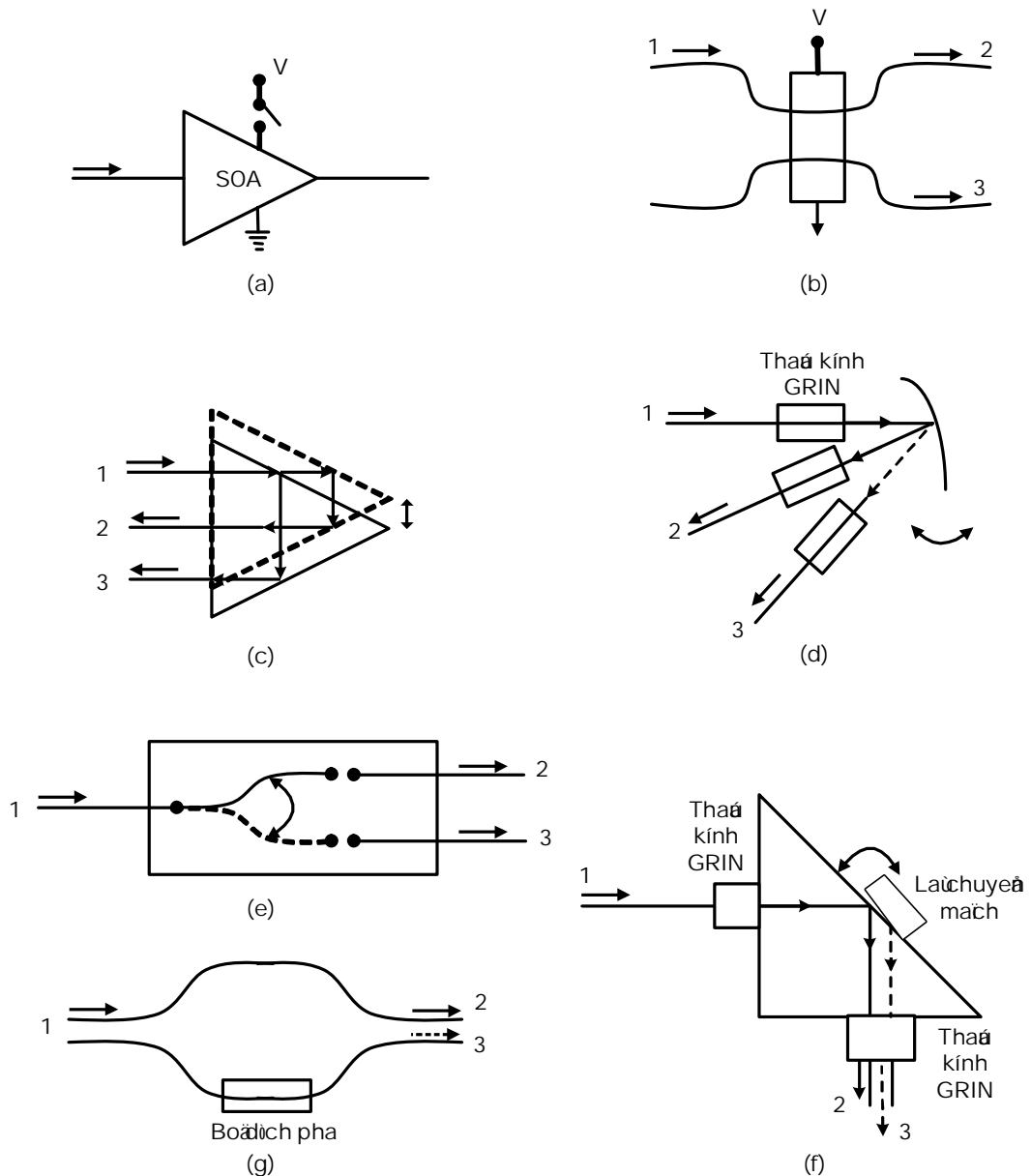


Nhiều ví dụ đơn giản về các ứng dụng của bộ chuyển mạch khẳng định tầm quan trọng của các bộ chuyển mạch trong hệ thống thông tin sợi quang như sau:

- 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 khóa (latching) hoặc không khóa (nonlatching). Loại khóa sẽ giữ nguyên trạng thái (vị trí) của chuyển mạch nếu nguồn bị mất.

Hình 1.37 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.



Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn điển hình thường dựa trên: điện-quang, quang cơ học, nhiệt quang. Hình 1.37 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 1.37(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 1.37(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 LiNbO₃ để chế tạo lớp trên cùng của bộ ghép vì LiNbO₃ 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 1.37(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 1.37(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 1.37(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 (FTIR- Frustration of Total Internal Reflection) được ứng dụng để chế tạo bộ chuyển mạch được trình bày trong hình 1.34(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. Do đó, bằng cách di chuyển lá chuyển mạch hướng tới lăng kính, ta có thể định hướng tín hiệu ánh sáng sang 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 1.37(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): là 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): là 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 ps. 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 hóa 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, thì 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 tùy 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, khi thiết kế một khối chuyển mạch dung lượng lớn thì không thể cùng lúc đạt được sự tối ưu đối với tất cả các thông số kể trên. Tùy thuộc vào ứng dụng của khối chuyển mạch trên thực tế một thông số có thể được ưu tiên hơn các thông số khác.

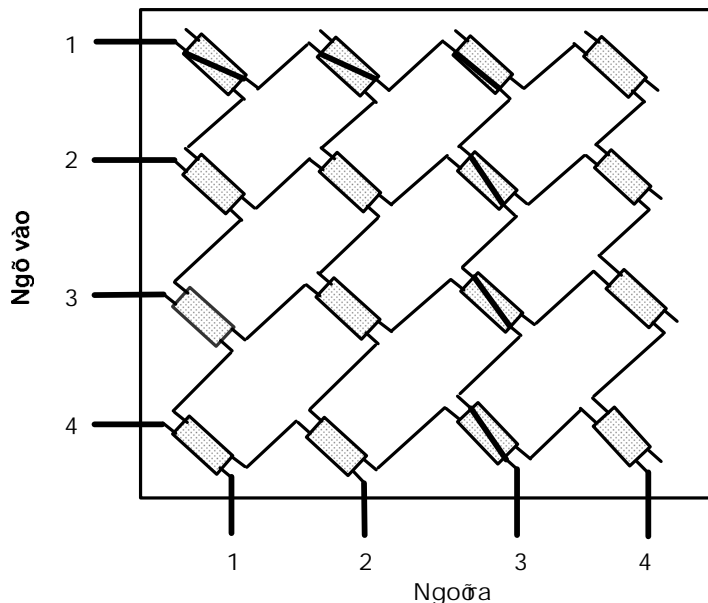
Bảng 1.2 trình bày sự so sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau, trong đó cấu trúc Spanke dùng các bộ chuyển mạch $1 \times n$, các cấu trúc còn lại đều hình thành từ bộ chuyển mạch 2×2 .

Bảng 1.2 So sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau.

	Loại không ngăn	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	$\frac{n}{2}$

Cấu trúc Crossbar

Hình 1.38 Khối chuyển mạch 4×4 dùng 16 bộ chuyển mạch 2×2 .



Hình 1.38 trình bày cấu trúc của khối chuyển mạch crossbar 4×4 . Khối chuyển mạch này dùng 16 phần tử chuyển mạch 2×2 và các kết nối giữa ngõ vào và ngõ ra được thực hiện bằng cách bố trí thích hợp các phần tử chuyển mạch 2×2 . Ví dụ, để kết nối giữa ngõ vào 1 và ngõ ra 3, cần phải sắp xếp các phần tử chuyển mạch 2×2

như trong hình 1.38. Còn nhiều đường dẫn khác để đi từ ngõ vào 1 đến ngõ ra 3 nhưng đường dẫn trong hình là đường dẫn thích hợp nhất được chọn dựa trên thuật toán định tuyến sử dụng trong khối chuyển mạch.

Cấu trúc crossbar là cấu trúc của loại chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng (wide-sense). Để kết nối từ ngõ vào i đến ngõ ra j , đường dẫn được chọn sẽ đi qua các phần tử chuyển mạch 2×2 trên hàng i cho đến khi nó đi đến cột j , sau đó đi qua các phần tử chuyển mạch trên cột j cho đến khi nó đi đến ngõ ra j . Do đó, các phần tử chuyển mạch trên đường dẫn này ở hàng i và cột j phải được đặt ở các vị trí thích hợp để có thể tạo ra kết nối này. Theo quy tắc định tuyến kết nối như trên thì khối chuyển mạch sẽ không bị nghẽn và không yêu cầu phải định tuyến lại các kết nối đang tồn tại.

Tóm lại, một cấu trúc crossbar $n \times n$ cần phải có n^2 phần tử chuyển mạch 2×2 . Chiều dài đường dẫn ngắn nhất là 1 và chiều dài đường dẫn dài nhất là $2n-1$ và đây là một trong những nhược điểm chính của cấu trúc crossbar. Chuyển mạch này luôn tồn tại các điểm nối chéo nhau.

Cấu trúc Clos

Cấu trúc Clos là loại chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa hẹp (strict-sense nonblocking) và được sử dụng rộng rãi trong thực tế để xây dựng các khối chuyển mạch có với số lượng cổng rất lớn. Hình 1.39 trình bày cấu trúc chuyển mạch Clos ba tầng có 1024 cổng. Một khối chuyển mạch được xây dựng như sau: dùng ba tham số là m , k và p . Cho $n = mk$. Tầng đầu tiên và tầng thứ ba có k phần tử chuyển mạch ($m \times p$). Tầng thứ hai (tầng giữa) có p phần tử chuyển mạch ($k \times k$). Mỗi phần tử trong số k phần tử chuyển mạch của tầng đầu tiên được kết nối với tất cả các phần tử chuyển mạch của tầng thứ hai, mỗi phần tử chuyển mạch của tầng đầu tiên có p ngõ ra, mỗi ngõ ra được kết nối với một ngõ vào của từng phần tử chuyển mạch khác nhau của tầng thứ hai. Tương tự như thế, mỗi phần tử trong số k phần tử chuyển mạch của tầng thứ ba được kết nối với tất cả các phần tử chuyển mạch của tầng thứ hai. Trường hợp $p \geq 2m-1$, thì khối chuyển mạch loại này hoàn toàn không bị nghẽn.

Để tối thiểu hóa chi phí của khối chuyển mạch, chọn $p = 2m-1$. Thông thường, từng khối chuyển mạch riêng trong mỗi tầng là các khối chuyển mạch crossbar. Do đó, mỗi bộ chuyển mạch $m \times (2m-1)$ cần $m(2m-1)$ phần tử chuyển mạch 2×2 và mỗi bộ chuyển mạch ($k \times k$) trong tầng thứ hai cần k^2 phần tử chuyển mạch 2×2 . Tổng số phần tử chuyển mạch cần thiết là:

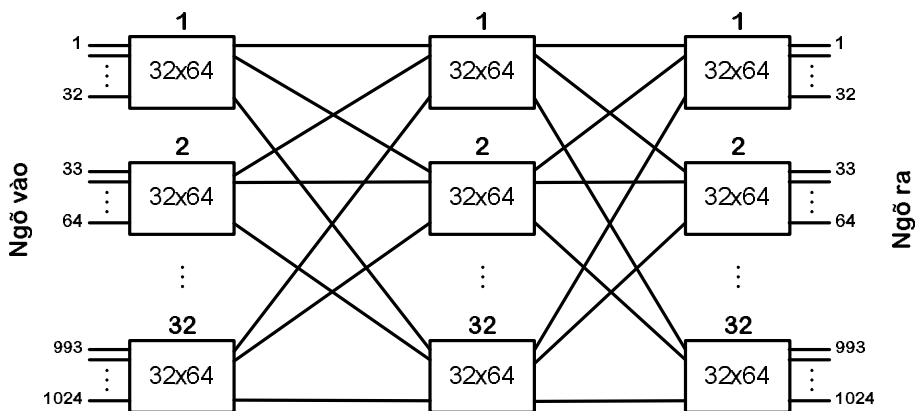
$$2km(2m-1) + (2m-1)k^2$$

với $k = n/m$, thì số phần tử chuyển mạch sẽ đạt tối thiểu khi $m \approx \sqrt{\frac{n}{2}}$.

Dùng giá trị này của m ta tìm được số phần tử chuyển mạch cần cho cấu hình có chi phí thấp nhất phải là $4\sqrt{2n}^{3/2} - 4n$. Giá trị này rất nhỏ hơn so với giá trị n^2 của cấu trúc crossbar.

Cấu trúc Clos có nhiều ưu điểm thích hợp với cấu tạo của các khối chuyển mạch đa tầng. Tính đồng nhất suy hao giữa các kết nối ngõ vào/ra khác nhau lớn hơn và số lượng các phần tử chuyển mạch cũng nhỏ hơn rất nhiều so với cấu trúc crossbar.

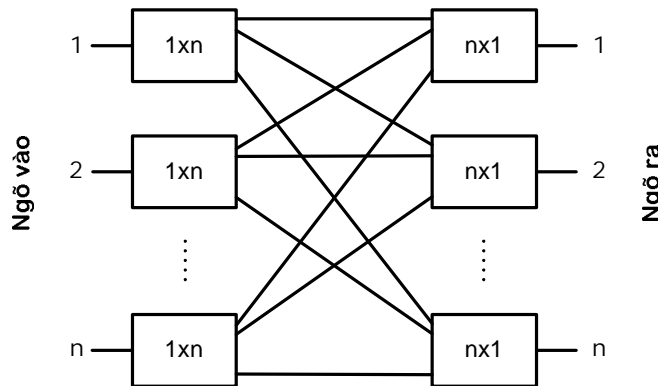
Hình 1.39 Khối chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa hẹp (strict-sense) 1024×1024 sử dụng các kết nối giữa bộ chuyển mạch 32×64 và 32×32 trong cấu trúc Clos có 3 tầng.



Cấu trúc Spanke

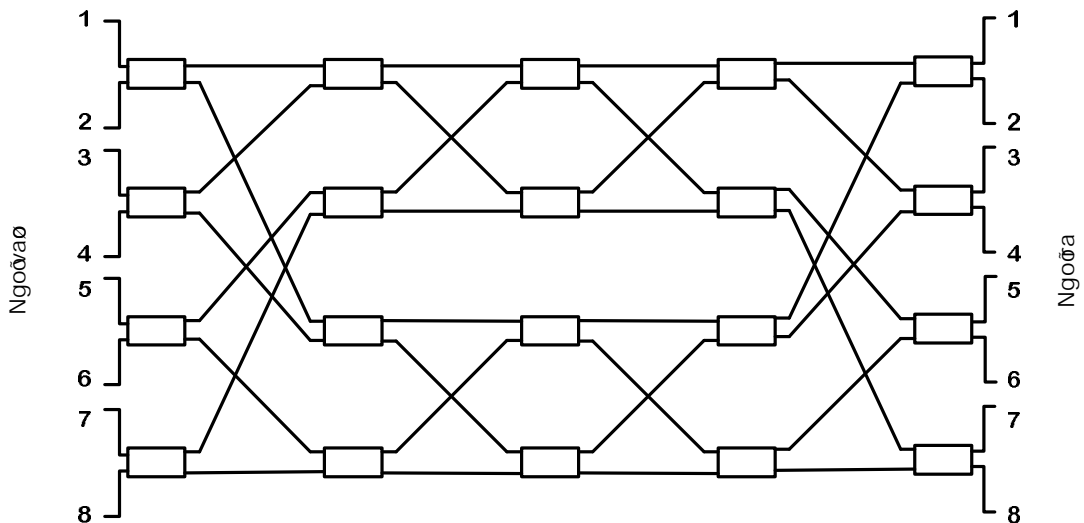
Hình 1.40 trình bày cấu trúc Spanke đang được ứng dụng rộng rãi cho các khối chuyển mạch lớn. Một khối chuyển mạch $n \times n$ được tạo ra bằng cách kết nối n phần tử chuyển mạch $1 \times n$ với n phần tử chuyển mạch $n \times 1$. Cấu trúc Spanke là cấu trúc không nghẽn theo nghĩa hẹp (strict-sense nonblocking). Cho đến nay, tiêu chuẩn để đánh giá chi phí của một khối chuyển mạch vẫn là số lượng phần tử chuyển mạch 2×2 cần thiết để tạo ra khối chuyển mạch đó. Cấu trúc Spanke chiếm ưu thế hơn là ở chỗ, trong nhiều trường hợp, một chuyển mạch quang $1 \times n$ có thể được xây dựng bằng cách sử dụng một phần tử chuyển mạch duy nhất mà không cần phải xây dựng từ các phần tử 1×2 hoặc 2×2 . Phần tử chuyển mạch này ứng dụng công nghệ MEMS. Do đó, chỉ cần $2n$ phần tử chuyển mạch MEMS để xây dựng nên khối chuyển mạch $n \times n$, điều này cũng có nghĩa là chi phí của khối chuyển mạch tỉ lệ với n , đây là một trong những nguyên nhân làm cho cấu trúc Spanke chiếm ưu thế hơn so với các khối chuyển mạch khác. Mặt khác, mỗi kết nối chỉ đi qua hai phần tử chuyển mạch, một con số rất nhỏ so với số phần tử chuyển mạch trong đường dẫn của các cấu trúc đa tầng khác. Hơn nữa, cấu trúc này có thể tạo ra các chiều dài đường dẫn quang giống nhau cho tất cả các kết nối vào/ra để suy hao đều như nhau đối với từng kết nối vào/ra riêng biệt.

Hình 1.40 Chuyển mạch n (n không nguyên theo nghĩa hẹp (strict-sense) sử dụng các kết nối giữa $2n$ phần tử chuyển mạch $1 \times n$ trong cấu trúc Spanke.



Cấu trúc Benes

Hình 1.41 Chuyển mạch nguyên 8×8 sắp xếp lại sử dụng các kết nối giữa 20 phần tử chuyển mạch 2×2 trong cấu trúc Benes.



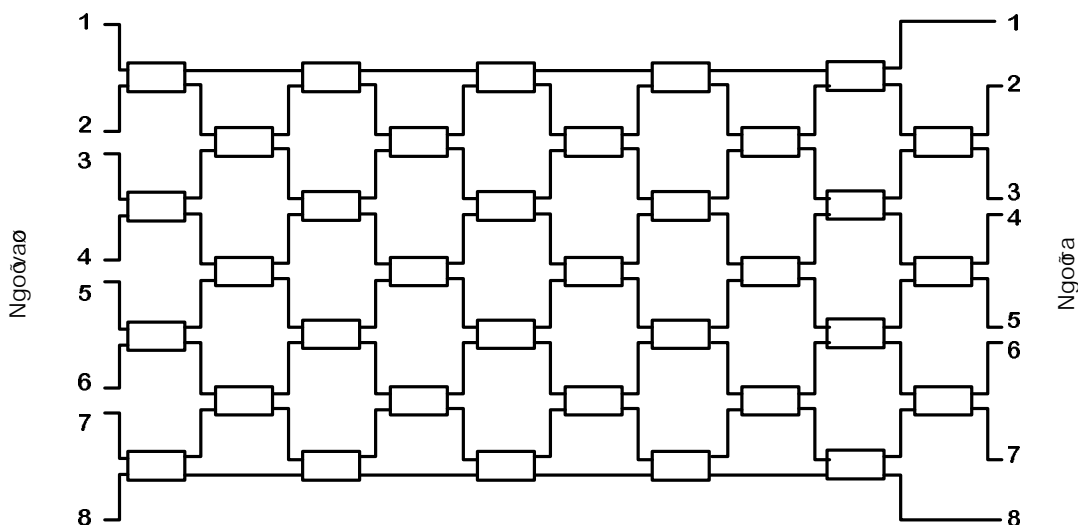
Cấu trúc Benes là cấu trúc chuyển mạch loại không nguyên sắp xếp lại được (rearrangeably nonblocking) và là một trong những cấu trúc hiệu quả nhất về số lượng phần tử chuyển mạch 2×2 được sử dụng để tạo ra các khối chuyển mạch lớn hơn. Hình 1.41 trình bày một khối chuyển mạch không nguyên sắp xếp lại kích thước 8×8 nhưng chỉ cần sử dụng 20 phần tử chuyển mạch 2×2 , nhưng nếu là cấu trúc Crossbar thì phải cần 64 phần tử chuyển mạch 2×2 . Nói chung, cấu trúc chuyển mạch Benes $n \times n$ cần $(n/2)(2\log_2 n - 1)$ phần tử chuyển mạch 2×2 , với n là một số lũy thừa của 2. Trong cấu trúc này, suy hao trên mọi đường dẫn đều bằng nhau- mỗi đường dẫn sẽ đi qua $(2\log_2 n - 1)$ phần tử chuyển mạch 2×2 .

Hai nhược điểm chính của cấu trúc này: thứ nhất, đây không phải là cấu trúc chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng (wide-sense); thứ hai, số lượng điểm giao nhau của các ống dẫn sóng theo yêu cầu làm cho cấu trúc này khó chế tạo trong các mạng quang tích hợp.

Cấu trúc Spanke-Benes

Hình 1.42 trình bày sự kết hợp giữa cấu trúc chuyển mạch Benes và cấu trúc Crossbar, đó là một cấu trúc chuyển mạch 8×8 không nghẽn sắp xếp lại dùng 28 phần tử chuyển mạch 2×2 và không có điểm kết nối chéo giữa các ống dẫn sóng. Cấu trúc này do Spanke và Benes nghiên cứu và được gọi là cấu trúc planar n tầng (cấu trúc ứng dụng công nghệ bán dẫn n tầng) vì nó phải có n tầng (n cột) để thực hiện một khối chuyển mạch $n \times n$. Cấu trúc này cần $n(n-1)/2$ phần tử chuyển mạch, chiều dài đường dẫn ngắn nhất là $n/2$ và chiều dài đường dẫn dài nhất là n , không có các điểm kết nối chéo. Nhược điểm chính của cấu trúc này là nó không phải là cấu trúc không nghẽn theo nghĩa rộng (wide-sense) và suy hao của nó không đồng nhất.

Hình 1.42 Khối chuyển mạch 8×8 không nghẽn có thể sắp xếp lại dùng 28 phần tử chuyển mạch 2×2 và không có điểm kết nối chéo giữa các ống dẫn sóng trong cấu trúc Planar n tầng.



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

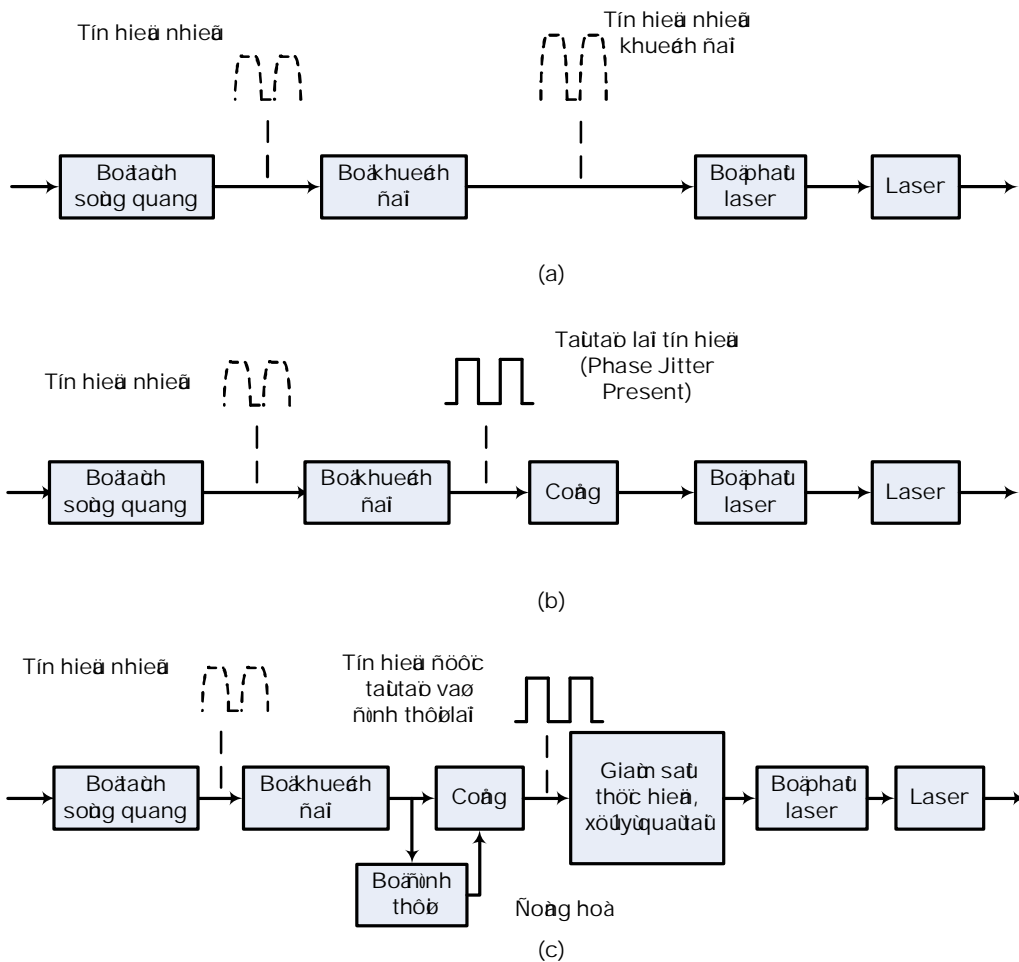
tín hiệu SDH hoạt động với bước sóng 1310 nm có thể truyền trên hệ thống WDM nhờ các bộ chuyển đổi bước sóng đặt ở biên giới giữa mạng WDM và mạng SDH, chuyển đổi tín hiệu từ bước sóng 1310 nm sang tín hiệu tương thích với bước sóng theo qui định ITU-T hoạt động ở vùng 1550 nm.

- 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) Chế tạo bằng phương pháp quang-điện

Hình 1.43 Các loại chuyển đổi bước sóng quang điện: (a) 1R; (b) 2R; (c) 3R

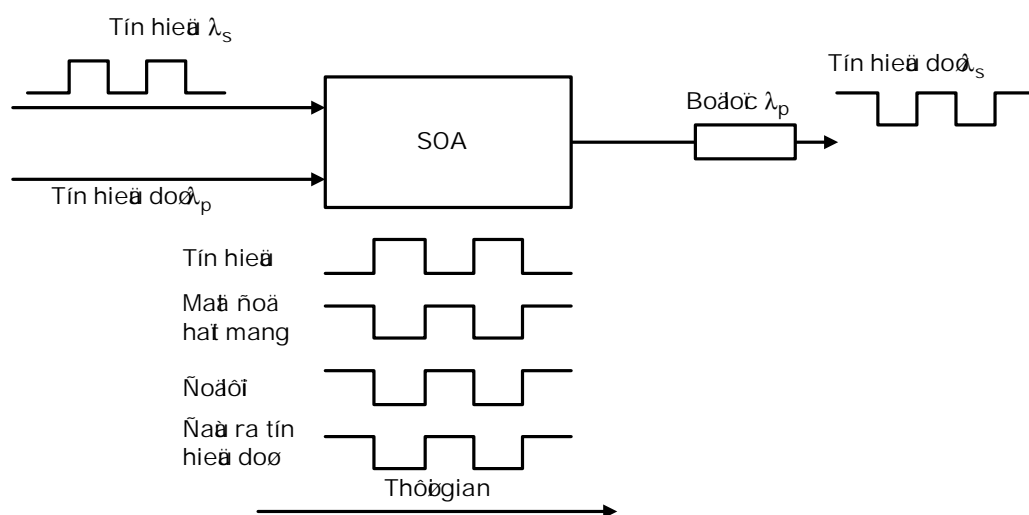


Đây là phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng đơn giản và phổ biến nhất hiện nay. Tín hiệu đầu vào trước hết được chuyển sang dạng tín hiệu điện, tái tạo lại và sau đó được một bộ phát laser phát bước sóng khác. Thường các bộ chuyển đổi bước sóng đầu vào biến đổi, đầu ra cố định dùng phương pháp 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.

b) Chế tạo bằng phương pháp cửa quang

Hình 1.44 Nguyên lý hoạt động của bộ chuyển đổi bước sóng chế tạo theo phương pháp cửa quang.

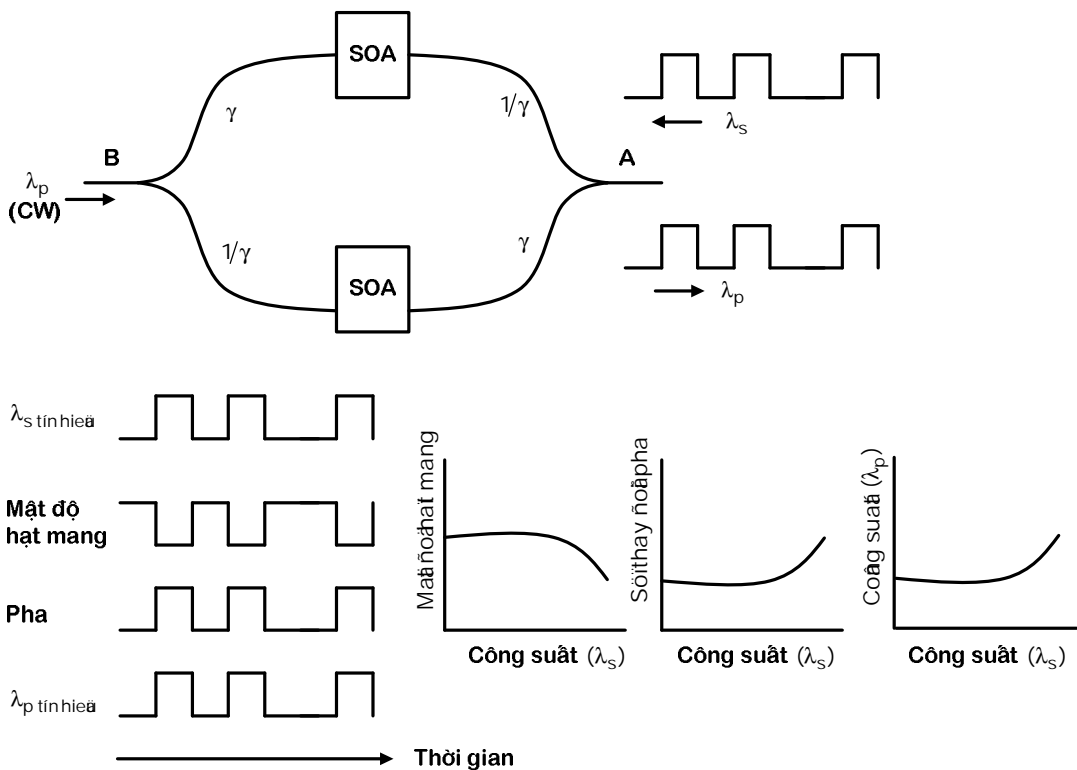


Phương pháp chế tạo các bộ chuyển đổi bước sóng dùng phương pháp cửa quang tận dụng tính chất của một số thiết bị quang có đặc tính đầu ra thay đổi theo

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 tùy 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 họa như trên hình 1.44.

c) **Chế tạo bằng phương pháp giao thoa**

Hình 1.45 Biến đổi bước sóng bằng điều chế xuyên pha sử dụng bộ khuếch đại quang bán dẫn có gắn bộ lọc Mach-Zehnder bên trong.



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 khuếch đại SOA (xem hình 1.45). Tại đầu vào của bộ lọc Mach-Zehnder dùng bộ Coupler tách tín hiệu đi theo hai nhánh

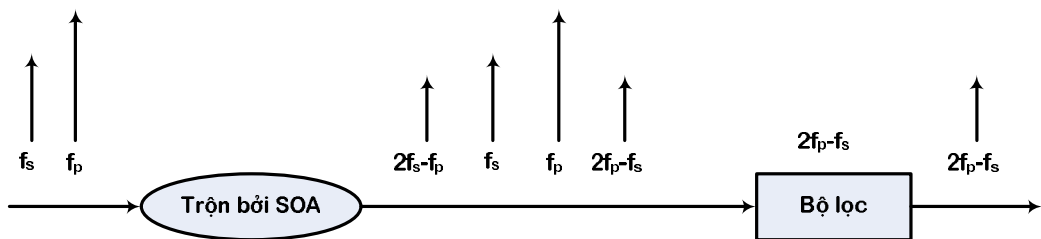
của bộ lọc theo tỉ lệ không đều nhau. Do cường độ tín hiệu đi trên mỗi nhánh không đều nhau nên khi đi qua các bộ SOA sẽ bị dịch pha các lượng không giống nhau. Theo nguyên lý hoạt động của MZI, sự lệch pha giữa hai tín hiệu này được chuyển đến một tín hiệu điều chế biên độ ở đầu ra truyền với bước sóng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

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 1.46 Chuyển đổi bước sóng bằng cách trộn bốn bước sóng trong bộ khuếch đại quang



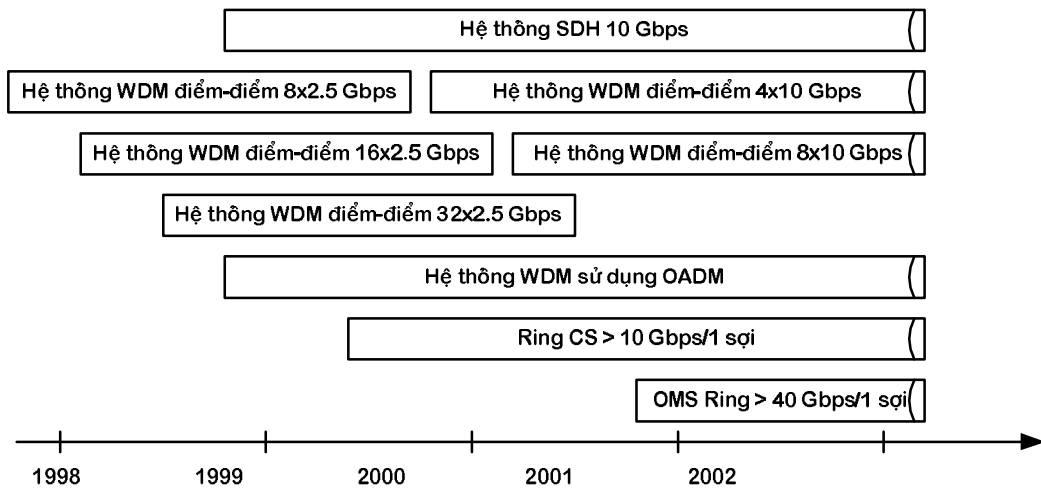
IV. MẠNG WDM

1. Tổng quan

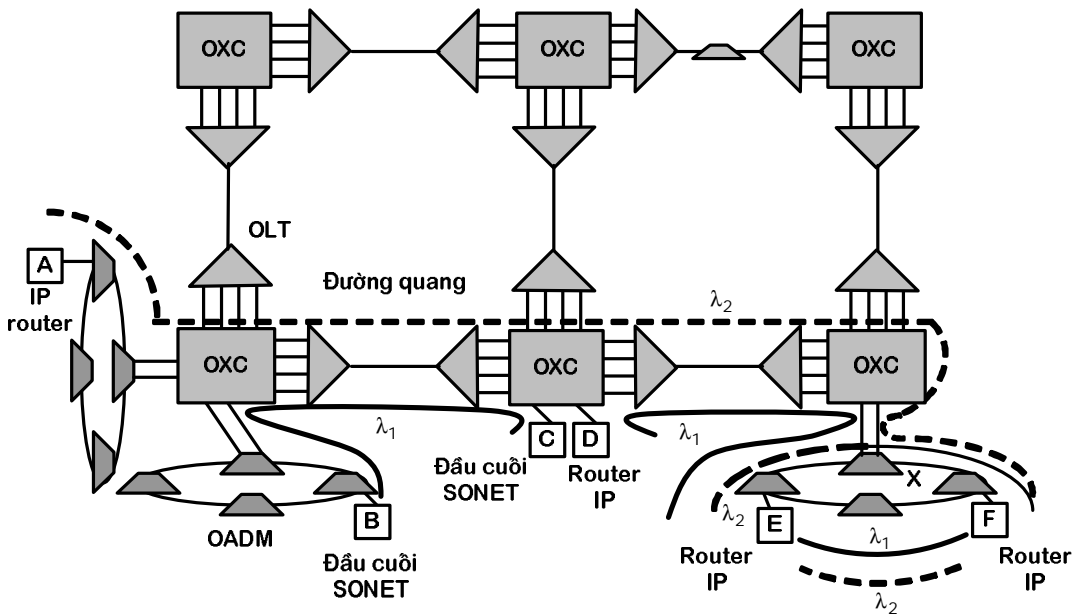
Sự phát triển của các hệ thống WDM nhìn chung có thể chia làm ba giai đoạn (xem hình 1.42):

- Hệ thống WDM thế hệ 1: Hệ thống WDM điểm-điểm với các trạm xen/rẽ trên tuyến phải sử dụng các thiết bị MUX/DEMUX để tách/ghép tất cả các bước sóng.
- Hệ thống WDM thế hệ 2: Hệ thống WDM điểm-đa điểm với các trạm xen/rẽ trên tuyến là các OADM cho phép tách trực tiếp bước sóng cần xen/rẽ.
- Hệ thống WDM thế hệ 3: Mạng quang WDM hoàn toàn với các thiết bị chuyển mạch và định tuyến bước sóng.

Hình 1.47 Sự phát triển của các hệ thống WDM



Hình 1.48 Mạng WDM định tuyến bước sóng



Mạng trong trường hợp này gọi là mạng định tuyến bước sóng: mạng cung cấp các đường quang (lightpaths) tới người sử dụng là các đầu cuối SDH (SONET) hay các router IP. Hình 1.48 là một minh họa cho mạng này. Trên hình 1.48 có thể thấy các đường quang giữa B và C, D và E, E và F, A và F. Trong mạng định tuyến bước sóng này tại các nút trung gian, các đường quang được định tuyến và chuyển mạch từ một đường (link) đến một đường khác. Có thể xảy ra trường hợp biến đổi bước sóng trong trường hợp này. Các phần tử chủ chốt cho liên kết mạng quang là bộ kết cuối đường dây quang (OLT), bộ ghép kênh xen/rót quang (OADM) và bộ kết nối chéo quang (OXC).

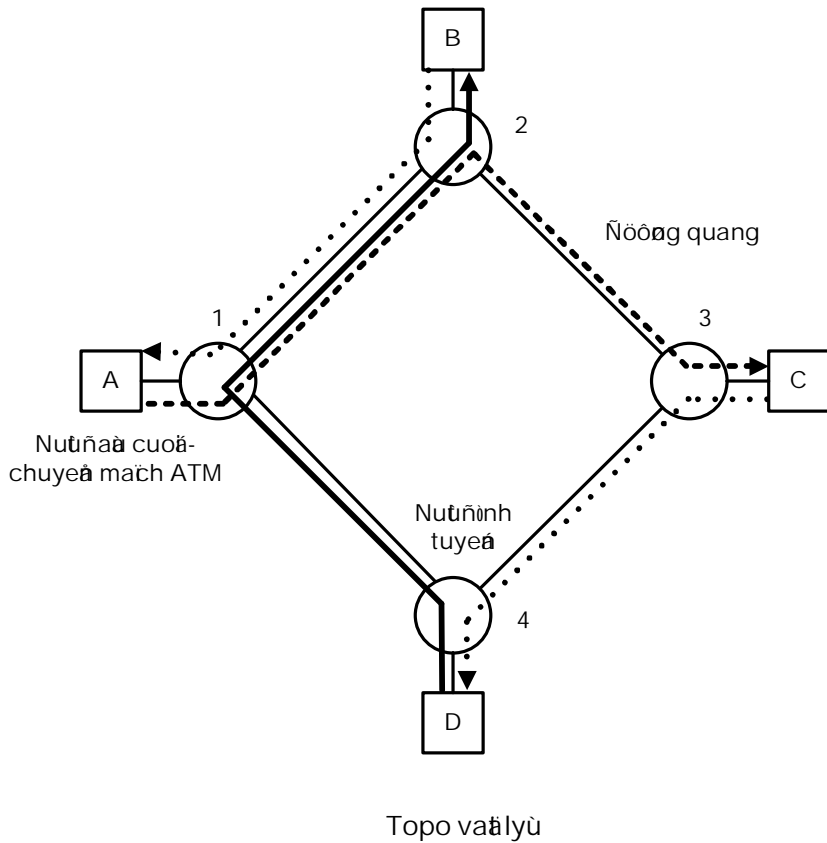
Kiến trúc mạng phải đáp ứng được các yêu cầu sau:

- Tái sử dụng bước sóng: như ta thấy trên hình 1.48, nhiều đường quang (lightpath) khác nhau trong mạng không trùng với nhau có thể cùng sử dụng một bước sóng. Khả năng tái sử dụng bước sóng giúp cho số lượng đường quang trong mạng có thể triển khai nhiều chỉ với số lượng bước sóng giới hạn. Ta phải hiểu rằng đáp ứng này hết sức quan trọng trong điều kiện băng thông của thiết bị WDM hiện tại còn hạn chế.
- Chuyển đổi bước sóng: một đường quang khi được định tuyến trong mạng có thể dùng nhiều bước sóng khác nhau để truyền tín hiệu. Khả năng chuyển đổi bước sóng là hết sức cần thiết để có một mạng truyền tải quang linh hoạt do hiệu quả sử dụng bước sóng cao. Hơn nữa, chuyển đổi bước sóng còn phải thực hiện tại các giao tiếp phía mạng khách hàng để chuyển đổi thành tín hiệu bước sóng chuẩn WDM sang tín hiệu bước sóng của mạng lớp khách hàng.
- Trong suốt: có nghĩa là kiến trúc mạng phải có khả năng truyền tải các tín hiệu khách hàng với nhiều tốc độ bit, giao thức khác nhau.
- Chuyển mạch kênh: đối với lớp kênh quang, cơ chế thiết lập và xoá bỏ đường quang tương tự như chuyển mạch kênh. Tuy rằng qua thực tế, quá trình tồn tại đường quang giữa hai điểm nút mạng có thể trong thời gian khá dài: vài tháng hoặc vài năm. Cơ chế chuyển mạch gói đối với lớp kênh quang hiện tại vẫn chưa được phát triển do đáp ứng chậm và khả năng chưa linh hoạt của các thiết bị hoạt động trong lớp kênh quang. Chuyển mạch gói có thể được áp dụng ở mạng lớp trên, mạng lớp khách hàng như IP, ATM..., trong khi đường quang vẫn giữ nguyên trạng thái thiết lập.
- Khả năng tồn tại khi mạng gặp sự cố (Survivability): mạng phải được cấu hình sao cho khi kết nối đường dây quang gặp sự cố, đường quang vẫn phải được duy trì bằng cách định tuyến lại.
- Mô hình đường quang: mô hình đường quang là đồ thị các điểm nút mạng, với các giao tiếp với lớp mạng khách hàng (edge) tại mỗi nút. Như vậy mô hình đường quang được sử dụng bởi lớp mạng khách hàng (lớp trên) và được thiết kế sao cho đáp ứng nhu cầu truyền tải thông tin của lớp mạng khách hàng.

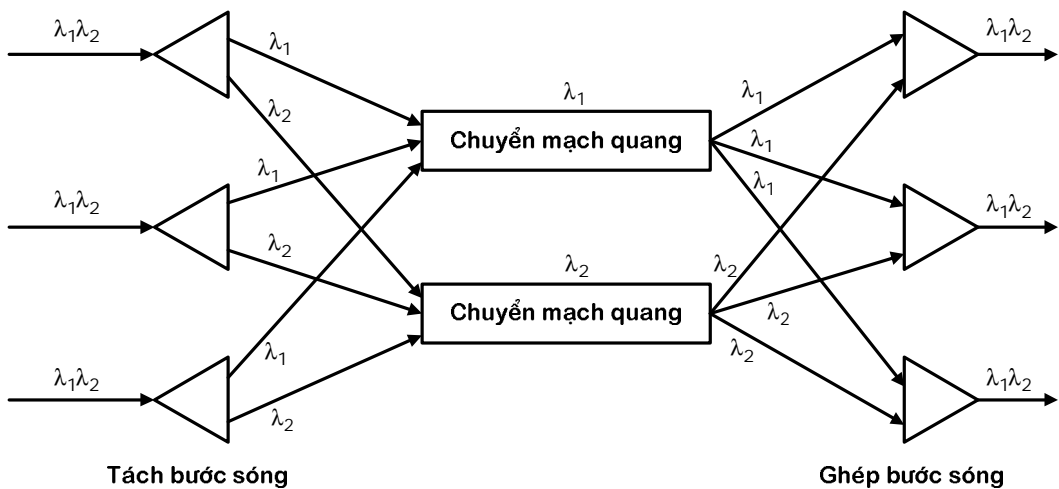
2. Tô pô vật lý và tô pô logic

Tô pô vật lý của mạng bao gồm các bộ định tuyến quang kết nối với nhau bằng các cặp liên kết sợi quang điểm nối điểm trong một tô pô mạng lưới bất kỳ (hình 1.49). Trong hình 1.49, mỗi cặp liên kết được tượng trưng bằng một cạnh vô hướng giữa các nút định tuyến. Nút ở đầu cuối kết nối với bộ định tuyến. Mỗi nút đầu cuối có số bộ phát và bộ thu giới hạn. Trong hình 1.50, nút định tuyến thu tín hiệu tại một bước sóng xác định ở ngõ vào của nó, sau đó định tuyến tín hiệu này (độc lập với các bước sóng khác) đến một ngõ ra nào đó. Bộ định tuyến có Δp ngõ vào và Δp ngõ ra có khả năng xử lý Λ bước sóng giống như Λ bộ chuyển mạch bước sóng $\Lambda p \times \Lambda p$ cấu hình lại được.

Hình 1.49 Mạng WDM gồm nhiều nút định tuyến kết nối bằng các cặp liên kết sợi quang điểm nối điểm. Các nút định tuyến gắn với các nút đầu cuối hình thành các nút nguồn và đích cho lưu lượng trong mạng.



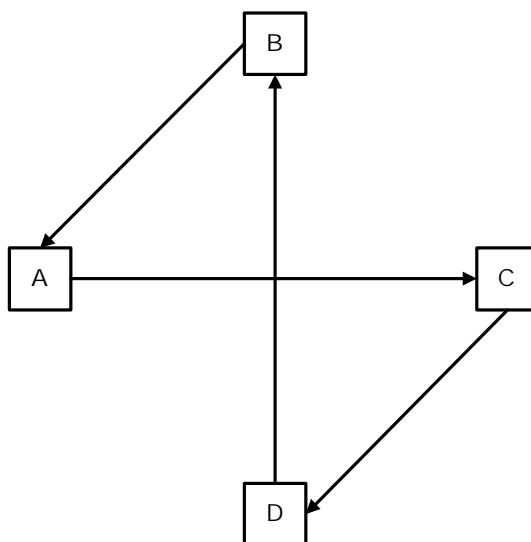
Hình 1.50 Cấu trúc của bộ định tuyến cấu hình lại. Bộ định tuyến có thể chuyển mạch mỗi bước sóng ở ngõ vào độc lập với các bước sóng khác.



Tôpô vật lý của mạng là một tập các nút đầu cuối, nút định tuyến và các liên kết sợi quang kết nối các nút với nhau về mặt vật lý mà trên đó, người ta có thể thiết lập đường quang giữa các nút đầu cuối. Đường quang là một đường dẫn đi qua mạng đã có cấp phát bước sóng giữa các nút đầu cuối và được thiết lập bằng cách cấu hình các nút định tuyến trong mạng. Hai đường quang dùng chung một liên kết phải sử dụng bước sóng khác nhau. Đường quang cung cấp một đường thông giữa hai nút đầu cuối với băng thông bằng với băng thông của một kênh, thường là 2.5Gb/s đến 10 Gb/s. Tập hợp tất cả các đường quang đã được thiết lập giữa các nút đầu cuối tạo thành tôpô logic.

Hình 1.51 trình bày tôpô logic ứng với tôpô vật lý trong hình 1.49, tôpô logic này tương ứng với một tập các đường quang trong hình 1.49. Tôpô logic là một đồ thị với các nút tương ứng với các nút đầu cuối trong mạng gốc và một cạnh có hướng từ nút B đến nút A nếu đường quang được thiết lập từ nút B đến nút A. Cấp độ vật lý (physical degree) của một nút định tuyến là số lượng các nút định tuyến kết nối trực tiếp với nó bằng các liên kết sợi quang (ví dụ cấp độ vật lý của tất cả các nút định tuyến trong hình 1.49 là 2). Cấp độ logic đi (logical out-degree) của một nút đầu cuối là số đường quang bắt nguồn từ nút đó và cấp độ logic đến (logical in-degree) của một nút đầu cuối là số đường quang kết cuối tại nút đó, ví dụ, trong hình 1.51, cấp độ logic đi và cấp độ logic đến của mỗi nút đầu cuối đều là 1. Giả sử rằng mỗi nút định tuyến kết nối với một nút đầu cuối duy nhất và ngược lại, thì đơn giản ta chỉ nói đến cấp độ logic và cấp độ vật lý của mỗi nút.

Hình 1.51 Tôpô logic cho mạng ở hình 1.49. Các cạnh có hướng trong tôpô này tượng trưng cho các đường quang giữa các nút đầu cuối tương ứng trong hình 1.49.



Trong mạng có N nút, thì trong trường hợp lý tưởng, có thể thiết lập đường quang giữa tất cả $N(N-1)$ nút. Tuy nhiên, có hai lý do không xảy ra trường hợp này. Thứ nhất, số lượng bước sóng sẵn có sẽ quy định số đường quang được thiết lập. Ví dụ, giả sử một mạng có 128 nút với cấp độ vật lý trung bình là 4, thì có thể thiết lập trung bình 640 đường quang song hướng (full-duplex) sử dụng 32 bước sóng hay nói cách khác là chỉ có 10 đường quang song hướng trên mỗi nút (rất ít hơn so với yêu cầu 127 đường quang cho tất cả các nút khác). Thứ hai, mỗi nút chỉ có thể là nút nguồn và đích của một số lượng đường quang giới hạn là Δ_1 . Số lượng này được xác định dựa vào số lượng các thành phần phần cứng của mạng (bộ phát, bộ thu) và tổng số lượng thông tin mà một nút có khả năng xử lý.

Khi không thể thiết lập đường quang giữa tất cả các cặp nút trong mạng, thì cặp nút nào không được kết nối trực tiếp qua đường quang phải sử dụng nhiều đường quang qua các nút trung gian để kết nối thông tin liên lạc với các nút khác. Tại mỗi nút trung gian, các gói đến trên một đường quang ở ngõ vào phải được chuyển sang dạng điện, chuyển mạch dưới dạng điện, sau đó chuyển lại sang dạng quang và gửi đến một đường quang khác ở ngõ ra để định tuyến đến nút đích của gói. Như vậy, để đến được nút đích cuối cùng, các gói phải đi trên đường dẫn có nhiều chặng. Xét đến ràng buộc này, mỗi nút chỉ chuyển mạch điện với lượng thông tin hạn chế, được xác định bởi số lượng cổng mà chuyển mạch điện tại nút đó có thể xử lý, đặt là Δ_2 . Các điều kiện trên đây sẽ quy định giới hạn về cấp độ tối đa của một tô pô logic, nghĩa là số lượng đường quang tối đa bắt nguồn và kết cuối tại một nút phải là $\Delta_1 = \min(\Delta_1, \Delta_2)$. Chú ý rằng ngay cả khi số lượng đường quang sẵn có đủ lớn để các đường quang có thể được thiết lập giữa tất cả $N(N-1)$ cặp nguồn-đích (s-d), nếu $\Delta_1 < N-1$, thì vấn đề sử dụng các đường quang giữa các cặp s-d sao cho không xảy ra ùn ùn trong mạng diện rộng là một vấn đề rất khó khăn. Nhưng nếu có thể xây dựng mô hình mạng như vậy, thì tất cả các gói được định tuyến trực tiếp trên các đường dẫn toàn quang và không yêu cầu chuyển tiếp gói tại các nút trung gian.

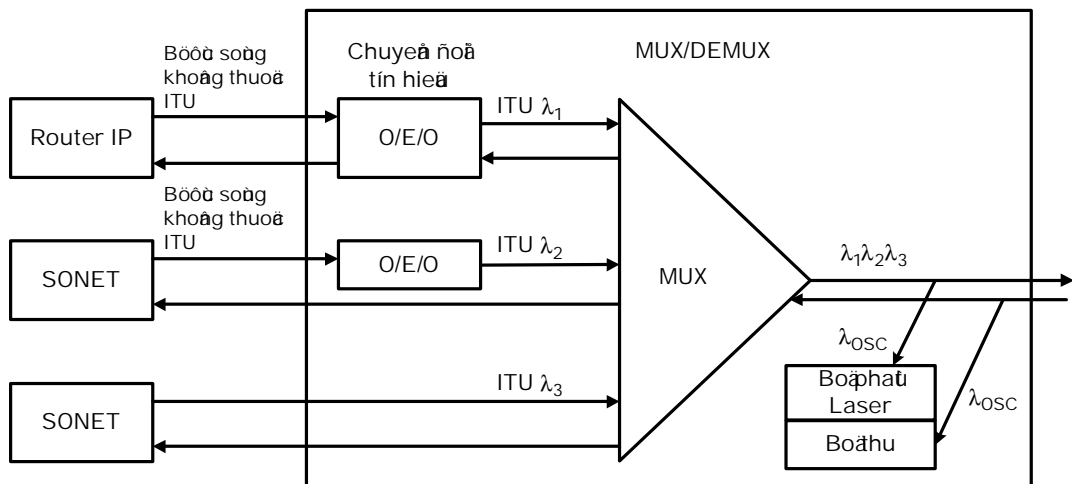
3. Các phần tử mạng (NE) WDM

3.1 Bộ đầu cuối đường quang (OLT)

a. Định nghĩa

Bộ đầu cuối đường quang OLT (Optical Line Terminal) là thiết bị khá đơn giản trong mạng truyền dẫn WDM. OLT có trong các mô hình mạng điểm-điểm, thực hiện ghép tín hiệu ở đầu phát và truyền đi trên sợi quang, giải ghép ở đầu thu và chuyển các tín hiệu thành phần đến phía đầu cuối khách hàng. Như minh họa trên hình 1.52, OLT gồm có ba khối chức năng chính: chuyển đổi tín hiệu (Transponder), ghép bước sóng (Wavelength Multiplexer) và khuếch đại quang (Optical Amplifier) (chức năng khuếch đại tín hiệu là tùy chọn ở OLT và không được minh họa trên hình).

Hình 1.52 Sơ đồ khối của một bộ đầu cuối đường quang (OLT). OLT bao gồm bộ ghép kênh/phân kênh bước sóng và bộ chuyển đổi tín hiệu (transponder). Bộ chuyển đổi tín hiệu chuyển đổi tín hiệu đến từ người sử dụng thành tín hiệu phù hợp cho việc truyền dẫn trên các tuyến WDM và ngược lại cũng chuyển tín hiệu từ tuyến WDM thành tín hiệu phù hợp cho người sử dụng. Các bộ chuyển tiếp sẽ không cần thiết nếu thiết bị khách hàng có thể truyền và nhận trực tiếp các tín hiệu tương thích với tuyến WDM. OLT cũng có khả năng kết cuối một kênh giám sát quang riêng lẻ (OSC) dùng trên tuyến quang.



Bộ đầu cuối đường quang

Bộ chuyển đổi tín hiệu thực hiện chuyển tín hiệu đến từ mạng khách hàng với những tốc độ, bước sóng và giao thức khác nhau sang thành tín hiệu thuộc bước sóng chuẩn theo qui định của ITU-T. Với những tín hiệu khách hàng khác nhau, bộ chuyển đổi cung cấp các giao tiếp khác nhau. Giao tiếp này gọi là giao tiếp khách hàng. Bộ ghép bước sóng ghép các tín hiệu đã qua bộ chuyển đổi để hình thành tín hiệu WDM, truyền trên mạng WDM. Mạng WDM có thể sử dụng các bộ khuếch đại quang để khuếch đại tín hiệu truyền đi được xa hơn.

b. Các chức năng

Chức năng chuyển đổi tín hiệu

Bộ chuyển đổi tín hiệu tại OLT thực hiện các chức năng khác nhau như:

- Chuyển tín hiệu sang bước sóng, mức công suất và các thông số quang cho phù hợp với yêu cầu chung của lớp kênh quang. Bộ chuyển đổi tín hiệu thực hiện chuyển tín hiệu quang sang điện rồi từ điện sang quang dùng các bộ phát laser WDM mà ta đã khảo sát ở trên. Theo chiều ngược lại, thực hiện chuyển đổi tín hiệu tương thích với lớp kênh quang sang tín hiệu tương thích với lớp khách

hàng cũng qua chuyển đổi quang-điện-quang. Thực tế có thể chỉ thực hiện chuyển đổi theo một chiều từ lớp khách hàng vào lớp kênh quang.

- Thêm vào hoặc trích ra các tín hiệu mào đầu để có thể quản lý tín hiệu truyền đi ngay tại lớp kênh quang.
- Giám sát BER của tín hiệu truyền trong lớp khách hàng và tín hiệu truyền trong lớp quang tại đầu vào (ingress) và đầu ra (outgress) của nó.

Hiện tại cũng có xu hướng triển khai bộ chuyển đổi tín hiệu tại các thiết bị đầu cuối khách hàng. Điều này giúp giảm chi phí, thiết bị WDM cũng bớt cồng kềnh và phức tạp hơn. Tuy nhiên, phía giao diện đầu ra (outgress) của bộ chuyển đổi, thường gọi là giao diện kênh quang, vẫn chưa được chuẩn hoá và khác nhau đối với các nhà cung cấp thiết bị WDM khác nhau nên xu hướng công nghệ này vẫn chưa được triển khai rộng rãi.

Chức năng ghép bước sóng

Bộ ghép bước sóng thực hiện ghép các tín hiệu thuộc các bước sóng khác nhau tương thích với khuyến nghị của ITU-T thành tín hiệu để truyền đi trên một sợi quang. Các kỹ thuật ghép bước sóng mà ta đã khảo sát như kỹ thuật ống dẫn sóng AWG, kỹ thuật điện môi màng mỏng, kỹ thuật cách tử Bragg,... đều có thể được ứng dụng.

Chức năng khuếch đại tín hiệu

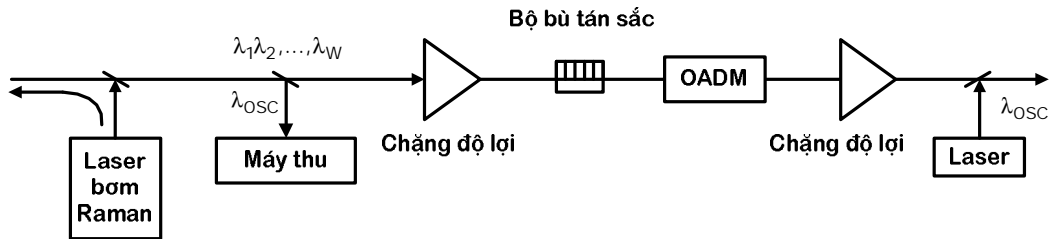
Chức năng khuếch đại tín hiệu là tùy chọn tại OLT. Để thực hiện được chức năng khuếch đại tín hiệu, có thể dùng hai cấu hình EDFA khác nhau. Cấu hình EDFA khuếch đại công suất cho hướng phát (booster amplifier) và cấu hình EDFA tiền khuếch đại (Prampifier) cho hướng thu. Hiện nay, các nút mạng WDM có thể hoạt động ở các bước sóng băng C (1530-1565 nm) và băng L (1565-1625 nm) do bộ khuếch đại EDFA hoạt động được trên hai băng sóng này.

Ngoài ba chức năng chính trên, OLT còn có chức năng kết cuối (ghép/tách) kênh giám sát OSC (Optical Supervisory Channel). Kênh giám sát được truyền trên một bước sóng khác với bước sóng truyền tín hiệu. Vai trò của OSC là để giám sát hoạt động của các bộ khuếch đại quang dọc theo một liên kết quang và thực hiện các chức năng quản lý khác.

3.2 Bộ khuếch đại đường quang (OLA)

Các bộ khuếch đại đường quang OLA (Optical Line Amplifier) được dùng ở giữa các liên kết quang với những khoảng cách bằng nhau (trên thực tế có thể khoảng cách đặt các OLA không bằng nhau nhưng phải nhỏ hơn một giá trị khoảng cách nhất định, thường là khoảng 100-200 km). Trên hình là sơ đồ khối của OLA, thành phần cơ bản một hoặc nhiều khối độ lợi là sợi EDF mắc nối tiếp với nhau, giữa các chặng độ lợi có thể là bộ bù tán sắc (dispersion compensator) để bù tán sắc tích lũy dọc theo tuyến quang.

Hình 1.53 Sơ đồ khối của một bộ khuếch đại đường dây quang điển hình. Trên hình vẽ chỉ vẽ một hướng. Bộ khuếch đại sử dụng nhiều tầng khuếch đại Erbium và bao gồm bộ bù tán sắc (tùy chọn) và các OADM giữa các tầng khuếch đại. Bộ bơm Raman có thể dùng để cung cấp thêm độ khuếch đại Raman cho đoạn sợi quang. OSC được tách ra tại đầu vào và kết cuối và xen vào tại ngõ ra.



Bộ OLA còn có các thiết bị thực hiện chức năng ghép/tách kênh giám sát OSC. Tại đầu vào khi chưa qua các khối độ lợi, kênh giám sát OSC được lọc lại và đưa vào đầu thu OSC. Tiếp đến, sau khi khuếch đại các kênh tín hiệu thuộc các bước sóng khác nhau, kênh OSC được ghép chung vào với các kênh tín hiệu và truyền đi. Như vậy, kênh OSC không được khuếch đại bởi các OLA. Bộ OLA cũng có thể được cấu hình gồm bộ khuếch đại Raman thực hiện chức năng khuếch đại phân bố (distributed amplifier) bằng cách cấu hình tại đầu vào của nó nguồn bơm Raman có công suất quang lớn, bơm ngược chiều với chiều tín hiệu đi vào.

3.3 Bộ xen rớt quang (OADM)

a. Định nghĩa

Bộ ghép xen/rớt quang OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) thường được dùng trong các mạng quang đô thị và mạng quang đường dài vì nó cho hiệu quả kinh tế cao, đặc biệt đối với cấu hình mạng tuyến tính, cấu hình mạng vòng (Ring).

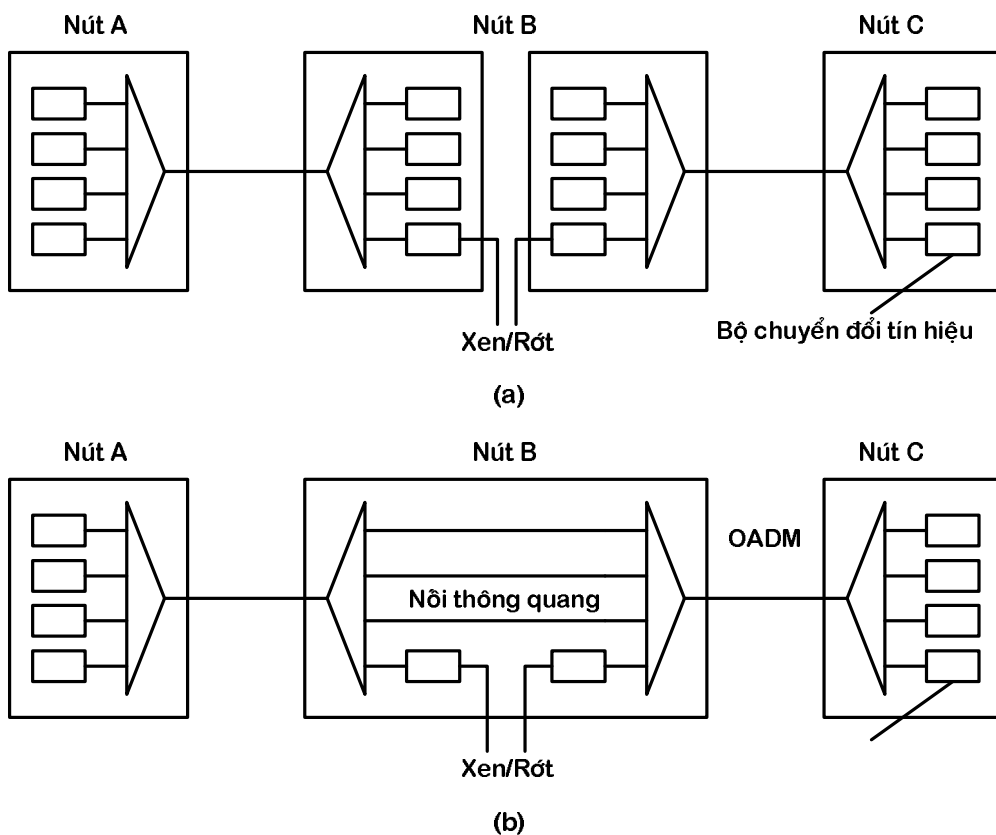
Chức năng của bộ ghép xen/rớt quang là nó được cấu hình để xen/rớt một số kênh bước sóng, các kênh bước sóng còn lại được cấu hình cho đi xuyên qua (pass through).

Để minh họa tính hiệu quả kinh tế cho ứng dụng của OADM, ta xét một mạng gồm có ba trạm nối chuỗi với nhau, thường được gọi là cấu hình tuyến tính (xem hình 1.54). Giả sử các liên kết và kết nối đều là song công, các nút mạng được nối với nhau bởi hai sợi quang, mỗi sợi truyền theo một chiều. Giả sử kết nối A và B dùng một bước sóng cho chiều truyền đi và về, kết nối B và C dùng một bước sóng, kết nối A và C dùng 3 bước sóng. Như vậy, liên kết A-B và B-C đều dùng 4 bước sóng.

Nếu mạng chỉ dùng bộ OLT, khi đó cần phải dùng 4 OLT với số bộ chuyển đổi bước sóng là 16. Trong khi đó nếu triển khai dùng OADM tại site B với cấu hình thích hợp cho rớt kênh bước sóng thuộc kết nối A và B, cho xen kênh bước sóng

thuộc kết nối B và C, cho đi xuyên qua kênh bước sóng thuộc kết nối A và C, ta có thể tiết kiệm số nút mạng sử dụng chỉ còn là 3 (2 OLT+1 OADM) và số bộ chuyển đổi tín hiệu dùng bây giờ chỉ còn là 8. Cả hai cấu hình đều được cho như trên hình 1.54. Trên thực tế, số bước sóng cần xen/rớt tại nút mạng thường rất nhỏ so với số lượng bước sóng được truyền trên sợi quang nên hiệu quả ứng dụng OADM vào mạng sẽ là rất lớn. Tuy nhiên, ta cũng thấy rằng nếu khoảng cách từ trạm A đến trạm C đủ nhỏ, ta có thể nối trực tiếp kết nối giữa A và C mà không cần qua trung gian là trạm B. Khi đó, hiệu quả của ứng dụng OADM không còn lớn nữa. Trong trường hợp các trạm có khoảng cách tương đối nhỏ (mạng đô thị) thì cấu hình mạng Mesh dùng OXC làm phần tử cơ bản là cấu hình tối ưu nhất.

Hình 1.54 Một ví dụ về mạng tuyến tính có ba nút để minh họa cho vai trò của OADM. Ba bước sóng được dùng giữa hai nút A và C và chỉ một bước sóng giữa nút A và B và giữa nút B và C. (a) Một giải pháp dùng cho hệ thống WDM điểm nối điểm. (b) Một giải pháp dùng OADM tại nút B.



Ứng dụng OADM sẽ càng hiệu quả hơn nếu OADM có khả năng cấu hình lại. Tuy nhiên, thực tế thiết bị OADM có khả năng cấu hình lại chưa được thương mại hoá rộng rãi.

b. Thuộc tính cơ bản của OADM

Một điểm nút mạng đóng vai trò là điểm ghép xen/rót kênh quang trong hệ thống có những thuộc tính cơ bản sau:

- Số lượng bước sóng có thể hỗ trợ tối đa
- Số lượng bước sóng tối đa có thể thực hiện xen/rót. Đối với đa số OADM hiện tại, số lượng bước sóng thực hiện xen/rót thường quyết định bởi số phần cứng được lắp đặt. Thay đổi số bước sóng xen/rót bằng cách thay đổi phần cứng.
- Có quy định những bước sóng cụ thể nào có thể xen/rót tại OADM không? điều này có ảnh hưởng rất lớn lên việc định tuyến lưu lượng trong mạng.
- Có dễ dàng xen/rót kênh không: có làm gián đoạn lưu lượng khi xen/rót kênh không?
- OADM có cấu trúc môđun; theo nghĩa giá thành tỉ lệ thuận với số kênh được tách ra? Điều này rất quan trọng đối với các nhà cung cấp dịch vụ bởi vì họ mong muốn “trả tiền khi cần thêm (pay as you grow)” chứ không phải trả trước.
- Tính phức tạp của lớp vật lý (suy hao truyền dẫn) được thiết kế có ảnh hưởng đến việc sử dụng OADM và việc xen các kênh mới hay nút mạng mới ảnh hưởng tới việc thiết kế lớp vật lý như thế nào? Về cơ bản, nếu suy hao truyền dẫn tổng cộng không phụ thuộc vào số lượng kênh được xen/rót thì việc xen/rót thêm các kênh mới sẽ không ảnh hưởng nhiều đến các kênh hiện hữu (tuy nhiên có thể xuất hiện nhiễu xuyên kênh).
- OADM có thể cấu hình lại được, theo nghĩa có thể có thể điều khiển từ xa việc xen, rót hoặc nối thông các kênh bằng phần mềm?

c. Các cấu trúc cho OADM

Người ta đã đưa ra nhiều cấu trúc để cấu thành OADM, trong đó phần tử cơ bản vẫn là một hoặc nhiều bộ lọc, bộ MUX/DEMUX mà ta đã xét ở phần III. Các linh kiện trong hệ thống WDM. Thông thường, công nghệ chế tạo các phần tử cơ bản này là: công nghệ cách tử Bragg, công nghệ điện môi màng mỏng hoặc công nghệ ống dẫn sóng.

Một cách cơ bản, có ba cấu trúc cho OADM: cấu trúc song song, cấu trúc nối tiếp và cấu trúc xen/rót theo băng sóng. So sánh các đặc tính cơ bản của ba cấu trúc này được cho trên bảng 1.3, trong đó N là tổng số kênh bước sóng OADM có thể xử lý và D là số lượng kênh bước sóng tối đa có thể thực hiện xen/rót.

Cấu trúc song song

Trong cấu trúc song song, tất cả các kênh tín hiệu đều được giải ghép kênh. Sau đó, một số kênh tùy ý được cấu hình rót, các kênh còn lại cấu hình cho đi xuyên qua một cách thích hợp, minh họa như trên hình 1.55(a). Như vậy, số lượng kênh thực hiện xen/rót, cụ thể kênh nào thực hiện xen/rót là không cố định. OADM chế tạo theo cấu trúc song song sẽ không tạo nhiều ràng buộc khi thiết lập một đường quang giữa các nút trong mạng. Đồng thời, do OADM xử lý đối với tất cả các kênh

bước sóng đi vào, suy hao thêm vào của tín hiệu khi qua OADM là cố định, không phụ thuộc vào số lượng kênh xen/rớt tại điểm nút. Hơn nữa việc xen/rớt thêm các kênh không làm gián đoạn các kênh đang hoạt động. Tuy nhiên, so với điều kiện thực tế, cấu trúc này sẽ không mang tính kinh tế do số lượng kênh xen/rớt tại mỗi nút thường không đáng kể so với số lượng kênh truyền trên sợi quang.

Bảng 1.3 So sánh giữa các cấu trúc cho OADM

Thuộc tính	Song song	Nối tiếp	Xen/rớt theo băng
D	N	1	$\ll N$
Điều kiện ràng buộc lựa chọn bước sóng xen/rớt	Không	Quyết định khi lập kế hoạch phân bố bước sóng	Cố định một tập hợp bước sóng
Thay đổi lưu lượng	Cao nhất	Đáp ứng được yêu cầu	Tương đối cao
Lập kế hoạch phân bố bước sóng	Ít tốn thời gian	Tương đối	Nhiều ràng buộc cần giải quyết
Suy hao thêm vào	Cố định	Thay đổi	Cố định tương ứng với số băng sóng được xen/rớt
Chi phí (nếu số kênh xen/rớt ít)	Cao	Thấp	Trung bình
Chi phí (nếu số kênh xen/rớt nhiều)	Thấp	Cao	Trung bình

Cấu trúc song song theo băng (theo môđun)

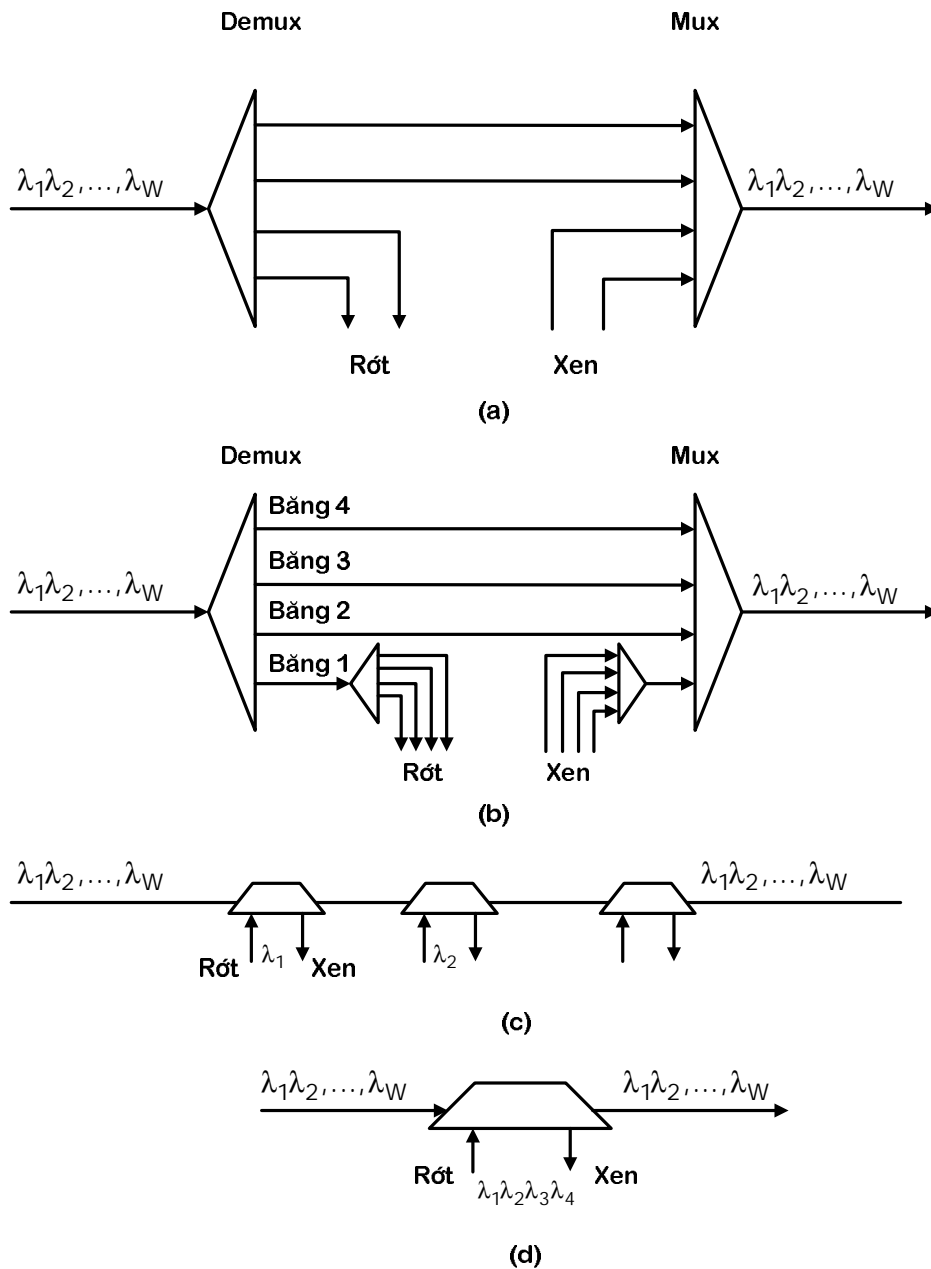
Để tăng tính kinh tế hơn, cấu trúc song song có thể thay đổi nhỏ bằng cách thiết kế theo từng môđun như minh họa trên hình 1.55(b). Ở đây, quá trình MUX và DEMUX tín hiệu được thực hiện theo hai tầng. Tầng thứ nhất MUX tín hiệu từ sợi quang đi vào ra thành các băng sóng riêng biệt và tầng thứ hai MUX tín hiệu thuộc các băng sóng ra thành các tín hiệu bước sóng riêng rẽ. Như vậy, cấu trúc theo môđun giúp tăng hiệu quả sử dụng bộ MUX/DEMUX cao hơn và cho ra độ suy hao giữa các kênh bước sóng đồng nhất hơn.

Cấu trúc nối tiếp

Trong cấu trúc nối tiếp, một kênh đơn được thực hiện rớt và xen từ tập hợp các kênh đi vào OADM. Ta gọi thiết bị này là OADM kênh đơn SC-OADM (single OADM). SC-OADM là yếu tố cơ bản cấu thành nên hệ thống OADM hoàn chỉnh bằng cách ghép nối tiếp nhiều SC-OADM lại với nhau như minh họa trên hình 1.55(c). Trên thực tế, thiết bị kiểu này cho tính kinh tế cao hơn so với cấu trúc song song nhưng suy hao thêm vào lớn do mắc nối tiếp các SC-OADM theo nhiều chặng.

Việc xen/rót các kênh mới sẽ làm gián đoạn các kênh khác. Do đó cần có kế hoạch phân bổ bước sóng trước để hạn chế việc gián đoạn này.

Hình 1.55 Các kiến trúc khác nhau cho OADM. (a) Dạng song song, tất cả các bước sóng được phân chia và ghép kênh trở lại; (b) phiên bản môđun của kiến trúc song song; (c) dạng nối tiếp, các bước sóng được tách và ghép tại một thời điểm; (d) dạng tách băng, một băng các bước sóng cùng được tách và ghép. W biểu thị tổng số các bước sóng.



Cấu trúc xen/rót theo băng sóng

Trong cấu trúc này, một nhóm cố định kênh bước sóng được thực hiện xen/rót tại mỗi nút mạng OADM. Các kênh được thiết lập thực hiện xen/rót là các kênh liên tiếp nhau trong một băng sóng, sẽ được lọc bởi một bộ lọc có băng thông là dải bước sóng. Sau đó, chúng được đưa lên mức ghép kênh cao hơn và từ đó giải ghép kênh thành các kênh bước sóng riêng lẻ như minh họa trên hình 1.55(d). Đây là cấu trúc trung hòa giữa hai cấu trúc song song và cấu trúc nối tiếp mà ta đã mô tả ở trên. Số lượng tối đa kênh bước sóng được xen/rót là tùy thuộc vào băng thông của bộ lọc. Số lượng thực tế các kênh xen/rót là còn tùy thuộc vào nhà quản lý hệ thống trang bị bao nhiêu bộ chuyển đổi tín hiệu tại nút OADM. Tuy nhiên, số lượng các kênh xen/rót là bao nhiêu cũng không ảnh hưởng đến quá trình tính toán các đường quang khác truyền trong mạng và độ suy hao của tín hiệu khi đi qua OADM. Trong một nhóm kênh, việc xen/rót các kênh bổ xung sẽ không làm ảnh hưởng tới các đường quang khác trong mạng bởi vì suy hao nối thông cho tất cả các kênh không nằm trong nhóm xen/rót là cố định. Tuy nhiên cấu trúc này làm phức tạp kế hoạch hoá bước sóng và áp đặt một số hạn chế lên việc phân bổ bước sóng.

d. OADM có thể cấu hình lại được

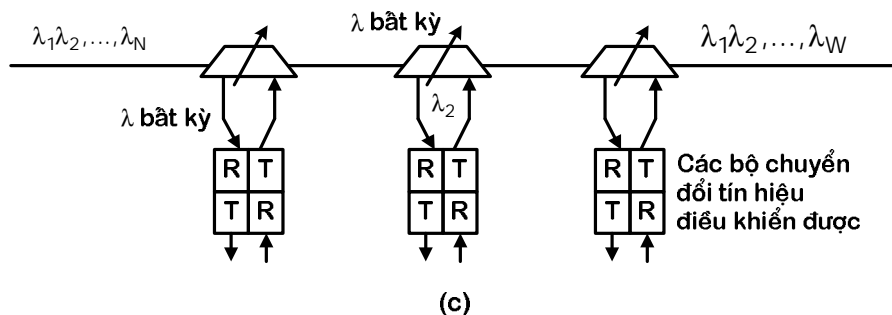
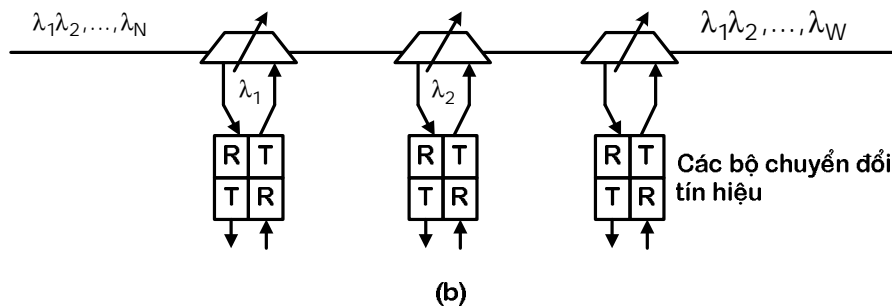
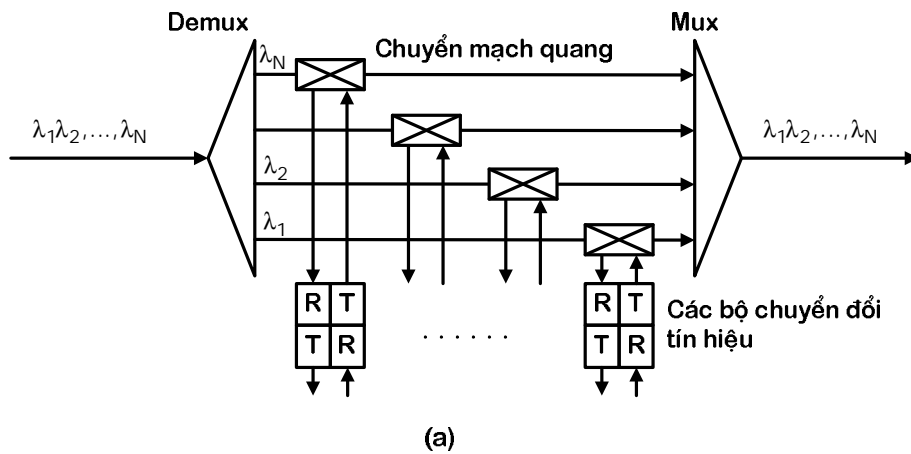
Thuộc tính có thể cấu hình lại là thuộc tính rất cần thiết phải có đối với tất cả các thiết bị truyền dẫn WDM do nó cho phép sự linh động mềm dẻo trong việc thiết lập các đường quang đi trong mạng. Các cấu trúc của OADM mà ta xét ở trên đều không có khả năng cấu hình lại được.

Trong hình 1.56 là một số các cấu trúc OADM có thể cấu hình lại. Trên hình 1.56(a) là một biến thể của cấu trúc song song, nó dùng bộ chuyển mạch quang để thực hiện xen/rót một kênh tín hiệu nào đó khi cần thiết. Trên hình 1.56(b) là một biến thể của cấu trúc nối tiếp khi các SC-OADM lúc này là các thiết bị có thể điều chỉnh được bước sóng hoạt động, hoặc cấu hình cho đi qua tất cả các bước sóng. Tuy nhiên, cả hai cấu trúc nêu ở trên mới chỉ giải quyết được vấn đề “cấu hình lại” một phần vì vẫn phải dùng các bộ chuyển đổi tín hiệu cố định. Các bộ chuyển đổi tín hiệu một cách tổng quát được phân làm hai loại: bộ chuyển đổi tín hiệu cố định và bộ chuyển đổi tín hiệu điều chỉnh được. Bộ chuyển đổi tín hiệu cố định thực hiện nhận và phát với một bước sóng cố định trong lớp kênh quang. Bộ chuyển đổi tín hiệu điều chỉnh được, cấu tạo gồm có một bộ phát laser có thể điều chỉnh được và một diode thu quang có băng thông rộng, có thể thực hiện nhận và phát với nhiều bước sóng khác nhau. Trong điều kiện công nghệ hiện tại, bộ chuyển đổi tín hiệu cố định là phổ biến nhất.

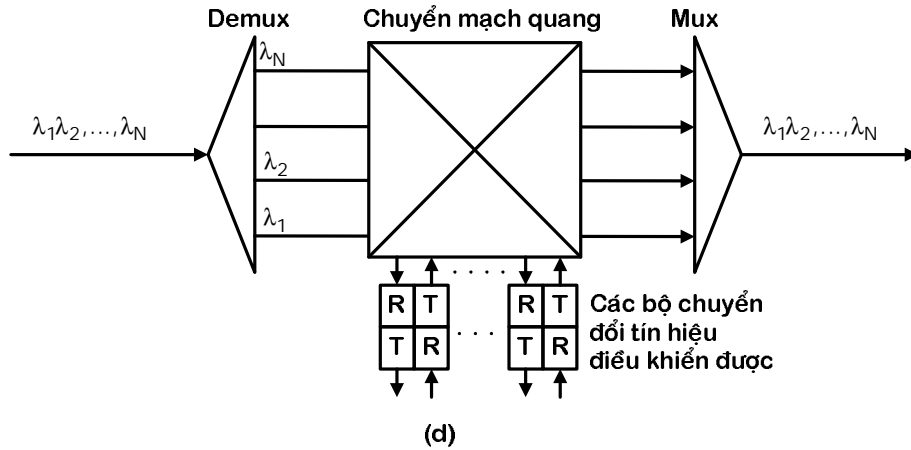
Khi dùng bộ chuyển đổi tín hiệu cố định trong cấu hình “động” của OADM sẽ dẫn đến yếu tố mà ta cần phải cân nhắc. Đó là tính kinh tế khi vì ta phải lắp đặt tất cả các bộ chuyển đổi tín hiệu đối với tất cả bước sóng mà có thể không dùng đến. Chính vì vậy, để giải quyết trọn vẹn vấn đề “cấu hình lại” đối với OADM, người ta giới thiệu cấu trúc như cho trên hình 1.56(c) và (d). Cấu trúc OADM trên hình

1.56(c) là cấu trúc nối tiếp và cấu trúc OADM trên hình 1.56(d) là cấu trúc song song. Cả hai cấu trúc này đều phải dùng các bộ chuyển đổi bước sóng có thể điều chỉnh được để thực hiện chuyển đổi sang bước sóng chuẩn.

Hình 1.56 Kiến trúc OADM cấu hình lại được. (a) Một OADM điều chỉnh được một phần dùng kiến trúc song song với các bộ chuyển mạch xen/rớt quang và các bộ chuyển đổi tín hiệu hiệu bước sóng cố định. T kí hiệu bộ phát và R là bộ thu. (b) Một OADM điều chỉnh được một phần dùng kiến trúc nối tiếp với các bộ chuyển đổi tín hiệu bước sóng cố định; (c) Một OADM điều chỉnh được hoàn toàn dùng kiến trúc nối tiếp với các bộ chuyển đổi tín hiệu điều chỉnh được;



Hình 1.56 Kiến trúc OADM cấu hình lại được. (d) Một OADM điều chỉnh được hoàn toàn dùng kiến trúc song song với các bộ chuyển đổi tín hiệu điều chỉnh được.

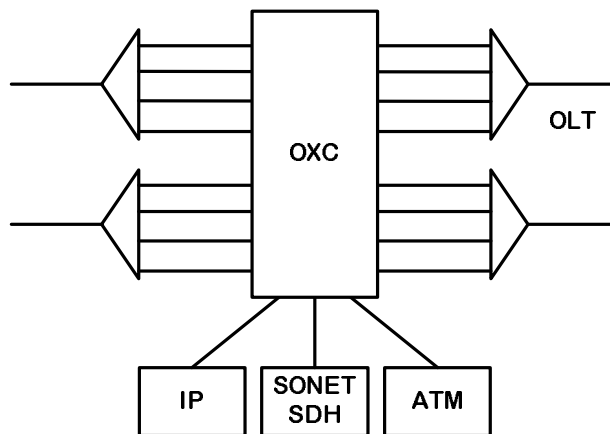


3.4 Bộ kết nối chéo quang (OXC)

a. Định nghĩa

Đối với các mô hình mạng đơn giản như mô hình mạng tuyến tính hoặc mô hình mạng vòng (Ring), OADM là sự lựa chọn tối ưu xét về khía cạnh kinh tế, công nghệ chế tạo và khả năng đáp ứng yêu cầu của mạng. Tuy nhiên, trong tương lai khi yêu cầu về khả năng linh động trong việc cung ứng dịch vụ, đồng thời các dịch vụ đa phương tiện đòi hỏi phải đáp ứng được sự tăng băng thông đột biến thì các mô hình mạng hiện tại không đáp ứng được. Khi đó, cần phải triển khai mạng mắt lưới (mesh), với phần tử trung tâm là các bộ kết nối chéo quang OXC (Optical Cross Connect).

Hình 1.57 Một mạng dùng OXC. OXC nằm giữa thiết bị người sử dụng của lớp quang và các OLT lớp quang.



Mặc dù OXC thực hiện kết nối chéo đối với các tín hiệu đầu vào là tín hiệu quang, phần lõi của OXC có thể là điện hoặc là toàn quang tùy thuộc vào cấu hình do nhà sản xuất qui định. Mô hình của một OXC được cho như trên hình 1.57. Như trên hình 1.57, tín hiệu quang ở đây phải được hiểu là tất cả các định dạng tín hiệu khác nhau, có thể là các định dạng tín hiệu thuộc lớp khách hàng chứ không thuần túy là các tín hiệu bước sóng chuẩn của WDM được ITU-T qui định.

b. Yêu cầu đối với OXC

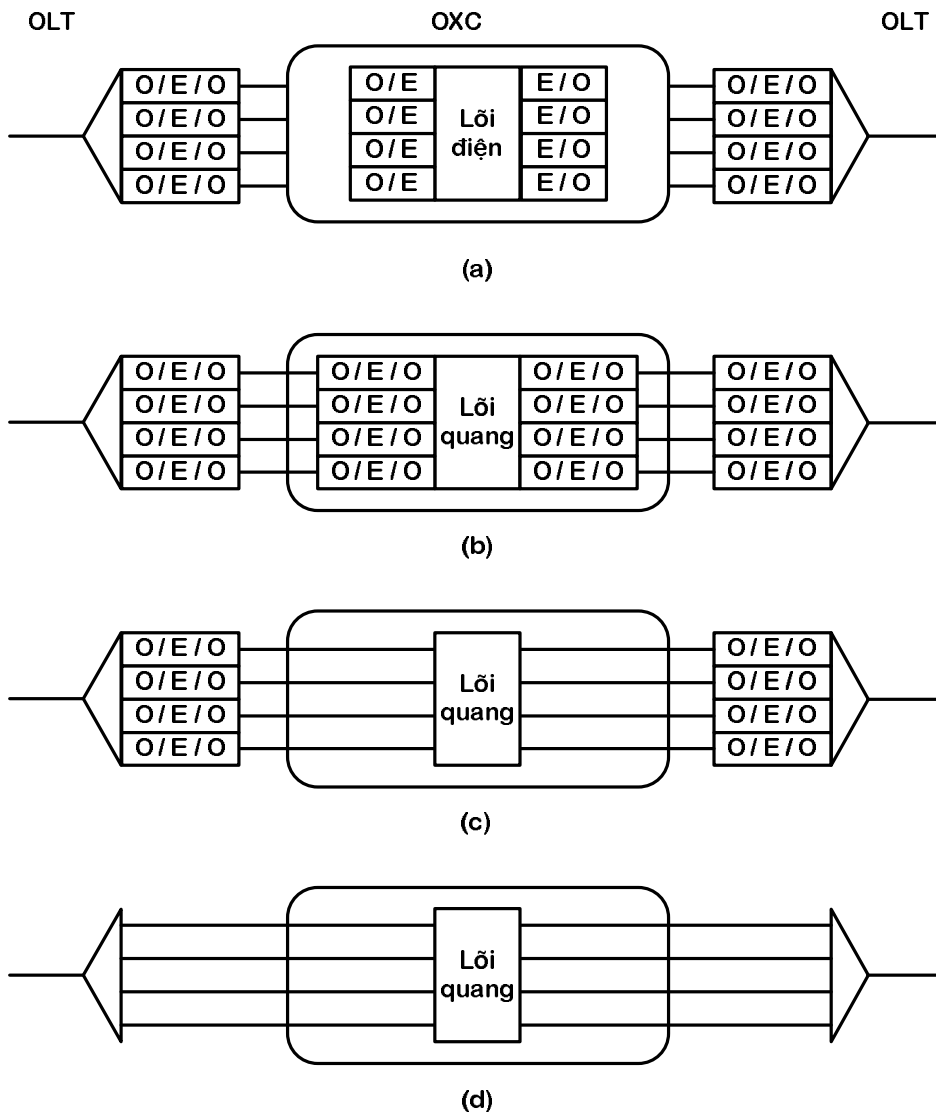
Một OXC thường phải đáp ứng được các yêu cầu cơ bản như sau:

- Cung cấp dịch vụ: OXC phải hỗ trợ khả năng cung cấp các đường quang trong mạng một cách tự động mà không cần sự can thiệp của nhà quản lý hệ thống, chẳng hạn như khả năng đáp ứng thêm kênh bước sóng nếu nhu cầu băng thông tăng lên...
- Bảo vệ: bảo vệ đường quang đối với các sự cố đứt cáp hoặc sự cố nút mạng là một trong những yêu cầu quan trọng đối với các bộ OXC.
- Trong suốt đối với tốc độ truyền dẫn bit: là khả năng chuyển mạch các tín hiệu có tốc độ bit và định dạng khung truyền khác nhau.
- Giám sát chất lượng truyền dẫn: cho phép khả năng trích tín hiệu đi đến qua một cổng khác để thực hiện chức năng đo đạc, xác định và giám sát chất lượng truyền dẫn.
- Chuyển đổi bước sóng: bước sóng ở đầu vào i , chuyển mạch để đến đầu ra j có thể cũng được chuyển đổi thành bước sóng khác.
- Ghép và nhóm tín hiệu (Multiplexing and Grooming): cho phép hoạt động với các tín hiệu khách hàng có tốc độ bit không tương ứng với tốc độ bit của tín hiệu truyền trong lớp kênh quang.

c. Các cấu hình cho OXC

Một bộ OXC có thể phân làm hai phần: phần lõi chuyển mạch và phần cổng giao diện. Phần lõi thực hiện các chức năng kết nối chéo quang trong khi phần cổng giao diện thực hiện giao tiếp với tín hiệu khách hàng. Chú ý rằng thông thường thì cổng giao diện là các card chứa các bộ chuyển đổi quang-điện-quang, hoặc bộ chuyển đổi quang-điện, tuy nhiên đối với cấu hình phần lõi chuyển mạch là toàn quang thì phần lõi được nối trực tiếp với các bộ MUX/DEMUX của các OLT hoặc OADM mà không cần qua bộ chuyển đổi quang-điện-quang ở phần giao diện. Các cấu hình cho OXC được cho như trên hình 1.58. Các cấu hình trên phân biệt nhau ở điểm bản chất chuyển mạch quang hay điện, có sử dụng các bộ chuyển đổi quang-điện-quang hay không và cách kết nối với các thiết bị xung quanh. So sánh giữa các cấu hình được cho như trong bảng 1.4.

Hình 1.58 Các kiểu triển khai OXC khác nhau. (a) Lõi chuyển mạch điện. (b) Lõi chuyển mạch quang bao quanh bởi bộ chuyển đổi O/E/O. (c) Lõi chuyển mạch quang nối trực tiếp đến các bộ chuyển đổi tín hiệu trong thiết bị WDM; (d) Lõi chuyển mạch quang nối trực tiếp đến bộ ghép kênh/phân kênh bên trong OLT. Chỉ một OLT được vẽ ở mỗi phía trên hình, mặc dù thật sự một OXC có thể kết nối đến nhiều OLT.



Bảng 1.4 So sánh giữa các cấu hình của OXC

Thuộc tính	Cấu hình 1.58 (a)	Cấu hình 1.58 (b)	Cấu hình 1.58 (c)	Cấu hình 1.58 (d)
Nhóm luồng tín hiệu tốc độ thấp	Có	Không	Không	Không

Thuộc tính	Cấu hình 1.58 (a)	Cấu hình 1.58 (b)	Cấu hình 1.58 (c)	Cấu hình 1.58 (d)
Dung lượng chuyển mạch	Thấp	Cao	Cao	Cao nhất
Chuyển đổi bước sóng	Có	Có	Có	Không
Giám sát chất lượng truyền dẫn	BER	BER	Công suất quang	Công suất quang
Giao diện tại các OLT	SR/VSR	SR/VSR	IR	Phụ thuộc vào yếu tố khác
Chi phí sản xuất một cổng	Trung bình	Cao	Trung bình	Thấp
Tiêu thụ năng lượng	Cao	Cao	Trung bình	Thấp
Chiếm không gian	Cao	Cao	Trung bình	Thấp

Lỗi chuyển mạch điện

Lỗi chuyển mạch điện thực hiện chuyển mạch các tín hiệu điện. Nó có thể thực hiện nhóm các luồng lưu lượng có tốc độ bit nhỏ lại thành luồng lưu lượng có tốc độ bit là tốc độ bit truyền trên kênh bước sóng thuộc lớp kênh quang. Lỗi chuyển mạch điện thường được thiết kế với tổng lưu lượng mà nó có thể xử lý. Chẳng hạn như tổng lưu lượng có thể xử lý của một lỗi chuyển mạch điện là 1.28 Tbps, khi đó, nó có thể thực hiện chuyển mạch tới 512 luồng STM-16 hoặc 128 luồng STM-64. Do linh kiện hoạt động với tín hiệu điện phụ thuộc vào tốc độ bit nên về lâu dài, khi tốc độ bit cao thì các OXC dùng lỗi chuyển mạch điện sẽ đắt hơn do các linh kiện điện tử hoạt động với tốc độ càng cao càng khó chế tạo. Tuy nhiên, do hoạt động dựa trên các tín hiệu điện, lỗi chuyển mạch điện cho khả năng giám sát chất lượng tín hiệu tốt thông qua chỉ số BER, kích hoạt chuyển mạch bảo vệ khi chất lượng truyền dẫn không đảm bảo. Cấu hình OXC dùng lỗi chuyển mạch điện được cho trên hình 1.58(a).

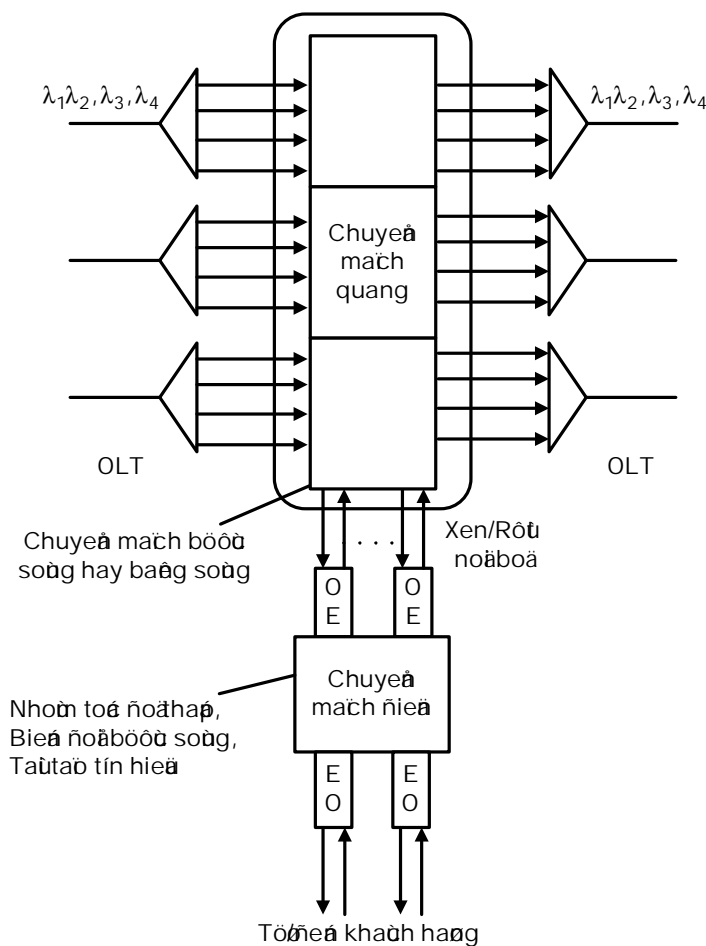
Lỗi chuyển mạch quang

Khác với lỗi chuyển mạch điện, lỗi chuyển mạch quang thực hiện chức năng kết nối chéo các tín hiệu quang. Do đó, lỗi chuyển mạch quang trong suốt với tốc độ bit truyền dẫn, cung cấp khả năng mở rộng cho nhu cầu tăng tốc độ truyền dẫn trong tương lai. Tuy nhiên, ngoại trừ cấu hình trên hình 1.58(b) thì khả năng giám sát chất lượng truyền dẫn của OXC khi dùng lỗi chuyển mạch quang không tốt bằng lỗi chuyển mạch điện do chỉ có khả năng giám sát thông qua công suất quang đo được ở đầu vào. Các cấu hình OXC trên hình 1.58(b), (c), (d) đều dùng lỗi chuyển mạch quang. Cả ba cấu hình khác nhau ở chỗ nó kết nối với các thiết bị quanh nó (thường là OLT hoặc OADM). Cấu hình OXC như trên hình 1.58(b) kết nối với các OLT thông qua bộ chuyển đổi tín hiệu quang-điện-quang với giao diện phía kênh quang cho phép khoảng cách giữa OXC và OLT là ngắn hoặc cực ngắn. Cấu hình OXC như trên hình 1.58(c) thì không dùng các bộ chuyển đổi tín hiệu quang-điện-quang mà tận dụng bộ chuyển đổi này ở các OLT. Cấu hình OXC như trên hình 1.58(d)

không dùng bất cứ bộ chuyển đổi tín hiệu nào trong kết nối giữa OXC và các OLT. Cấu hình này mang tính kinh tế nhất nhưng trong điều kiện hiện tại là không thực tế vì nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn có thể mua thiết bị của các nhà sản xuất khác nhau, dễ dẫn đến vấn đề không tương thích bước sóng hoạt động.

d. Cấu hình toàn quang của OXC

Hình 1.59 Một nút mạng toàn quang thực sự kết hợp bộ kết nối chéo lõi quang và bộ kết nối chéo lõi điện. Tín hiệu được chuyển mạch dạng quang nhưng được chuyển xuống dạng điện khi chúng cần nhóm lại, tái tạo hoặc chuyển đổi từ một bước sóng này đến một bước sóng khác.

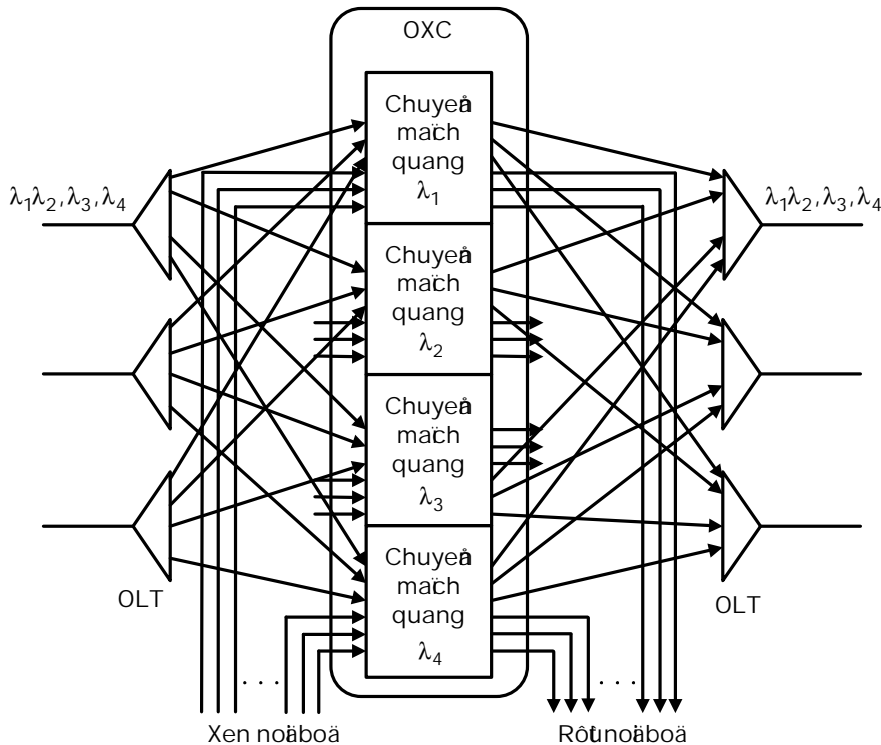


Trong phần này ta sẽ xét chi tiết các cấu hình toàn quang của OXC do có tính kinh tế cao so với tất cả các cấu hình khác. Đối với cấu hình toàn quang OXC mà ta đã xét trong hình 1.58(d), ta thấy nó có các yếu điểm là: không có khả năng nhóm tín hiệu tốc độ thấp, không có khả năng chuyển đổi bước sóng và không có khả năng tái tạo tín hiệu do hoạt động hoàn toàn độc lập với lớp điện. Để khắc phục các vấn đề trên, ta thêm vào cấu hình OXC lõi chuyển mạch điện. Lõi chuyển mạch điện này

thực hiện chức năng hoàn toàn giống như trong cấu hình OXC trên hình 1.58(a) mà ta đã xét. Như vậy, vừa đảm bảo tính kinh tế khi phần lớn các tín hiệu bước sóng được lõi chuyển mạch quang thực hiện chuyển mạch, vừa đảm bảo giải quyết các nhược điểm của cấu hình toàn quang xét ở trên với một phần nhỏ kênh bước sóng yêu cầu thực hiện các tác vụ thêm (chuyển đổi bước sóng chẳng hạn).

Như ta đã biết, chế tạo một phần lõi chuyển mạch quang dung lượng lớn hiện nay thực hiện còn nhiều khó khăn. Nên cấu hình toàn quang OXC như trên hình 1.59 tuy đơn giản về mặt mô hình nhưng lại rất phức tạp trong công nghệ chế tạo được lõi chuyển mạch quang. Giả sử trên thực tế OXC được nối với 8 OLT, mỗi OLT truyền trên sợi quang 32 kênh bước sóng. Như vậy, với mô hình đưa ra cần phải chế tạo được lõi chuyển mạch quang dung lượng 256×256 mới đáp ứng đủ yêu cầu phục vụ mạng. Trong điều kiện công nghệ hiện tại điều này là hết sức khó khăn. Để khắc phục điều này, người ta đưa ra khái niệm mặt phẳng bước sóng.

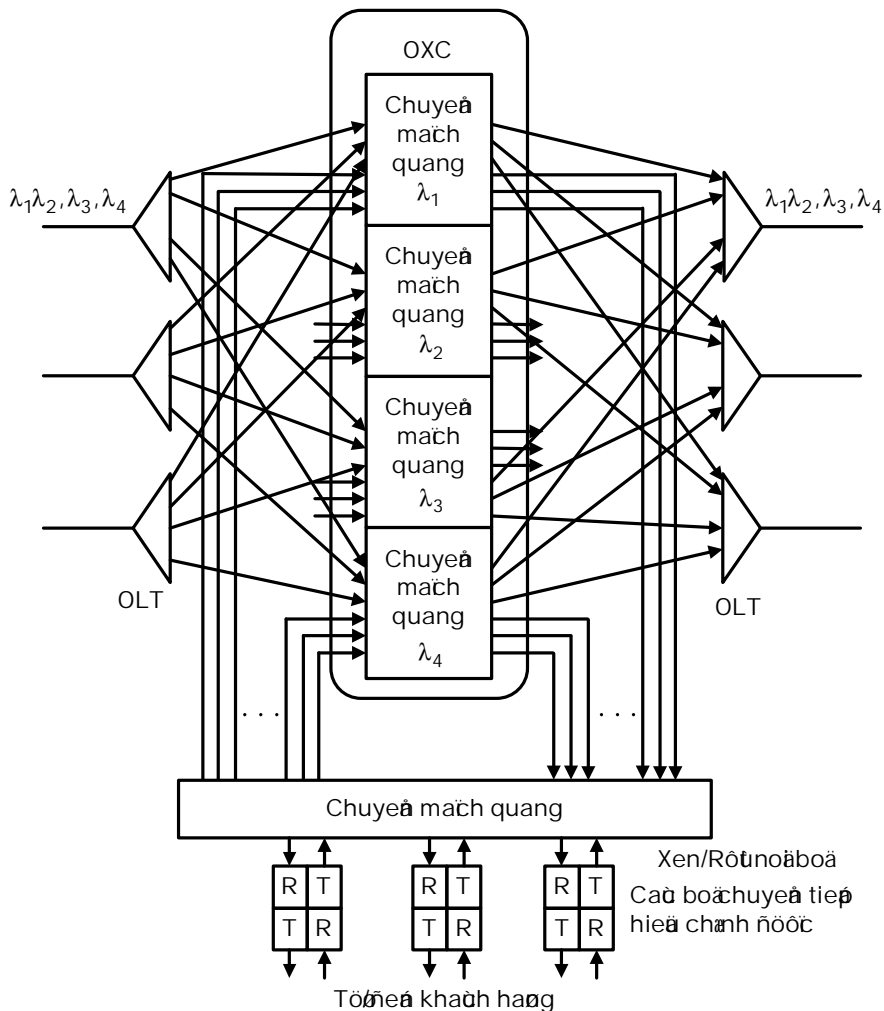
Hình 1.60 Một OXC mặt phẳng bước sóng lõi quang, bao gồm một mặt phẳng các bộ chuyển mạch quang, mỗi bộ cho một bước sóng. Với F sợi quang và W bước sóng trên mỗi sợi quang, nếu muốn linh hoạt tách và ghép bước sóng bất kỳ, mỗi bộ chuyển mạch cần có kích thước $2F \times 2F$.



Mặt phẳng bước sóng gồm các phần tử cơ bản là các bộ chuyển mạch với dung lượng trung bình, mỗi bộ chuyển mạch chỉ chịu trách nhiệm chuyển mạch một bước sóng. Nguyên lý hoạt động của mặt phẳng bước sóng được cho như trên hình

1.60. Mặt phẳng bước sóng được cấu tạo sao cho các tín hiệu WDM trên sợi quang được đi qua chặng 1 là các bộ DEMUX, tách thành các bước sóng riêng biệt nhau. Sau đó, các kênh tín hiệu cùng bước sóng được đưa đến các cổng đầu vào của một bộ chuyển mạch nào đó. Bộ chuyển mạch này chuyển mạch tín hiệu từ cổng này đến cổng kia mà không quan tâm đến việc chuyển đổi bước sóng. Chức năng chuyển đổi bước sóng không thuộc mặt phẳng pha. Tiếp theo, đầu ra của một bộ chuyển mạch được đưa đến các bộ MUX để ghép tín hiệu vào sợi quang truyền đi.

Hình 1.61 Giải quyết vấn đề kết cuối xen/rớt trong phương pháp mặt phẳng bước sóng. Cần có thêm một bộ chuyển mạch quang giữa các bộ chuyển đổi tín hiệu điều chỉnh được và các bộ chuyển mạch mặt phẳng bước sóng. Ở đây, T là bộ phát điều chỉnh được trên một phía của mạng WDM và R là bộ thu.



Như vậy, nếu cũng trong cùng một điều kiện OXC được nối với 8 OLT, mỗi OLT truyền trên sợi quang 32 kênh bước sóng thì ta phải dùng 32 phần tử chuyển

mạch dung lượng 8×8 ; 8 bộ MUX và 8 bộ DEMUX. Rõ ràng đã giảm dung lượng của bộ chuyển mạch đi nhiều lần, phù hợp với khả năng chế tạo trong điều kiện hiện tại hơn. Tổng quát nếu sử dụng F OLT (tương ứng với F sợi quang) với W bước sóng trên mỗi sợi quang thì cần có $W(2F \times 2F)$ bộ chuyển mạch một bước sóng.

Như vậy, phương pháp mặt phẳng bước sóng cung cấp giải pháp kinh tế hơn so với việc sử dụng các bộ chuyển mạch quang không nghẽn kích thước lớn. Tuy nhiên, trong phần thảo luận ở trên, chúng ta không xem xét cách tối ưu hoá số lượng các kết cuối xen/rót (là các bộ chuyển đổi tín hiệu hoặc giao diện O/E trên các lõi chuyển mạch điện). Cả hai hình 1.59 và 1.60 đều giả sử rằng có đủ số cổng để kết cuối tất cả WF tín hiệu. Điều này hầu như không có, trên thực tế chỉ có một phần lưu lượng cần được tách và các bộ kết cuối rất tốn kém. Hơn nữa, nếu chúng ta thực sự cần WF kết cuối trên mỗi chuyển mạch điện, cấu hình tốt nhất là dùng cấu hình lõi điện ở hình 1.48 (a) không có các bộ chuyển mạch mặt phẳng bước sóng.

Nếu có tổng cộng T kết cuối, tất cả đều có bộ phát laser điều chỉnh được và chúng ta muốn tách bất kỳ tín hiệu nào trong WF tín hiệu, thì cần một bộ chuyển mạch quang TxWF giữa các bộ chuyển mạch mặt phẳng bước sóng và các bộ kết cuối, như trên hình 1.61. Ngược lại, với bộ chuyển mạch không nghẽn lớn, chúng ta có thể kết nối đơn giản T kết cuối với T cổng của chuyển mạch này, kết quả là có một bộ chuyển mạch $(WF+T) \times (WF+T)$. Do đó trong vài trường hợp phương pháp mặt phẳng bước sóng không được ứng dụng.

Tóm lại, phương pháp mặt phẳng bước sóng cần tính đến số lượng sợi, phần lưu lượng xen/rót, số lượng kết cuối và khả năng điều chỉnh của chúng như là các tham số riêng biệt trong thiết kế. Với bộ chuyển mạch kích thước lớn, chúng ta có thể phân chia các cổng một cách linh hoạt để tính sự thay đổi của tất cả các thông số này. Hiện nay cả OXC lõi điện và lõi quang đều được thương mại hoá. OXC lõi điện với tổng dung lượng lên đến vài Tb/s, khả năng nhóm đến các luồng STS-1 (51Mb/s), đã được sản xuất. OXC lõi quang với trên 1000 cổng và OXC mặt phẳng bước sóng cũng sắp được tung ra thị trường.

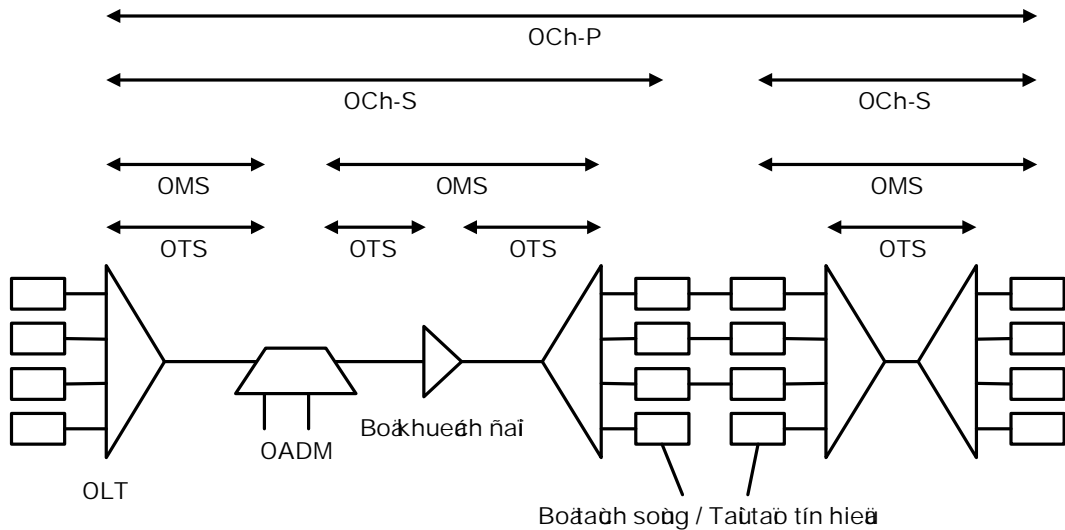
4. Bảo vệ mạng WDM

Cung cấp sự phục hồi chống lại sự hư hỏng là một yêu cầu quan trọng cho các mạng tốc độ cao. Những mạng này ngày càng mang nhiều dữ liệu. Do đó một gián đoạn thông tin cũng làm ảnh hưởng tới hàng triệu người sử dụng và gây thiệt hại nghiêm trọng về mặt kinh tế. Các nhà cung cấp băng thông và dịch vụ phải bảo đảm độ thông (availability) của các kết nối là 99.999% và thời gian gián đoạn nhỏ hơn 3 phút /năm. Biện pháp thực tế nhất để đạt được độ thông này là làm mạng có khả năng sống sót (survivable) tức là vẫn tiếp tục cung cấp dịch vụ ngay cả trong trường hợp hư hỏng. Chuyển mạch bảo vệ là kỹ thuật chính để bảo đảm tính sống còn này. Kỹ thuật chuyển mạch bảo vệ bao gồm việc bảo đảm một vài dung lượng dư thừa trong mạng và tự động định tuyến lưu lượng theo dung lượng dư thừa tránh khỏi chỗ

hư hỏng. Trong phần này chúng ta sẽ tập trung xem xét các cấu hình chuyển mạch bảo vệ cho lớp quang bảo đảm độ an toàn cho các lớp khách hàng mà nó phục vụ.

4.1 Các lớp trong lớp quang

Hình 1.62 Mô hình mạng quang với những lớp con cơ bản.



Lớp quang là một thực thể phức tạp thực hiện các chức năng như ghép kênh theo bước sóng, chuyển mạch và định tuyến bước sóng, giám sát chất lượng mạng tại các mức khác nhau trong mạng. Để giúp mô tả những chức năng quản lý mạng, cũng như xác định ranh giới phù hợp giữa các loại thiết bị khác nhau, cần thiết phải tiếp tục chia lớp quang thành nhiều lớp con. ITU đã định nghĩa ba lớp con trong lớp quang như minh họa trên hình 1.62. Trên cùng là *lớp kênh quang OCh (optical layer)*. Lớp này thực hiện chức năng định tuyến chính từ đầu cuối đến đầu cuối cho các đường quang. Chúng ta đã sử dụng thuật ngữ đường quang để biểu thị một kết nối quang. Chính xác hơn, một đường quang là một đường kênh quang giữa hai nút mạng toàn bộ một bước sóng của lưu lượng. Một đường quang đi qua nhiều liên kết trong mạng, ở đó nó được ghép với nhiều bước sóng khác mang những đường quang khác. Nó cũng có thể được tái tạo dọc trên đường truyền. Chú ý rằng chúng không bao gồm bất kỳ chức năng ghép kênh phân kênh điện theo thời gian nào trong lớp quang. Đây là chức năng lớp cao hơn (ví dụ SONET/SDH). Vì vậy một kết nối 10GB/s giữa hai điểm mà không có ghép kênh/tách kênh được xem là một đường quang.

Mỗi tuyến giữa các OLT hay OADM thể hiện *một đoạn ghép kênh quang OMS (Optical Multiplex Section)* mang nhiều bước sóng. Mỗi OMS lại bao gồm một vài đoạn tuyến (link segment), mỗi đoạn là một phần của một tuyến giữa hai tầng khuếch đại quang. Mỗi phần này là *một đoạn truyền dẫn quang OTS (optical transmission section)*. OTS bao gồm các OMS cùng với một kênh giám sát quang (OSC) bổ xung.

Mỗi lớp kênh quang được tiếp tục chia thành những lớp nhỏ hơn. ITU G.709 mô tả những lớp này. Để thảo luận đơn giản, chúng ta sẽ sử dụng một số thuật ngữ hơi khác với định nghĩa của ITU. *Đoạn kênh quang trong suốt OCh-TS (Optical Channel-Transparent)* thể hiện một đoạn (section) của đường quang bên trong mạng con toàn quang (all-optical subnetwork). Bên trong đoạn này, đường quang được truyền đi không có bất kỳ một sự biến đổi vào miền điện nào. Tại ranh giới của OCh-TS, một đường quang được tái tạo. Trên OCh-TS là *đoạn kênh quang OCh-S (Optical Channel Section)*. Lớp này thêm vào phần mào đầu với chức năng kiểm tra lỗi (FEC) vào đường quang, đó là điều kiện để truyền tín hiệu trong tất cả các lớp mạng quang phía dưới. Cuối cùng, *đường kênh quang OCh-P (Optical Channel Path)* thể hiện truyền tải từ đầu cuối đến đầu cuối của một đường quang qua nhiều trạm tái tạo trong đường truyền.

Theo nguyên tắc, một khi giao diện giữa các lớp mạng khác nhau được xác định rõ, các nhà cung cấp thiết bị sẽ có thể cung cấp các thiết bị chuẩn hoá từ bộ khuếch đại quang đến các tuyến WDM đến toàn bộ mạng WDM. Quan trọng không kém là việc phân lớp này phân bổ những chức năng quản lý cần thiết. Ví dụ việc tách và xen bước sóng là chức năng được thực hiện ở lớp kênh quang. Việc giám sát công suất quang trong mỗi bước sóng cũng phụ thuộc vào lớp này, nhưng việc giám sát công suất tổng lại phụ thuộc vào lớp OTS, hay lớp OMS, phụ thuộc vào kênh giám sát quang được đưa vào hay không.

4.2 Tại sao phải bảo vệ lớp quang

Lớp quang cung cấp những đường quang (lightpath) cho lớp khách hàng như là các lớp SONET, IP hoặc ATM (các lớp sử dụng những dịch vụ cung cấp bởi lớp quang gọi là lớp khách hàng của lớp quang). Các lớp khách hàng này hoạt động độc lập với nhau, có cơ chế bảo vệ riêng của mình và không dựa vào cơ chế bảo vệ được cung cấp bởi lớp khác. Tuy nhiên trên thực tế vẫn cần phải bảo vệ lớp quang do những lý do sau:

- Mạng SONET/SDH có kết hợp các chức năng bảo vệ mở rộng nhưng các mạng IP, ATM và ESCON thì không, do đó, các lớp khách hàng này mong muốn lớp mạng quang phải có các phương thức bảo vệ để mạng của họ bảo đảm được độ thông như các mạng SONET/SDH
- Có thể thực hiện các biện pháp bảo vệ trên các lớp khách hàng nhưng thực hiện bảo vệ trên lớp quang sẽ hiệu quả về mặt kinh tế hơn.
- Lớp quang có thể xử lý một số sự cố hiệu quả hơn so với lớp khách hàng. Một mạng WDM tải lưu lượng trên một vài bước sóng trên một sợi quang. Không có bảo vệ tại lớp quang, đứt một sợi quang sẽ làm cho các lớp khách hàng phục hồi lưu lượng của mình một cách độc lập. Thêm vào đó, hệ thống quản lý mạng sẽ bị tràn ngập bởi một lượng lớn cảnh báo cho sự cố này. Thay vào đó, nếu lớp quang phục hồi sự cố này một số thực thể phải định tuyến lại ít hơn và do đó quá trình xử lý nhanh hơn và đơn giản hơn.

- Bảo vệ tại lớp quang cung cấp thêm khả năng phục hồi trong mạng, ví dụ, chống lại nhiễu sự cố đồng thời.
- Cuối cùng, bảo vệ trong SONET được dựa trên vòng (UPSR/BLSR). Phương pháp dựa trên vòng đòi hỏi dung lượng dự trữ cho bảo vệ bằng với dung lượng đang hoạt động. Trong lớp quang, nhiều phương pháp bảo vệ khác dựa trên cấu hình lưới đang được phát triển. Điều này hứa hẹn dùng ít dung lượng hơn cho việc bảo vệ.

Tuy nhiên bảo vệ tại lớp quang cũng có những giới hạn của nó:

- Không phải tất cả các sự cố đều có thể xử lý tại lớp quang. Nếu bộ phát laser gắn trong một thiết bị đầu cuối của khách hàng hư, lớp quang không thể xử lý được gì. Do đó thiết bị khách hàng hư hỏng cần được xử lý ở lớp khách hàng.
- Lớp quang có thể không có khả năng phát hiện các điều kiện tương ứng để kích hoạt chuyển mạch bảo vệ. Ví dụ, mạng trong suốt chỉ có thể giám sát được có công suất hay mất công suất (và trong vài trường hợp là tỷ số tín hiệu-trên-tạp âm quang). Lớp quang còn có thể đo được sự suy giảm công suất nhưng nó không thể biết được mức công suất nào là phù hợp vì các mức này phụ thuộc vào loại tín hiệu được truyền đi. Do đó nó chỉ có thể kích hoạt chuyển mạch bảo vệ khi phát hiện mất nguồn quang. Tỷ số lỗi bit hiển thị chất lượng tín hiệu chính xác hơn, tuy nhiên mạng trong suốt không thể đo được tỷ số lỗi.
- Lớp quang bảo vệ lưu lượng theo một đơn vị là các đường quang và nó không thể bảo vệ một phần lưu lượng trong một đường mà không bảo vệ phần khác. Do đó chức năng này cần được thực hiện ở lớp khách hàng.
- Tuyến bảo vệ trong lớp quang có thể dài hơn tuyến chính và chọn lựa tuyến thay thế có thể bị giới hạn bởi quỹ công suất của tuyến.
- Cần phải quan tâm đến việc liên kết hoạt động của các phương thức bảo vệ giữa các lớp khác nhau.

4.3 Các cấu hình bảo vệ lớp quang

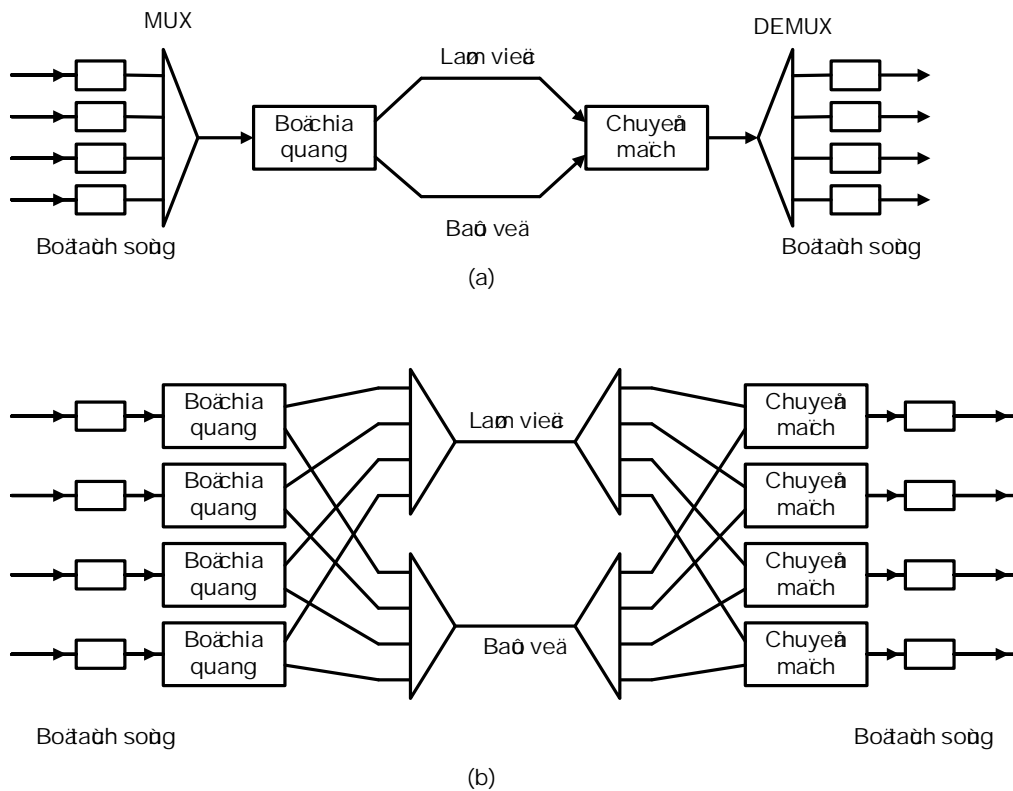
Về nguyên lý hầu hết các cấu hình bảo vệ lớp quang đều tương tự như các cấu hình tương đương trong SONET và SDH. Tuy nhiên, hiện thực chúng lại khác nhau do một vài lý do: giá thiết bị cho các kết nối WDM tăng theo số bước sóng được ghép hay được kết cuối, giới hạn về quỹ công suất và có thể phải thực hiện biến đổi bước sóng. Bảng 1.5 và 1.6 dưới đây tóm tắt các cấu hình bảo vệ cho lớp quang.

Bảng 1.5 Tóm tắt các cấu hình bảo vệ quang hoạt động trên lớp đoạn ghép kênh quang. Có cả hai loại vòng bảo vệ dành riêng và chia sẻ.

	1+1	1:1	OMS-DPRing	OMS-SPRing
Dạng topology	Dành riêng Điểm-Điểm	Chia sẻ Điểm-Điểm	Dành riêng Vòng	Chia sẻ Vòng

Bảng 1.6: Tóm tắt các cấu hình bảo vệ hoạt động trong lớp kênh quang

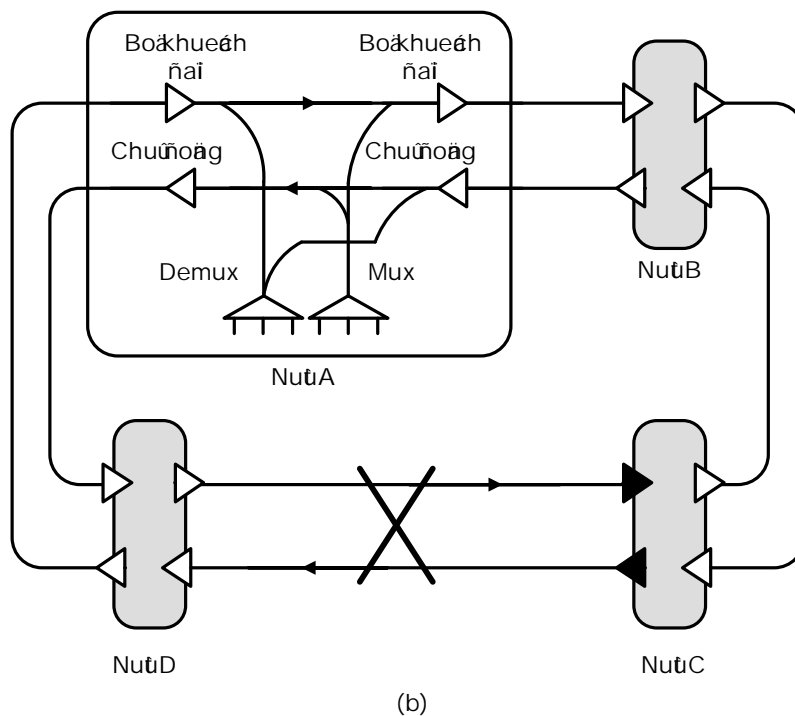
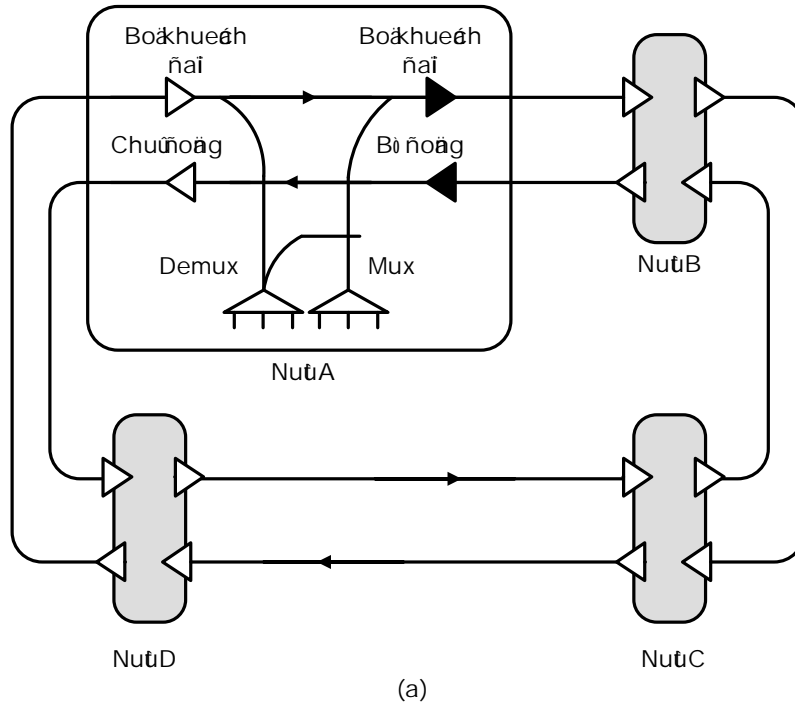
	1+1	OCh-SPRing	OCh-Mesh
Dạng tô pô	Dành riêng Lưới	Chia sẻ Vòng	Chia sẻ Lưới

a. Bảo vệ 1+1 OMS**Hình 1.63** So sánh các cấu hình bảo vệ: (a) 1+1 OMS và (b) 1+1 Och

Đây có thể là phương pháp bảo vệ ở lớp quang đơn giản nhất và được trình bày ở hình 1.63(a). Tín hiệu tổng WDM được bắc cầu qua hai đường riêng biệt, sử dụng bộ chia quang. Tại đầu cuối thu, một bộ chuyển mạch quang được dùng để lựa chọn tín hiệu tốt hơn giữa hai tín hiệu đến, chủ yếu dựa trên việc dò có hay mất tín hiệu. Việc chia tín hiệu làm tăng suy hao thêm 3dB và bộ chuyển mạch cũng bổ sung thêm một ít suy hao (< 1dB). Một cách khác là sử dụng bộ khuếch đại quang trên mỗi sợi quang và bộ kết hợp thụ động để kết hợp hai hướng tại bộ thu. Tại một thời điểm, một bộ khuếch đại được kích hoạt và một bộ tắt đi. Cách này có thuận lợi là tránh được sự cố ở một điểm (bộ switch) trong hệ thống, nhưng thực hiện có thể đắt tiền hơn.

b. Bảo vệ 1:1 OMS

Hình 1.64 Bảo vệ OMS-DPRing. (a) Hoạt động bình thường. Một cặp khuếch đại được tắt đi và các cặp khác được mở, tạo thành một bus. (b) Sau khi hư hỏng, hai bộ khuếch đại hiện đang tắt được bật lên và hai bộ khuếch đại bên cạnh chỗ hư hỏng được tắt đi tạo thành tuyến thay thế và phục hồi lưu lượng.



Sơ đồ bảo vệ này giống như sơ đồ SONET/SDH 1:1 và cũng có lợi ích tương tự hỗ trợ lưu lượng có độ ưu tiên thấp và có khả năng chia sẻ một tuyến bảo vệ cho N tuyến làm việc. So sánh với sơ đồ 1+1 của hình 1.58(a), sơ đồ này thường sử dụng một bộ chuyển mạch tại máy phát thay cho bộ chia, kết quả là tổng suy hao đường truyền nhỏ hơn. Tương tự như trong SONET, giao thức APS cần được cung cấp để hai đầu cuối của tuyến phối hợp hoạt động.

c. Vòng bảo vệ dành riêng OMS (OMS-DPRing)

Vòng bảo vệ dành riêng (OMS-DPRing) ở lớp quang tương tự như SONET/SDH UPSR, ngoại trừ một điều là nó hoạt động trên lớp OMS trong khi UPSR hoạt động ở lớp đường dẫn SONET/SDH. Phương pháp này có thể xem như là phương pháp chuyển mạch trên vòng quang đơn hướng ULSR (Unidirectional Line-Switched Ring).

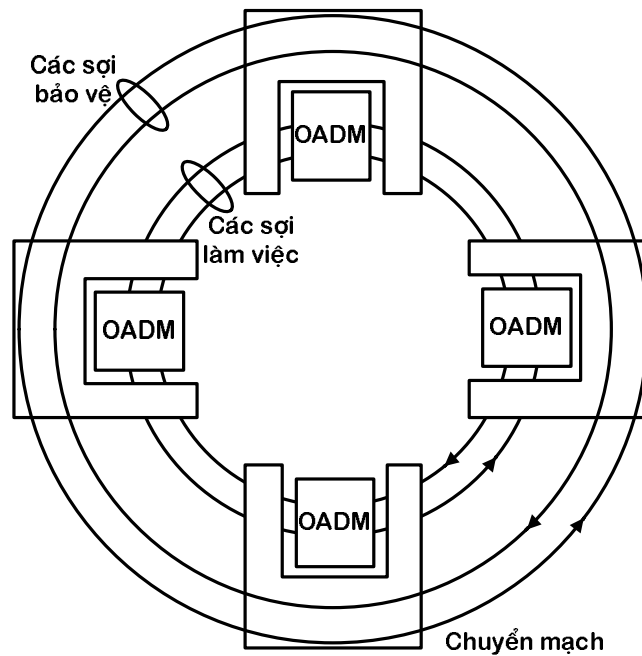
Một sơ đồ hiện thực của OM-DPRing được biểu diễn trên hình 1.64. Các tín hiệu được ghép vào vòng và tách ra bằng các coupler thụ động. Mỗi nút mạng truyền tín hiệu trên cả hai hướng của vòng. Lưu ý các nút khác nhau phải truyền trên các bước sóng khác nhau để tránh xung đột. Ở điều kiện bình thường vòng hoạt động như một bus, với một cặp khuếch đại bị tắt đi trong cả vòng, còn các bộ khuếch đại khác thì làm việc. Khi một tuyến hỏng, các bộ khuếch đại cạnh tuyến hỏng được tắt đi và bộ khuếch đại lúc trước không hoạt động giờ được kích hoạt để khôi phục lưu lượng. Ví dụ, trong hình 1.64(a), cặp khuếch đại bên phải nút A tắt đi trong điều kiện hoạt động bình thường. Trong hình 1.64(b) khi tuyến CD hỏng, cặp khuếch đại ở C, kế tuyến bị hư, được tắt đi và cặp khuếch đại không được kích hoạt lúc đầu tại A giờ được kích hoạt tạo một bus mới để phục hồi lưu lượng.

d. Vòng bảo vệ chia sẻ OMS (OMS-SPRing)

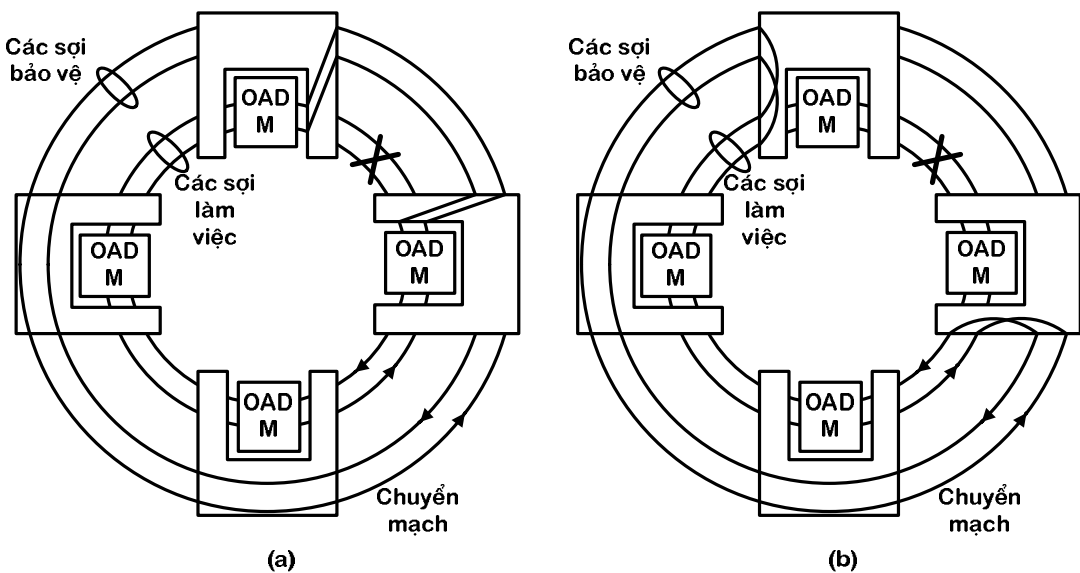
Vòng bảo vệ chia sẻ OMS-SPRing (Shared Protection Ring) tương tự như SONET/SDH BLSR/4 nhưng có một số thay đổi. Một cấu hình của vòng bốn sợi quang được trình bày trên hình 1.65. Hai sợi quang được kết nối với thiết bị WDM và hai sợi còn lại nối quanh vòng ring được dùng cho mục đích bảo vệ và không phải gắn vào thiết bị WDM. Khi sợi quang bị đứt, tín hiệu được chuyển mạch đoạn hoặc chuyển mạch vòng lên những sợi quang bảo vệ, như hình 1.61. Trong cả hai trường hợp, không có thiết bị WDM trên sợi quang bảo vệ không những tiết kiệm được giá thành mà còn bảo đảm suy hao ít hơn trên đường quanh vòng dành cho lưu lượng bảo vệ. Bộ khuếch đại quang có thể được dùng nếu cần, phụ thuộc vào độ suy hao của tuyến.

Có thể thực hiện OMS-SPRing hai sợi quang bằng cách dành riêng một nửa các bước sóng trên mỗi sợi quang cho bảo vệ. Nếu đảm bảo rằng bước sóng bảo vệ trên một sợi quang tương ứng với bước sóng làm việc trên sợi quang khác, tín hiệu có thể được định tuyến lại mà không cần chuyển đổi bước sóng. Tuy nhiên, sơ đồ này cần hai nhóm bước sóng được giải ghép và ghép tại mỗi nút, do đó chính xác đây không phải là hoạt động ở lớp OMS.

Hình 1.65 OMS-SPRing khi hoạt động bình thường. Chỉ có các sợi quang làm việc được nối với bộ ghép xen/rớt. Các sợi quang bảo vệ được nối quanh vòng.



Hình 1.66 OMS-SPRing sau khi hư hỏng. (a) Chuyển mạch đoạn. (b) Chuyển mạch vòng



e. Bảo vệ bộ chuyển tiếp 1:N (1:N Transponder Protection)

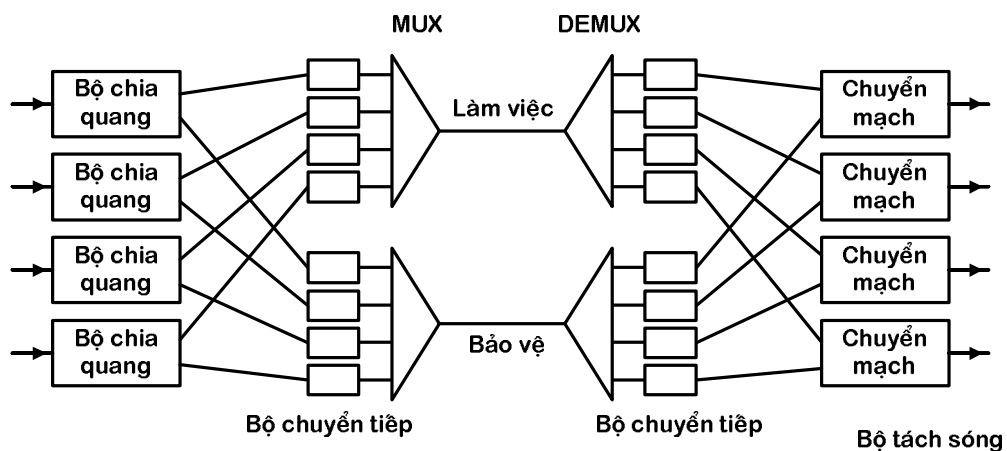
Các sơ đồ bảo vệ ở lớp OMS mà chúng ta đã thảo luận ở trên xử lý sự cố tuyến và sự cố tại nút mạng nhưng không xử lý sự cố tại thiết bị đầu cuối, đặc biệt

các bộ chuyển tiếp (transponder). Các bộ chuyển tiếp có thể được bảo vệ bằng cấu hình 1:N, sử dụng một bộ chuyển tiếp dự phòng cho tất cả N bộ chuyển tiếp làm việc. Một trong những vấn đề cần phải khắc phục là các bộ chuyển tiếp hiện nay hoạt động ở các bước sóng cố định và vì thế bộ chuyển tiếp dự phòng sẽ hoạt động ở các bước sóng khác với các bước sóng của bộ chuyển tiếp làm việc. Khi tín hiệu được chuyển mạch qua bộ chuyển tiếp dự phòng, chúng ta cần thiết lập một đường quang mới trên một bước sóng mới thông qua mạng. Một cách khác là có thể dùng một bộ phát laser hiệu chỉnh được trong bộ chuyển tiếp dự phòng.

f. Bảo vệ kênh quang dành riêng 1+1 (1+1 OCh Dedicated Protection)

Trong phương thức bảo vệ 1+1 OCh, hai đường quang trên hai tuyến khác nhau được thiết lập cho một kết nối. Như minh họa trên hình 1.63(b), tín hiệu khách hàng được chia tại đầu vào và đầu thu chọn lựa tín hiệu tốt hơn giữa hai đường quang này. Giống như SONET và SDH, phương pháp này không cần báo hiệu. Phương pháp này phù hợp với cấu hình điểm-điểm, vòng và mắt lưới. Ở cấu hình vòng, sơ đồ này còn gọi là vòng bảo vệ dành riêng cho kênh quang (OCh Dedicated Protection Ring) hoặc vòng chuyển mạch đơn hướng quang (Optical UPSR). Giống như SONET/SDH UPSR, cách này không hiệu quả trong sử dụng băng thông vì băng thông cho bảo vệ không chia sẻ được cho nhiều kết nối của khách hàng. Tuy nhiên, đây là một trong những cách đơn giản nhất và vì thế được thực hiện ở một số thiết bị của vài nhà sản xuất trong các bộ ghép xen rớt và bộ kết nối chéo.

Hình 1.67 Một dạng khác của phương pháp bảo vệ 1+1 OCh. Tín hiệu từ thiết bị khách hàng được chia ra và đưa đến hai bộ chuyển tiếp để truyền trên hai đường khác nhau và tại phía thu bộ chuyển mạch quang tại đầu ra sẽ chọn tín hiệu nào tốt hơn.



Hình 1.67 trình bày một hiện thực khác của phương pháp bảo vệ này, sử dụng các bộ cầu nối (bridge) và bộ chọn (selector) trong một nút. Ở đây, tín hiệu vào lớp quang được chia và gửi đến hai bộ chuyển tiếp và sau đó được định tuyến riêng

biệt qua mạng. Tại đầu thu, tín hiệu được kết thúc tại hai bộ chuyển tiếp và tín hiệu tốt hơn được lựa chọn, sau đó được gửi cho khách hàng. Trong hình 1.58, tín hiệu của khách hàng được đưa qua một bộ chuyển tiếp và được chia ra sau đó. Tại đầu thu, một trong hai tín hiệu được chọn lựa bởi bộ chuyển mạch quang trước khi được gửi cho khách hàng. Cách này sử dụng một nửa số bộ chuyển tiếp so với cách trước nhưng không bảo vệ chống lại hư hỏng bộ chuyển tiếp. Bên cạnh đó, có một vài yếu tố ảnh hưởng đến việc thực hiện phương pháp này hay phương pháp khác như tiêu chuẩn cho việc chuyển mạch từ một đường này sang đường khác và thời gian khôi phục sẽ khác nhau với những cách thực hiện khác nhau.

g. Vòng bảo vệ chia sẻ cho kênh quang (OCh-SPRing)

Vòng bảo vệ chia sẻ cho kênh quang OCh-SPRing là phương pháp bảo vệ giống như SONET/SDH BLSR/4. Tuy nhiên, BLSR hoạt động ở lớp đường dây (đoạn ghép kênh), trong khi OCh-SPRing hoạt động ở lớp kênh quang, không phải ở lớp ghép kênh. Đường làm việc được thiết lập theo đường ngắn nhất trên vòng. Khi đường làm việc hỏng, nó được phục hồi bằng chuyển mạch đoạn hay chuyển mạch vòng, như trong SONET/SDH BLSR/4. Các đường quang không chồng nhau trong vòng có thể sử dụng chung một bước sóng quanh vòng cho bảo vệ và cách sử dụng lại về mặt không gian này cho phép OCh-SPRing hoạt động hiệu quả hơn OCh-DPRing trong lưu lượng phân bố. Hoạt động của OCh-SPRing căn bản giống như SONET/SDH BLSR/4 tuy nhiên các sợi quang trong SONET/SDH BLSR/4 tương ứng với các bước sóng và các kết nối tương ứng với các đường quang. Giống như trong BLSR sự phối hợp nhanh giữa các nút trong vòng là cần thiết để giải quyết sự cố tại nút hoặc hỗ trợ lưu lượng có độ ưu tiên thấp.

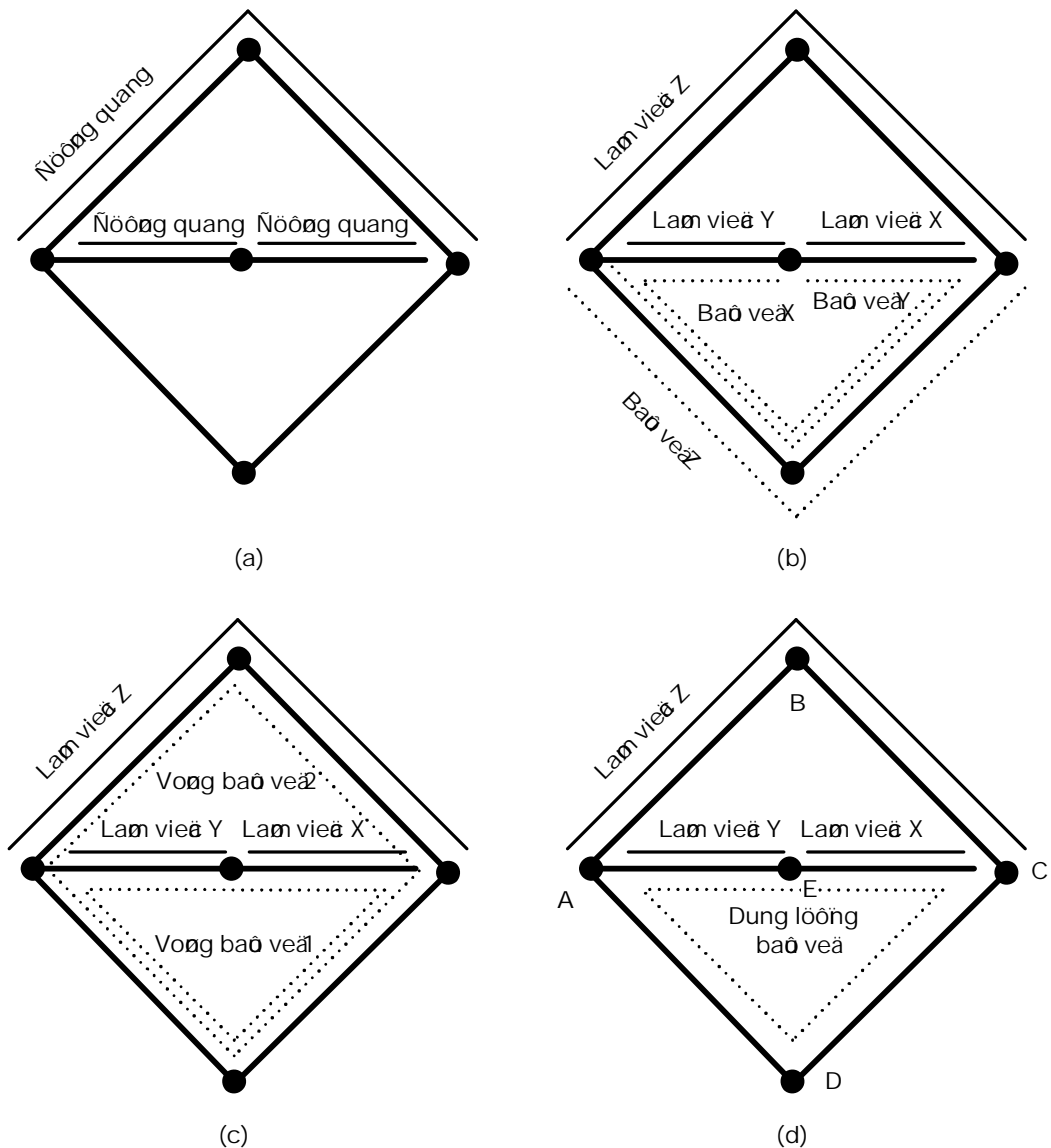
Bảo vệ dạng mắt lưới cho kênh quang (OCh-Mesh Protection)

Kiến trúc hình vòng thích hợp cho tô pô vật lý thưa thớt và trong các trường hợp khi phần lớn lưu lượng bị giới hạn trong một vòng (ring). Các mạng đường trục ngày nay thường là dày đặc và có dạng mắt lưới hơn là cấu hình vòng, với lưu lượng được phân bố đồng đều. Đối với những mạng này, các sơ đồ bảo vệ mắt lưới cung cấp bảo vệ hiệu quả hơn là dạng vòng. Nói chung tô pô càng dày đặc và càng mắt lưới thì bảo vệ dạng lưới càng có lợi. So với các cấu trúc vòng thì hiệu quả này có thể đạt từ 20% đến 60%.

Xét ví dụ mạng mắt lưới như trên hình 1.68(a) hỗ trợ ba đường quang. Giả sử tất cả chúng cần được bảo vệ. Mỗi kênh quang sử dụng một đơn vị dung lượng trên mỗi tuyến mà chúng đi qua. Hình 1.68(b) đề xuất sơ đồ bảo vệ 1+1 OCh dành riêng. Trong trường hợp này, tổng cộng cần 8 đơn vị dung lượng bảo vệ trong mạng. Hình 1.68(c) đề xuất cấu hình bảo vệ vòng chia sẻ (OCh-SPRing). Trong trường hợp này các đường X và Y cùng chia sẻ một băng thông bảo vệ trong khi đường quang Z có một vòng bảo vệ riêng. Cấu hình bảo vệ này cũng cần có 8 đơn vị dung lượng bảo vệ. Lưu ý, băng thông bảo vệ có thể giảm xuống còn 6 đơn vị bằng cách cho kênh X, Y chia sẻ một vòng nhưng sử dụng đường bảo vệ dành riêng cho kênh Z. Nhìn theo một cách khác

nếu sử dụng 8 đơn vị dung lượng cho bảo vệ, ta có thể thêm các đường quang nữa chia sẻ vòng bảo vệ cho kênh Z. Hình 1.68(d) là sơ đồ bảo vệ dạng mắt lưới. Trong sơ đồ này, các đường quang cũng được bảo vệ 1+1 nhưng các đường quang bảo vệ không được thiết lập trước mà chỉ được thiết lập khi có sự cố. Cấu hình này chỉ đối phó với một sự cố tại một thời điểm. Trong trường hợp này chỉ cần đơn vị dung lượng bảo vệ.

Hình 1.68 Ví dụ minh họa về hiệu quả sử dụng băng thông của phương pháp bảo vệ dạng mắt lưới so với bảo vệ dạng vòng ring. (a) Một mạng mắt lưới có ba đường quang. (b) Bảo vệ đường quang sử dụng cấu hình bảo vệ dành riêng 1+1. (c) Bảo vệ đường quang sử dụng vòng chia sẻ cho kênh quang OCh-SPRing. (d) Bảo vệ đường quang sử dụng sơ đồ mắt lưới cho kênh quang (OCh-Mesh).



Bảo vệ dạng mắt lưới không phải là mới. Chúng được sử dụng trong những năm 1980 trong các mạng có bộ kết nối chéo số. Tuy nhiên các sơ đồ này được tập trung hóa và vận hành chậm chạp, thường cần đến vài phút để khôi phục lại lưu lượng sau khi có sự cố. Việc bảo vệ cũng rất phức tạp trong quản lý và đã không có chuẩn áp dụng được. Sau khi SONET/SDH được chuẩn hoá và yêu cầu chuyển mạch nhanh 60ms trong vòng SONET/SDH được hiện thực, phương pháp phục hồi dựa trên dạng mắt lưới gần như bị bỏ qua.

Ngày nay dạng mắt lưới được tăng cường sử dụng vì những lý do sau:

- Năng lực xử lý cho mạng lưới đã được tăng lên tốc độ tính toán cho định tuyến và bảng thông dành cho quản lý mạng tăng lên.
- Các bộ kết nối chéo quang và bảng thông bảo vệ thiết bị lớp quang có các mức tốc độ (các đường quang) lớn hơn là các bộ các nối chéo hoạt động ở tốc độ DS1 và DS3. Vì thế có ít thực thể hơn để điều khiển và bảo vệ. Tuy nhiên tình trạng này sẽ thay đổi khi lưu lượng tăng nhanh.
- Các giao thức báo hiệu và định tuyến nhanh đã được phát triển cho các mạng dữ liệu khác như IP và ATM và nhiều giao thức đó có thể sửa đổi thích ứng để sử dụng cho lớp quang.
- Yêu cầu thời gian bảo vệ 60ms không phải là con số cứng nhắc. Nhiều nhà cung cấp bảng thông, quan tâm đến bảo vệ lưu lượng dữ liệu sẽ thỏa mãn với thời gian bảo vệ khoảng vài trăm ms vì điều này làm dễ dàng hơn cho việc thực hiện những phương pháp bảo vệ phức tạp.

Nhiều sơ đồ bảo vệ dạng mắt lưới khác nhau đã được đề xuất và nhiều sơ đồ đang được thực hiện bởi các nhà sản xuất thiết bị kết nối chéo quang. Bên cạnh những yếu tố ở trên, phương pháp bảo vệ dạng mắt lưới cần phải khắc phục một vài vấn đề then chốt để có thể áp dụng rộng rãi:

- Các cấu hình bảo vệ SONET/SDH đã được chuẩn hóa tuy nhiên chưa có chuẩn hoá về dạng lưới.
- Một trong những ưu điểm của dạng vòng là mạng được chia thành nhiều miền và mỗi miền được bảo vệ độc lập, phần này của mạng không thể ảnh hưởng đến phần khác. Do đó mạng có thể điều khiển nhiều sự cố đồng thời, miễn là chúng xảy ra trong các miền khác nhau. Để sơ đồ bảo vệ mắt lưới hoàn toàn có lợi như mong muốn, cần xem mạng này như là một miền duy nhất. Chia nhỏ mạng thành những miền con sẽ giảm hiệu quả sử dụng bảng thông trừ khi các miền riêng biệt là khá lớn
- Các sơ đồ bảo vệ mắt lưới khó điều khiển hơn sơ đồ bảo vệ vòng, do đó, các nhà sản xuất phải cung cấp cho các nhà cung cấp dịch vụ những công cụ điều khiển phù hợp để che dấu sự phức tạp khỏi các người vận hành. Ví dụ, điều này có thể nghĩa là cung cấp những công cụ tự động để thiết kế và tính toán những tuyến bảo vệ chính trong mạng. Ngược lại việc vận hành sẽ rất phức tạp.

- Mạng mắt lưới càng hiệu quả nếu có các cơ chế báo hiệu nhanh để truyền các thông tin liên quan đến các sự cố và định tuyến lại các đường quang bị tác động bởi sự hư hỏng này. Điều này dẫn đến các nút thực hiện chuyển mạch bảo vệ phải được thiết kế cẩn thận để tối thiểu hoá thời gian xử lý.
- Mạng mắt lưới càng hiệu quả đòi hỏi phải có bảng định tuyến bảo vệ tại các nút. Các bảng định tuyến cung cấp toàn bộ thông tin về tô pô mạng và các đường bảo vệ trong mạng. Bảng cần được cập nhật khi các đường quang, các tuyến hoặc các nút được thêm vào hoặc bỏ đi khỏi mạng. Quan trọng nhất những bảng này cần được chứa tại tất cả các nút mạng

Bảo vệ dạng mắt lưới có thể khác nhau ở chỗ hoặc toàn bộ mạng được bảo vệ như một miền đơn, hoặc nó được chia ra thành nhiều miền, mỗi miền được bảo vệ độc lập và các miền được kết nối lại với nhau. Trong quá trình thoái hoá (degenerate scenario), mỗi miền đơn có thể là một vòng đơn, trong trường hợp này chúng ta quay lại mô hình bình thường của bảo vệ vòng.

Một khía cạnh quan trọng khác để phân biệt các sơ đồ bảo vệ là tuyến bảo vệ được tính trước (offline), hoặc chúng được tính sau khi sự cố xảy ra (online). Trong cả hai trường hợp, một chiều khác được xem xét là mức độ của việc thực hiện được phân bố. Điều này ảnh hưởng đến độ phức tạp của báo hiệu và tác động trực tiếp đến tốc độ phục hồi.

Nói chung, bảo vệ dạng mắt lưới cần những chức năng sau: tính toán tuyến, duy trì tô pô và báo hiệu để thiết lập tuyến bảo vệ. Những chức năng này được thực hiện trong mạng IP hay ATM. Ví dụ, trong mạng IP, tính toán tuyến sử dụng thuật toán đường đi ngắn nhất Dijkstra và tô pô được duy trì bằng cách sử dụng giao thức định tuyến như OSPF (Open Shortest Path First). Báo hiệu cần được sử dụng để thiết lập các đường đi trong các mạng MPLS và ATM. Một vài giao thức báo hiệu được dùng cho mục đích này, bao gồm giao thức dự phòng trước tài nguyên RSVP (Resource Reservation Protocol), giao thức báo hiệu giao diện mạng-mạng riêng PNNI (Private Network-Network Interface), báo hiệu số 7 (SS7). Ngày nay đang có nhiều công trình nghiên cứu để phát triển MPLS sử dụng trong các mạng quang.

TÓM TẮT

Thế kỷ 21 là thế kỷ của công nghệ thông tin. Sự bùng nổ của các loại hình dịch vụ thông tin, đặc biệt là sự phát triển nhanh chóng của Internet và World Wide Web làm gia tăng không ngừng nhu cầu về dung lượng mạng. Điều này đòi hỏi phải xây dựng và phát triển các mạng quang mới dung lượng cao. Công nghệ ghép kênh theo bước sóng quang (DWDM) là một giải pháp hoàn hảo cho phép tận dụng hữu hiệu băng thông rộng lớn của sợi quang, nâng cao rõ rệt dung lượng truyền dẫn đồng thời hạ giá thành sản phẩm. Sự phát triển của hệ thống WDM cùng với công nghệ chuyển mạch quang sẽ tạo nên một mạng thông tin thế hệ mới-mạng thông tin toàn quang trong suốt.

Chúng ta đã nghiên cứu các nguyên lý cơ bản của DWDM và so sánh công nghệ này với TDM. Qua đó chúng ta thấy rõ rằng WDM là giải pháp hoàn thiện nhất cho bài toán tăng băng thông của mạng viễn thông trong điều kiện công nghệ hiện tại. Công nghệ WDM là công nghệ duy nhất cho phép xây dựng mô hình mạng truyền tải quang cho phép truyền tải trong suốt nhiều loại hình dịch vụ, quản lý mạng hiệu quả, định tuyến linh động.

Chúng ta thấy bên cạnh suy hao và tán sắc, các hiện tượng phi tuyến ảnh hưởng lớn đến chất lượng của hệ thống WDM. Các hiện tượng phi tuyến bao gồm tán xạ do kích thích Brillouin (SBS), tán xạ do kích thích Raman (SRS), hiệu ứng tự điều pha (SPM), hiệu ứng điều chế xuyên pha (CPM) và hiệu ứng trộn bốn bước sóng (FWM), trong đó SPM và FWM có ảnh hưởng nghiêm trọng nhất. Chúng ta đã nghiên cứu nguồn gốc của các hiệu ứng này và thấy rõ rằng các hiệu ứng này có thể suy giảm rất nhiều nếu sợi quang có lõi hiệu dụng lớn và có một lượng tán sắc màu nhỏ.

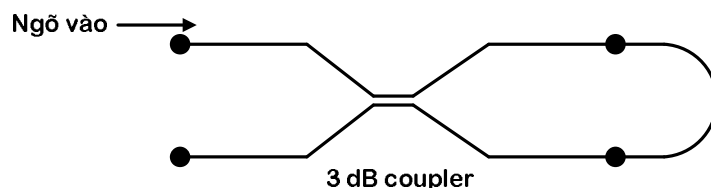
Các linh kiện cho WDM bao gồm coupler, isolator/circulator, các bộ lọc và ghép kênh, bộ chuyển mạch, bộ biến đổi bước sóng, bộ phát laser, bộ khuếch đại quang, bộ thu quang. Isolator và coupler đã là các linh kiện thông dụng trên thực tế. Nhiều loại bộ lọc quang như bộ lọc cách tử kiểu sợi quang, bộ lọc đa khoang màng mỏng điện môi, bộ lọc cách tử ống dẫn sóng ma trận đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống WDM thương mại. Có nhiều công nghệ để sản xuất ra các khối chuyển mạch quang kích thước lớn sử dụng trong các bộ kết nối chéo. Các bộ chuyển mạch này đang trong quá trình thương mại hoá. Các bộ chuyển đổi bước sóng toàn quang vẫn còn trong giai đoạn nghiên cứu để giảm giá thành và nâng cao chất lượng trước khi đưa ra ứng dụng trên thực tế.

Hiện nay, có ba thế hệ mạng quang đã và đang phát triển: mạng quang thế hệ thứ nhất, mạng quang thế hệ thứ hai và mạng quang thế hệ thứ ba. Mạng quang thế hệ thứ nhất sử dụng cáp quang thay thế cho cáp đồng để đạt được dung lượng truyền dẫn cao hơn. Mạng quang thế hệ thứ hai cung cấp các đường quang chuyển mạch kênh bằng cách định tuyến và chuyển mạch bước sóng bên trong mạng. Mạng quang thế hệ thứ ba là mạng định tuyến bước sóng- cung cấp các đường quang trong suốt tới người sử dụng là các đầu cuối SONET/SDH hay các bộ định tuyến IP. Các phần tử chủ chốt cho liên kết mạng quang là bộ kết nối cuối đường quang (OLT), bộ ghép kênh xen/rót quang (OADM) và bộ kết nối chéo quang (OXC). OLT được sử dụng cho mạng điểm nối điểm. OADM có hiệu quả kinh tế cao đối với các cấu hình vòng (ring). OXC được sử dụng trong các cấu hình mạng lưới (mesh).

Các kỹ thuật phục hồi chống lại sự cố đóng vai trò ngày càng quan trọng trong các mạng truyền tải. Các lớp khách hàng đều có cơ chế bảo vệ riêng tuy nhiên bảo vệ trong lớp quang sẽ cung cấp thêm khả năng phục hồi. Bảo vệ trong lớp quang còn hiệu quả hơn về mặt băng thông, xử lý sự cố (đặc biệt là khi tất cả các lưu lượng đều cần được bảo vệ) và về mặt kinh tế. Cấu hình bảo vệ dạng mắt lưới đang là xu thế cho lớp quang. Hiện đã có các sản phẩm thương mại cho các cấu hình bảo vệ lớp quang...

BÀI TẬP

- 1.1. Một sợi quang đơn mode có suy hao 0.5 dB/km khi hoạt động ở bước sóng $\lambda = 1.3\mu\text{m}$. Đường kính sợi là $d = 6\mu\text{m}$ và nguồn laser có độ rộng là $\Delta f = 600\text{MHz}$. So sánh công suất quang ngưỡng cho SBS, P_{thSBS} và cho SRS, P_{thSRS} .
- 1.2. Cho sợi quang đơn mode có đường kính lõi là $d = 8\mu\text{m}$. Nguồn laser đưa vào sợi quang có độ rộng phổ $\Delta f = 1\text{GHz}$. Công suất ngưỡng đối với tán xạ Brillouin là $P_{\text{thSBS}} = 190\text{mW}$ và đối với tán xạ Raman là $P_{\text{thSRS}} = 1.70\text{ W}$. Tính bước sóng hoạt động $\lambda(\mu\text{m})$ và hệ số suy hao $\alpha(\text{dB/km})$.
- 1.3. Một sợi quang đơn mode sử dụng nguồn laser có độ rộng phổ là $\Delta f = 800\text{MHz}$ có công suất quang ngưỡng cho SBS là $P_{\text{thSBS}} = 127\text{mW}$ tại bước sóng $0.85\mu\text{m}$. Suy hao của sợi quang tại bước sóng nói trên là 2dB/km . Xác định công suất quang ngưỡng cho SRS, P_{thSRS} trong sợi quang này tại bước sóng $0.9\mu\text{m}$, giả sử rằng suy hao tại bước sóng đó là 1.8 dB/km .
- 1.4. Cho cách tử truyền dẫn có chu kỳ $a = 5\mu\text{m}$. Tính độ cách góc (hiệu giữa hai góc nhiễu xạ) giữa hai bước sóng 1540.56 nm và 1541.35 nm nếu hai bước sóng này được chiếu thẳng góc với cách tử.
- 1.5. Cho bộ lọc AOTF với $\Delta n = 0.07$, bước sóng quang được chọn là $\lambda = 1540.56\text{ nm}$, vận tốc âm thanh là 3.75km/s , chiều dài đoạn tương tác âm-quang là $l = 22\text{ mm}$. Tính (a) chu kỳ cách tử và tần số sóng âm, (b) thời gian hiệu chỉnh của bộ lọc quang-âm hiệu chỉnh được.
- 1.6. Khảo sát coupler 3dB 2x2 cho ở hình bên dưới. Giả thiết rằng ta kết nối hai ngõ ra với một đoạn sợi quang. Giả sử các phân cực được bảo toàn khi qua thiết bị này. Một tín hiệu ánh sáng đưa vào ngõ vào thứ nhất. Điều gì xảy ra? Tìm hàm truyền đạt của thiết bị này. Giả sử coupler được sử dụng như một thiết bị thuận nghịch vì vậy hoạt động của nó hoàn toàn không thay đổi khi đổi ngõ vào và ngõ ra cho nhau.



- 1.7. Theo hình 1.17 hãy chứng minh sự chênh lệch độ dài giữa các tia khúc xạ tại góc θ_d với các khe kế cận là $\overline{AB} - \overline{CD} = a[\sin(\theta_1) - \sin(\theta_d)]$ khi khoảng cách giữa hai khe kế cận (grating pitch) là rất nhỏ so với khoảng cách từ mặt phẳng cách tử tới nguồn và tới mặt phẳng ánh xạ.

- b. Xây thêm xa lộ cao tốc mới;
 - c. Phân luồng trên xa lộ cao tốc;
 - d. Tất cả các câu trên đều đúng.
- 1.18. Vai trò của DWDM là:
- a. Tăng công suất phát quang;
 - b. Tăng tốc độ truyền dẫn trên sợi quang;
 - c. Tăng dung lượng truyền dẫn trên sợi quang bằng cách tăng số lượng sợi quang, thiết bị, không cần tăng tốc độ truyền dẫn;
 - d. Tăng dung lượng truyền dẫn trên sợi quang bằng cách ghép thêm nhiều bước sóng để có thể truyền trên một sợi quang, không cần tăng tốc độ truyền dẫn.
- 1.19. Động lực để phát triển DWDM là:
- a. Sự gia tăng nhanh chóng của lưu lượng dữ liệu;
 - b. Hạn chế của việc phát triển TDM;
 - c. Chi phí cao trong việc lắp đặt các tuyến cáp quang mới ở các vùng đông dân cư;
 - d. Sự tiến bộ trong công nghệ DWDM;
 - e. Tất cả các câu trên đều đúng.
- 1.20. Ưu điểm của DWDM là:
- a. Tận dụng băng thông sợi quang;
 - b. Giảm yêu cầu về thiết bị;
 - c. Không phụ thuộc vào giao thức;
 - d. Có khả năng mở rộng;
 - e. Cả 4 câu trên đều đúng.
- 1.21. Băng thông hoạt động của DWDM hiện nay:
- a. Dải C và L;
 - b. Dải O;
 - c. Dải U;
 - d. Cả 4 câu trên đều đúng.
- 1.22. Câu nào trong những câu sau đây là đúng cho hiện tượng phi tuyến trong sợi quang:
- a. Hiện tượng công suất của tín hiệu quang bị suy giảm khi lan truyền trong sợi quang;
 - b. Hiện tượng giãn xung ánh sáng khi lan truyền trong sợi quang;

- c. Các tham số của tín hiệu quang phụ thuộc vào cường độ (công suất) ánh sáng;
 - d. Tất cả các câu trên đều đúng.
- 1.23. Các hiệu ứng Kerr phát sinh là do:
- a. Sự phụ thuộc của chiết suất sợi quang vào cường độ điện trường hoạt động;
 - b. Năng lượng từ mode lan truyền được truyền sang một mode khác gọi là mode bức xạ;
 - c. Tạp chất như OH- hấp thụ năng lượng ánh sáng;
 - d. Năng lượng từ một sóng ánh sáng được chuyển sang một sóng ánh sáng khác có bước sóng dài hơn. Năng lượng mất đi bị hấp thụ bởi các photon.
- 1.24. Các hiệu ứng Kerr bao gồm:
- a. Hiệu ứng tự điều pha (SPM);
 - b. Hiệu ứng điều chế xuyên pha (CPM);
 - c. Hiệu ứng trộn bốn tần số (FWM);
 - d. Tất cả các câu trên đều đúng.
- 1.25. Hiệu ứng tự điều pha (SPM) là:
- a. Sự thay đổi tần số (chirping) do cường độ của xung ánh sáng thay đổi theo thời gian;
 - b. Sự thay đổi tần số (chirping) do cường độ của các kênh quang khác thay đổi theo thời gian;
 - c. Sự sinh ra các tần số khi có nhiều tần số lan truyền trong sợi quang;
 - d. Năng lượng từ một sóng ánh sáng được chuyển sang một sóng ánh sáng khác có bước sóng dài hơn. Năng lượng mất đi bị hấp thụ bởi các phonon.
- 1.26. Hiệu ứng điều chế xuyên pha (CPM) là:
- a. Sự thay đổi tần số (chirping) do cường độ của xung ánh sáng thay đổi theo thời gian;
 - b. Sự thay đổi tần số (chirping) do cường độ của các kênh quang khác thay đổi theo thời gian;
 - c. Sự sinh ra các tần số khi có nhiều tần số lan truyền trong sợi quang;
 - d. Năng lượng từ một sóng ánh sáng được chuyển sang một sóng ánh sáng khác có bước sóng dài hơn. Năng lượng mất đi bị hấp thụ bởi các phonon.
- 1.27. Hiệu ứng trộn bốn tần số (FWM) là:

- a. Sự thay đổi tần số (chirping) do cường độ của xung ánh sáng thay đổi theo thời gian;
 - b. Sự thay đổi tần số (chirping) do cường độ của các kênh quang khác thay đổi theo thời gian;
 - c. Sự sinh ra các tần số khi có nhiều tần số lan truyền trong sợi quang;
 - d. Năng lượng từ một sóng ánh sáng được chuyển sang một sóng ánh sáng khác có bước sóng dài hơn. Năng lượng mất đi bị hấp thụ bởi các phonon.
- 1.28. Các hiệu ứng tán xạ phi tuyến phát sinh là do:
- a. Sự phụ thuộc của chiết suất sợi quang vào cường độ điện trường hoạt động;
 - b. Năng lượng từ mode lan truyền được truyền sang một mode khác gọi là mode bức xạ;
 - c. Tạp chất như OH- hấp thụ năng lượng ánh sáng;
 - d. Năng lượng từ một sóng ánh sáng được chuyển sang một sóng ánh sáng khác có bước sóng dài hơn. Năng lượng mất đi bị hấp thụ bởi các phonon.
- 1.29. Hiệu ứng tán xạ phi tuyến bao gồm:
- a. Tán xạ do kích thích Brillouin (SBS);
 - b. Tán xạ do kích thích Raman (SRS);
 - c. Tán xạ Rayleigh;
 - d. Tất cả các câu trên đều đúng;
 - e. Chỉ có a và b đúng.
- 1.30. Hiệu ứng nào có thể ứng dụng để làm bộ khuếch đại quang:
- a. Tán xạ do kích thích Brillouin (SBS);
 - b. Tán xạ do kích thích Raman (SRS);
 - c. Tán xạ Rayleigh;
 - d. Không có câu nào đúng.
- 1.31. Bạn có thể sử dụng linh kiện này để chia công suất tín hiệu quang thành hai phần bằng nhau. Đó là linh kiện gì?
- a. Coupler 3dB;
 - b. Circulator;
 - c. Bộ lọc quang (Optical Filter);
 - d. Bộ ghép kênh (MUX);
 - e. Bộ tách kênh (DEMUX).

- 1.32. Bạn sử dụng linh kiện này để định tuyến (vào một cổng ra một cổng tương ứng nhất định) một tín hiệu quang. Đó là linh kiện gì?
- Coupler 3dB;
 - Circulator;
 - Bộ lọc quang (Optical Filter);
 - Bộ ghép kênh (MUX);
 - Bộ tách kênh (DEMUX).
- 1.33. Bạn có thể sử dụng linh kiện này để lấy ra một bước sóng mong muốn từ nhiều kênh bước sóng ngõ vào. Đó là linh kiện gì?
- Coupler 3dB;
 - Circulator;
 - Bộ lọc quang (Optical Filter);
 - Bộ ghép kênh (MUX);
 - Bộ tách kênh (DEMUX).
- 1.34. Bạn có thể sử dụng thiết bị này để kết hợp nhiều kênh bước sóng khác nhau thành tín hiệu tổng truyền trong sợi quang. Đó là thiết bị gì?
- Coupler 3dB;
 - Circulator;
 - Bộ lọc quang (Optical Filter);
 - Bộ ghép kênh (MUX);
 - Bộ tách kênh (DEMUX).
- 1.35. Bạn có thể sử dụng thiết bị này để tách tín hiệu tổng gồm nhiều kênh bước sóng khác nhau thành các kênh bước sóng riêng rẽ. Đó là thiết bị gì?
- Coupler 3dB;
 - Circulator;
 - Bộ lọc quang (Optical Filter);
 - Bộ ghép kênh (MUX);
 - Bộ tách kênh (DEMUX).
- 1.36. Trong những đặc điểm dưới đây, đặc điểm nào là đúng cho cả bộ lọc cách tử Bragg kiểu sợi quang và bộ lọc quang âm AOTF:
- Hoạt động dựa trên nguyên lý phản xạ Bragg;
 - Hoạt động dựa trên nguyên lý giao thoa kế;
 - Cách tử Bragg được tạo ra bằng cách tạo sự thay đổi tuần hoàn chiết suất trong lõi sợi quang;

- d. Cách tử được tạo ra bằng cách cho sóng âm bề mặt SAW lan truyền trong ống dẫn sóng.
- 1.37. Trong những đặc điểm dưới đây, đặc điểm nào là đúng cho cả bộ lọc Fabry-Perot và bộ lọc đa khoang màng mỏng điện môi TFMF:
- Hoạt động dựa trên nguyên lý phản xạ Bragg;
 - Hoạt động dựa trên nguyên lý giao thoa kè;
 - Khoang cộng hưởng được tạo bởi hai gương có hệ số phản xạ cao;
 - Khoang cộng hưởng được tạo bằng nhiều lớp màng mỏng điện môi có thể phản xạ được.
- 1.38. Trong những đặc điểm dưới đây, đặc điểm nào là đúng đối với bộ lọc Fabry-Perot:
- Hàm truyền đạt có đỉnh bằng phẳng, độ dốc cao;
 - Ổn định với nhiệt độ, không nhạy với phân cực;
 - Khả năng điều chỉnh bước sóng linh hoạt;
 - Dễ sản xuất để tạo nên các bộ MUX/ DEMUX dung lượng lớn;
 - Các câu a và b đúng;
 - Các câu b và c đúng;
 - Các câu a, b và d đúng.
- 1.39. Trong những đặc điểm dưới đây, đặc điểm nào là đúng đối với bộ lọc đa khoang màng mỏng điện môi TFMF:
- Hàm truyền đạt có đỉnh bằng phẳng, độ dốc cao;
 - Ổn định với nhiệt độ, không nhạy với phân cực;
 - Khả năng điều chỉnh bước sóng linh hoạt;
 - Dễ sản xuất để tạo nên các bộ MUX/ DEMUX dung lượng lớn;
 - Các câu a và b đúng;
 - Các câu b và c đúng;
 - Các câu a, b và d đúng.
- 1.40. Trong các đặc điểm dưới đây, đặc điểm nào là đúng đối với bộ lọc cách tử ống dẫn sóng ma trận AWG:
- Hàm truyền đạt có đỉnh bằng phẳng, độ dốc cao;
 - Ổn định với nhiệt độ, không nhạy với phân cực;
 - Khả năng điều chỉnh bước sóng linh hoạt;
 - Dễ sản xuất để tạo nên các bộ MUX/ DEMUX dung lượng lớn;
 - Các câu a và b đúng;

- f. Các câu b và c đúng;
 - g. Các câu a, b và d đúng.
- 1.41. Trong những câu dưới đây, câu nào đúng cho bộ MUX có cấu trúc ghép tầng theo từng băng:
- a. Có n tầng (n là tổng số bước sóng), mỗi tầng chỉ thực hiện tách/ ghép một kênh;
 - b. Có 1 tầng thực hiện tách/ ghép tất cả các bước sóng;
 - c. Có n/m tầng (n là tổng số bước sóng), mỗi tầng thực hiện tách/ ghép m bước sóng;
 - d. Có 2 tầng, tầng đầu ghép/ tách các kênh bước sóng chẵn, lẻ thành 2 băng. Tầng 2 thực hiện tách/ ghép các kênh riêng rẽ.
- 1.42. Chỉ cần cho biết kênh bước sóng quang nào cần chiếm, thiết bị này sẽ biến đổi tín hiệu quang phi tiêu chuẩn thành bước sóng phù hợp. Đó là thiết bị gì?
- a. OLT;
 - b. Bộ chuyển tiếp quang (Transponder);
 - c. OADM;
 - d. OXC.
- 1.43. Thiết bị này cho phép bạn lấy ra hoặc đưa vào một kênh quang nào đó. Đó là thiết bị gì?
- a. OLT;
 - b. Bộ chuyển tiếp quang (Transponder);
 - c. OADM;
 - d. OXC.
- 1.44. Thiết bị này đặt tại nơi giao nhau của nhiều tuyến DWDM. Nó cho phép định tuyến các bước sóng từ một tuyến DWDM này sang một tuyến DWDM khác. Đó là thiết bị gì?
- a. OLT;
 - b. Bộ chuyển tiếp quang (Transponder);
 - c. OADM;
 - d. OXC.
- 1.45. Thiết bị này nhận các tín hiệu của khách hàng, xử lý và đưa chúng vào một sợi quang duy nhất. Đó là thiết bị gì?
- a. OLT;
 - b. Bộ chuyển tiếp quang (Transponder);

- c. OADM;
 - d. OXC.
- 1.46. Trong các cấu trúc OADM dưới đây, cấu trúc nào sẽ làm gián đoạn các kênh khác khi xen/ rớt thêm kênh mới:
- a. Song song;
 - b. Song song theo băng;
 - c. Nối tiếp;
 - d. Tất cả các cấu trúc trên đều đúng.
- 1.47. Trong các cấu trúc OADM sau, cấu trúc nào không có điều kiện ràng buộc lựa chọn bước sóng xen/rớt
- a. Song song;
 - b. Nối tiếp;
 - c. Xen/rớt theo băng;
 - d. Tất cả các cấu trúc trên.
- 1.48. Trong các cấu trúc OADM sau, cấu trúc nào luôn làm tăng suy hao khi xen/rớt thêm bước sóng:
- a. Song song;
 - b. Nối tiếp;
 - c. Xen/rớt theo băng;
 - d. Tất cả các cấu trúc trên.
- 1.49. OXC có các chức năng cơ bản sau:
- a. Cung cấp các đường quang một cách tự động;
 - b. Bảo vệ các đường quang đối với các sự cố đứt cáp hoặc sự cố nút mạng;
 - c. Trong suốt đối với tốc độ truyền dẫn bit;
 - d. Giám sát chất lượng truyền dẫn;
 - e. Chuyển đổi bước sóng;
 - f. Ghép và nhóm tín hiệu;
 - g. Tất cả các cấu trúc trên đều đúng.
- 1.50. Trong các cấu trúc OXC sau, cấu trúc nào cho phép giám sát chất lượng truyền dẫn thông qua tỉ số BER
- a. Có lỗi chuyển mạch điện;
 - b. Lỗi chuyển mạch quang bao quanh bởi các bộ chuyển đổi O/E/O;

- c. Lỗi chuyển mạch quang nối trực tiếp đến các bộ chuyển đổi tín hiệu trong thiết bị WDM;
 - d. Lỗi chuyển mạch quang nối trực tiếp đến các bộ ghép/phân kênh bên trong OLT;
 - e. Tất cả các câu trên đều đúng;
 - f. Chỉ có a và b đúng.
- 1.51. Trong những đặc điểm dưới đây, đặc điểm nào là KHÔNG ĐÚNG cho OXC có lỗi chuyển mạch quang
- a. Nhóm luồng tín hiệu tốc độ thấp;
 - b. Dung lượng chuyển mạch lớn nhất;
 - c. Giám sát chất lượng truyền dẫn thông qua công suất quang;
 - d. Tiêu thụ năng lượng thấp;
 - e. Chiếm không gian nhỏ.
- 1.52. Lớp con của lớp quang là:
- a. Lớp kênh quang OCh;
 - b. Lớp đoạn ghép kênh quang OMS;
 - c. Lớp đoạn truyền dẫn quang OTS;
 - d. Tất cả các câu trên.
- 1.53. Đoạn ghép kênh quang OMS là:
- a. Tuyến giữa các OLT hay OADM;
 - b. Đoạn giữa các OLA;
 - c. Tuyến giữa các bộ chuyển tiếp quang (Transponder);
 - d. Tất cả các câu trên đều đúng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Optical Networks: A Practical Perspective*, Second Edition - Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, 2002.
2. *Fiber-Optic Communications Technology* - Djafar K.Mynbaev, Lowell L.Scheiner, 2001.
3. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, Second Edition- John M. Senior.