

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

*** * * * ***

BÀI GIẢNG
CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI QUANG
(Lưu hành nội bộ)

**BIÊN SOẠN: ThS. CAO HỒNG SƠN
ThS. NGÔ THU TRANG
ThS. LÊ THANH THỦY
ThS. NGUYỄN THỊ THU NGÀ**

HÀ NỘI 07-2014

- MỤC LỤC -

LỜI NÓI ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1- CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI WDM	3
1.1. TỔNG QUAN VÀ QUÁ TRÌNH PHÁT TRIỂN.....	3
1.1.1. Tổng quan	3
1.1.2. Các giai đoạn phát triển.....	4
1.2. NGUYÊN LÝ GHEP KÊNH QUANG THEO BƯỚC SÓNG WDM.....	5
1.2.1. Giới thiệu chung.....	5
1.2.2. Sơ đồ khối tổng quát và nguyên lý ghép kênh quang phân chia theo bước sóng (WDM).....	8
1.2.3. Các đặc điểm và các tham số của hệ thống WDM	10
1.2.4. Phân loại và các chuẩn của hệ thống WDM.....	13
1.3. CÁC PHẦN TỬ CƠ BẢN TRONG HỆ THỐNG WDM.....	15
1.3.1. Nguồn quang và thu quang.....	15
1.3.2. Ghép và tách kênh bước sóng quang.....	16
1.3.3. Sợi quang	31
1.3.4. Khuếch đại quang đa kênh.....	32
1.3.5. Một số phần tử khác	32
1.4. CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN CHẤT LƯỢNG CỦA HỆ THỐNG WDM	34
1.4.1. Bảng thông của các bộ khuếch đại.....	34
1.4.2. Xuyên kênh tuyến tính và phi tuyến	35
1.4.3. Cân bằng bù tán sắc các kênh quang.....	41
1.5. MẠNG TRUYỀN TẢI WDM	43
1.5.1. Phân loại	44
1.5.2. Các phần tử trong mạng truyền tải WDM	44
1.5.3. Quản lý và bảo vệ trong mạng WDM	45
1.6. TỔNG KẾT	48
CÂU HỎI VÀ BÀI TẬP	49
CHƯƠNG 2 - KHUẾCH ĐẠI QUANG	50
2.1. GIỚI THIỆU CHUNG	50
2.1.1. Mô hình và nguyên lý hoạt động chung của bộ khuếch đại quang.....	50

2.1.2.	Các tham số cơ bản của bộ khuếch đại quang	53
2.1.3.	Phân loại các bộ khuếch đại quang	55
2.2.	BỘ KHUẾCH ĐẠI QUANG BÁN DẪN (SOA).....	56
2.2.1.	Cấu trúc.....	56
2.2.2.	Nguyên lý hoạt động	57
2.2.3.	Các đặc tính tham số	57
2.2.4.	Các bộ SOA	61
2.2.5.	Ứng dụng của SOA	61
2.3.	BỘ KHUẾCH ĐẠI QUANG RAMAN (RA)	62
2.3.1.	Cấu trúc.....	62
2.3.2.	Nguyên lý hoạt động	62
2.3.3.	Các phương pháp bơm.....	63
2.3.4.	Các tham số.....	64
2.3.5.	Ứng dụng của RA.....	68
2.4.	BỘ KHUẾCH ĐẠI QUANG SỢI PHA TRỘN ERBIUM (EDFA)	69
2.4.1.	Cấu trúc.....	69
2.4.2.	Nguyên lý hoạt động	70
2.4.3.	Yêu cầu đối với nguồn bơm.....	72
2.4.4.	Các tham số.....	74
2.4.5.	Ứng dụng của EDFA	82
2.5.	SO SÁNH CÁC LOẠI BỘ KHUẾCH ĐẠI.....	86
2.5.1.	Ưu nhược điểm của bộ khuếch đại quang SOA	86
2.5.2.	Ưu nhược điểm của bộ khuếch đại quang Raman	87
2.5.3.	Ưu nhược điểm của bộ khuếch đại quang EDFA	87
2.6.	TỔNG KẾT	88
	CÂU HỎI VÀ BÀI TẬP.....	89
 CHƯƠNG 3 – BÙ TÁN SẮC.....		91
3.1.	GIỚI THIỆU CHUNG	91
3.1.1.	Khái niệm tán sắc	91
3.1.2.	Ảnh hưởng của tán sắc	92
3.1.3.	Phân loại các kỹ thuật bù tán sắc	92
3.2.	CÁC KỸ THUẬT BÙ TÁN SẮC	94
3.2.1.	Kỹ thuật bù điện	94

3.2.2. Kỹ thuật bù quang	101
3.3. SO SÁNH CÁC KỸ THUẬT BÙ TÁN SẮC	115
3.3.1. Ưu nhược điểm của kỹ thuật bù trước	115
3.3.2. Ưu nhược điểm của kỹ thuật bù sau	116
3.3.3. Ưu nhược điểm của kỹ thuật bù quang	116
3.4. TỔNG KẾT	116
CÂU HỎI VÀ BÀI TẬP	117
CHƯƠNG 4 - TRUYỀN TẢI IP/WDM	118
4.1. XU HƯỚNG TÍCH HỢP IP TRÊN WDM	118
4.1.1. Tổng quan	118
4.1.2. Sự phát triển lưu lượng và công nghệ IP	119
4.1.3. Sự phát triển công nghệ WDM	120
4.1.4. Tích hợp công nghệ IP và công nghệ WDM	120
4.2. GIAO THỨC IP	121
4.2.1. Tổng quan	121
4.2.2. Phiên bản IPv4	122
4.2.3. Phiên bản IPv6	123
4.3. CÁC KỸ THUẬT TRUYỀN TẢI QUANG WDM	124
4.3.1. Tổng hợp các công nghệ truyền tải quang	124
4.4. CÁC KIẾN TRÚC TRUYỀN TẢI IP/ WDM	127
4.4.1. Tổng quan	127
4.4.2. Các kiến trúc IP/ WDM	129
4.4.3. Chức năng của một số tầng cơ bản trong kiến trúc IP/ WDM	130
4.5. CÁC GIAI ĐOẠN PHÁT TRIỂN IP/ WDM	136
4.5.1. Giai đoạn IP/ATM/SDH /WDM	136
4.5.2. Giai đoạn IP/SDH /WDM	136
4.5.3. Giai đoạn IP/WDM	137
4.6. CÁC MÔ HÌNH KẾT NỐI MẠNG IP/ WDM	137
4.6.1. Phân loại	137
4.6.2. Mô hình kết nối mạng IP/ WDM điểm - điểm	138
4.6.3. Mô hình kết nối mạng IP/ WDM tái cấu hình	139
4.6.4. Mô hình kết nối mạng IP/ WDM chuyển mạch	140
4.7. CÁC MÔ HÌNH DỊCH VỤ MẠNG IP/ WDM	142

4.7.1. Mô hình dịch vụ miền.....	143
4.7.2. Mô hình dịch vụ hợp nhất.....	144
4.7.3. Các dịch vụ	145
4.8. TỔNG KẾT	146
CÂU HỎI	147
 CHƯƠNG 5 – MẠNG TRUY NHẬP QUANG FTTx.....	148
5.1. TỔNG QUAN VỀ MẠNG TRUY NHẬP QUANG FTTx	148
5.1.1. Khái niệm.....	148
5.1.2. Ưu nhược điểm của FTTx	148
5.1.3. Các ứng dụng của FTTx	149
5.2. CẤU HÌNH CỦA MẠNG TRUY NHẬP QUANG FTTx	150
5.2.1. Cấu hình cơ bản của mạng truy nhập quang FTTx.....	150
5.2.2. Cấu hình tham chiếu của mạng truy nhập quang FTTx	152
5.2.3. Các khối chức năng cơ bản của mạng truy nhập quang FTTx	153
5.3. CÁC PHƯƠNG THỨC TRUY NHẬP QUANG FTTx	157
5.3.1. Phương thức FTTC.....	157
5.3.2. Phương thức FTTB.....	157
5.3.3. Phương thức FTTO	159
5.3.4. Phương thức FTTH	160
5.4. CÁC CÔNG NGHỆ SỬ DỤNG TRONG MẠNG TRUY NHẬP QUANG FTTx	160
5.4.1. Tổng quan về các công nghệ sử dụng trong mạng truy nhập quang FTTx	160
5.4.2. Công nghệ truy nhập quang tích cực AON	161
5.4.3. Công nghệ truy nhập quang thụ động PON	163
5.5. TỔNG KẾT	165
CÂU HỎI	166
 CHƯƠNG 6 – QUẢN LÝ VÀ ĐIỀU KHIỂN MẠNG QUANG	167
6.1. TỔNG QUAN VỀ QUẢN LÝ VÀ ĐIỀU KHIỂN TRONG MẠNG QUANG	167
6.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRONG MẠNG QUANG	168
6.2.1. Báo hiệu trong mạng quang.....	168
6.2.2. Các phương pháp điều khiển trong mạng quang	178

6.2.3. Định tuyến trong mạng và gán bước sóng trong mạng quang.....	185
6.3. CÁC CÔNG NGHỆ ĐIỀU KHIỂN TRONG MẠNG QUANG	204
6.3.1. ASON	204
6.3.2. GMPLS	206
6.4. BẢO VỆ VÀ HỒI PHỤC TRONG MẠNG QUANG	209
6.4.1. Mô hình bảo vệ và phục hồi trong mạng quang	209
6.4.2. Các phương pháp bảo vệ trong mạng quang	211
6.4.3. Phục hồi trong mạng quang	219
6.5. TỔNG KẾT	221
CÂU HỎI	222
 CHƯƠNG 7 – MỘT SỐ CÔNG NGHỆ QUANG TIỀN TIẾN	223
7.1. CHUYỂN MẠCH QUANG	223
7.1.1. Vai trò của chuyển mạch quang	223
7.1.2. Phân loại chuyển mạch quang	225
7.1.3. Các kỹ thuật chuyển mạch quang	233
7.2. HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG COHERENT	240
7.2.1. Khái niệm về thông tin quang Coherent.....	240
7.2.2. Các bộ điều chế quang Coherent.....	242
7.2.3. Nguyên lý tách sóng quang coherent	242
7.2.4. Máy thu quang Coherent	245
7.2.5. Các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhạy thu trong hệ thống tin quang Coherent	246
7.2.6. BER trong hệ thống tin quang Coherent.....	247
7.3. HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG SOLITON.....	248
7.3.1. Solitonsợi quang.....	248
7.3.2. Truyền thông cỡ sợi Soliton.....	259
7.3.3. Các vấn đề trong hệ thống Soliton WDM	254
7.4. RoF	261
7.4.1. Mô hình tổng quát sử dụng công nghệ RoF	261
7.4.2. Các thành phần cơ bản của tuyến quang sử dụng RoF	262
7.4.3. Các kỹ thuật truyền sóng vô tuyến qua sợi quang	265
7.4.4. Ứng dụng của công nghệ RoF	269
7.5. TRUYỀN DẪN QUANG TRÊN KÊNH VÔ TUYẾN	275

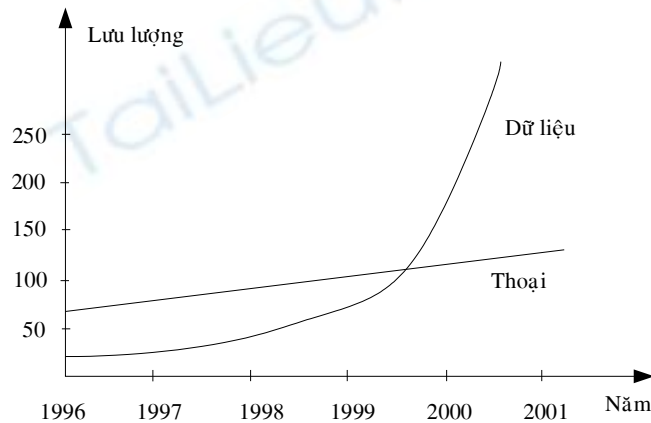
7.5.1. Mô hình tổng quát	279
7.5.2. Các thành phần cơ bản.....	283
7.5.3. Các kỹ thuật truyền tải quang trên kênh vô tuyến	287
7.5.4. Ứng dụng của kỹ thuật truyền tải quang trên kênh vô tuyến	294
7.6. KẾT LUẬN	294
CÂU HỎI	296
 THUẬT NGỮ VIẾT TẮT	 297
 TÀI LIỆU THAM KHẢO	 303

Tailieu.vn

- CHƯƠNG I -

CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI WDM**1.1. TỔNG QUAN VÀ QUÁ TRÌNH PHÁT TRIỂN****1.1.1. Tổng quan**

Với 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

Như vậy, 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 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 lớn, khi đó chi phí sẽ tăng do mỗi hệ thống lắp thêm đều cần một số lượng bộ lặp, bộ khuếch đại... như hệ thống cũ.

Truyền dẫn ghép 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 10 Gb/s hoặc 40 Gb/s. 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 80 Gbps hoặc 160 Gb/s. 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 gặp 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 phân chia bước sóng WDM (Wavelength Devision Multiplexing): ghép 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.

1.1.2. Các giai đoạn phát triển

Trong khoảng ba thập kỷ công nghệ truyền dẫn quang WDM đã có sự phát triển vượt bậc. Sự phát triển này có được là nhờ công nghệ chế tạo thiết bị hay cụ thể là công nghệ chế tạo linh kiện quang. Những thành tựu của công nghệ này đã góp phần tạo nên các hệ thống truyền dẫn WDM dung lượng lớn như ngày nay. Theo thời gian xuất phát từ những yêu cầu thực tế các hệ thống WDM ngày càng phức tạp hơn về chức năng. Do đó cấu hình hệ thống WDM chuyển từ cấu hình điểm- điểm đơn giản sang cấu hình phức tạp như cấu hình vòng và cấu hình lưới.

Các hệ thống WDM đầu tiên xuất hiện từ cuối những năm 1980 sử dụng 2 kênh bước sóng trong các vùng 1310nm và 1550nm, và thường được gọi là các hệ thống WDM băng rộng.

Đầu những năm 1990 xuất hiện các hệ thống WDM thế hệ thứ 2 sử dụng các phần tử WDM thụ động, được gọi là các hệ thống WDM băng hẹp với 2 đến 8 kênh. Các kênh nằm trong vùng cửa sổ 1550nm và cách nhau khoảng 2500GHz. Đến giữa những năm 1990 đã có mặt các hệ thống WDM mật độ cao (DWDM: Dense Wavelength Devision Multiplexing) sử dụng từ 16 đến 40 kênh với khoảng cách từ

100 đến 200GHz. Các hệ thống này đã tích hợp các chức năng xen kẽ và quản lý mạng.

Sự phát triển của công nghệ WDM trong giai đoạn tiếp theo (1996-cho đến nay): các hệ thống WDM ban đầu sử dụng khoảng cách kênh lớn. Việc lắp đặt các hệ thống WDM bị cho phối bởi những lý do kinh tế. Việc nâng cấp thiết bị đầu cuối để khai thác các năng lực WDM sẽ có chi phí thấp hơn việc lắp đặt thêm cáp sợi quang mới. Sự xuất hiện của bộ khuếch đại quang EDFA đã chuyển hầu hết các hệ thống WDM sang cửa sổ từ 1530nm đến 1565nm. Các hệ thống DWDM mới lắp đặt gần đây với khoảng cách kênh bé từ 50 đến 100 GHz.

Nhu cầu về băng tần mạng đang tăng gần 100%/năm sẽ tiếp tục tăng ít nhất là trong thập kỷ tiếp theo. Nhu cầu này sẽ còn mở rộng cả trên phương diện địa lý. Việc giảm giá thành của các nhà cung cấp và có lẽ trên hết là sự phổ biến của internet và của các ứng dụng đòi hỏi băng tần lớn khác trong lĩnh vực giải trí sẽ tiếp tục đẩy mạnh nhu cầu này.

Các giải pháp thực tế đối với các vấn đề giới hạn chất lượng dịch vụ, đặc biệt là tán sắc mode phân cực và các hiệu ứng phi tuyến, sẽ cho phép tăng cả số lượng kênh và tốc độ bit của các hệ thống WDM. DWDM sẽ vẫn tiếp tục là một công nghệ cạnh tranh. Tính phức tạp của mạng cũng tăng lên đặc biệt là khi các dịch vụ đặc biệt đòi hỏi các cấu hình logic đặc trưng chiếm ưu thế hơn các dịch vụ truyền thống. Số các kênh tăng sẽ đòi hỏi các yêu cầu khắt khe hơn đối với độ ổn định của laser, độ chính xác của bộ lọc và cũng cần các phương tiện giám sát công suất và nhiễu tín hiệu hơn.

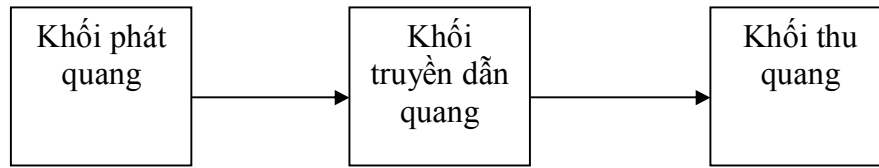
Mạng sẽ dần tiến tới mô hình “toàn quang”, do vậy sẽ xuất hiện các thiết bị quang mới có khả năng thực hiện các chức năng hiện nay chỉ có trong thiết bị điện tử. Việc loại bỏ yêu cầu khôi phục và tái tạo thông tin người dùng qua thiết bị sẽ làm giảm đáng kể tính phức tạp phần cứng của mạng.

1.2. NGUYÊN LÝ GHÉP KÊNH QUANG PHÂN CHIA THEO BƯỚC SÓNG (WDM)

1.2.1. Giới thiệu chung

1.2.1.1. Hệ thống truyền dẫn thông tin quang đơn kênh

Một hệ thống truyền dẫn thông tin quang đơn kênh cấu hình điểm-điểm được mô tả như hình vẽ 1.2. Hệ thống này bao gồm 3 khối: khối phát quang, khối thu quang và khối truyền dẫn quang.



Hình 1.2. Mô hình hệ thống truyền dẫn thông tin quang đơn kênh

+ Khối phát quang: Làm nhiệm vụ điều chế tín hiệu số thành tín hiệu ánh sáng và ghép nối tín hiệu ánh sáng đã mang tin vào sợi quang. Phần tử cơ bản của khối phát quang là LED hoặc LASER. Trong các hệ thống thông tin quang mà khoảng cách truyền dẫn xa (> 10 km), người ta chỉ dùng LASER.

Trong viễn thông quang học, LASER bán dẫn được sử dụng phổ biến. Cấu trúc cơ bản của một LASER bán dẫn là tiếp giáp của hai khối bán dẫn pha tạp lỗ trống (bán dẫn loại p) và điện tử (bán dẫn loại n), được gọi là tiếp giáp p-n. Khi tiếp giáp này phân cực thuận, nó có khả năng phát xạ ra ánh sáng. Khi dòng phân cực vượt qua một giá trị ngưỡng (ngưỡng phát xạ) thì ánh sáng phát xạ ra có tính kết hợp và cường độ ánh sáng phát xạ tỉ lệ thuận với dòng phân cực.

+ Khối truyền dẫn quang: Làm nhiệm vụ mang tín hiệu ánh sáng đi từ nơi phát tới nơi thu. Phần tử cơ bản của khối truyền dẫn quang là sợi quang, được hoạt động dựa trên nguyên lý phản xạ toàn phần.

Nguyên lý phản xạ toàn phần được hiểu từ định luật khúc xạ - phản xạ Snell. Khi ánh sáng đi từ môi trường A có chiết quang cao tới môi trường B có chiết quang thấp, góc khúc xạ ở môi trường B sẽ lớn hơn góc tới của môi trường A. Như vậy, nếu góc tới tiến đến một giá trị ngưỡng ($< 90^\circ$) nào đó, góc khúc xạ sẽ tiến đến góc 90° . Nếu góc tới vượt qua giá trị ngưỡng, sẽ không còn tia khúc xạ mà chỉ còn tia phản xạ $\rightarrow$ hiện tượng phản xạ toàn phần.

Dựa trên nguyên lý phản xạ toàn phần, sợi quang được cấu trúc có hình trụ tròn bao gồm hai lớp chiết suất mà chiết suất của lõi sợi được chế tạo sao cho có giá trị lớn hơn so với vỏ sợi. Với sợi được chế tạo từ thủy tinh silica (SiO_2), việc tạo ra hai lớp chiết suất đạt được là nhờ quá trình pha tạp Germanium vào trong lõi sợi.

+ Khối thu quang: Làm nhiệm vụ chuyển đổi tín hiệu ánh sáng nhận được từ khối truyền dẫn quang trở lại tín hiệu điện và tách về tín hiệu số như ban đầu. Phần tử cơ bản của khối thu quang là bộ biến đổi điện quang (photodiode). Một photodiode cũng có cấu trúc cơ bản dựa trên tiếp giáp p-n nhưng được phân cực ngược. Khi có ánh sáng chiếu vào, photodiode sẽ sinh ra dòng điện có giá trị cường độ tỉ lệ với cường độ ánh sáng.

Trong hệ thống truyền dẫn thông tin quang số đơn kênh, tốc độ tín hiệu có thể đạt tới 160 Gbit/s (nhờ ghép/tách tín hiệu 10/40 Gbit/s theo thời gian). Tuy nhiên, để đẩy cao tốc độ hơn nữa, cấu trúc các phần tử, thiết bị sẽ trở nên rất phức tạp, cự ly truyền dẫn thấp và các chi phí sẽ tăng cao. Về mặt công nghệ và kinh tế, đây là một thách thức lớn!

Với mong muốn tăng cao hơn nữa dung lượng truyền dẫn mà không đi vào lối mòn tăng tốc độ kênh, người ta đã đề ra giải pháp ghép nhiều kênh bước sóng trên cùng một đường truyền quang mà ở đó tốc độ truyền dẫn của mỗi kênh hoàn toàn độc lập với nhau. Như vậy, khi tốc độ các kênh bằng nhau, dung lượng truyền dẫn của hệ thống sẽ tăng gấp N lần so với hệ thống truyền dẫn đơn kênh trong đó N là số kênh bước sóng.

1.2.1.2. Hệ thống truyền dẫn đa kênh bước sóng

a. Khái niệm:

Một hệ thống truyền dẫn thông tin quang mà ở đó nhiều kênh bước sóng được ghép lại và truyền chung trên một đường truyền quang được gọi là hệ thống thông tin quang đa kênh bước sóng (WDM).

b. Nguyên lý cơ bản:

Ý tưởng về hệ thống truyền dẫn đa kênh bước sóng đã được đề ra từ khá sớm. Nó xuất phát từ hai luận điểm chính sau đây:

- Vùng phổ của một kênh truyền dẫn được giới hạn bởi tốc độ truyền dẫn. Ví dụ, một kênh truyền dẫn 10 Gbit/s sẽ có vùng phổ cỡ khoảng 10 GHz. Giá trị này có thể thay đổi tùy theo dạng mã tín hiệu sử dụng, tuy nhiên cũng không thể vượt xa cách quá một vài lần.
- Băng tần truyền dẫn của sợi quang là rất lớn. Vùng phổ mà ở đó suy hao của sợi quang vẫn cho phép truyền dẫn cự ly xa có thể lên tới vài chục THz. Ví dụ, vùng phổ của băng S, C, L là cỡ 15 THz, vùng phổ của băng O là cỡ 12 THz. Trong đó, các khái niệm của các băng tần quang được chỉ ra như dưới đây.

+ Băng O: là băng tần quang phủ vùng bước sóng 1310 nm, có giá trị bước sóng từ 1260 nm đến 1360 nm. Chữ O xuất phát từ chữ cái đầu tiên của từ Original (khởi thủy), ám chỉ băng tần khởi thủy được sử dụng đầu tiên cho hệ thống truyền dẫn thông tin quang đường dài (thế hệ thông tin quang thứ hai).

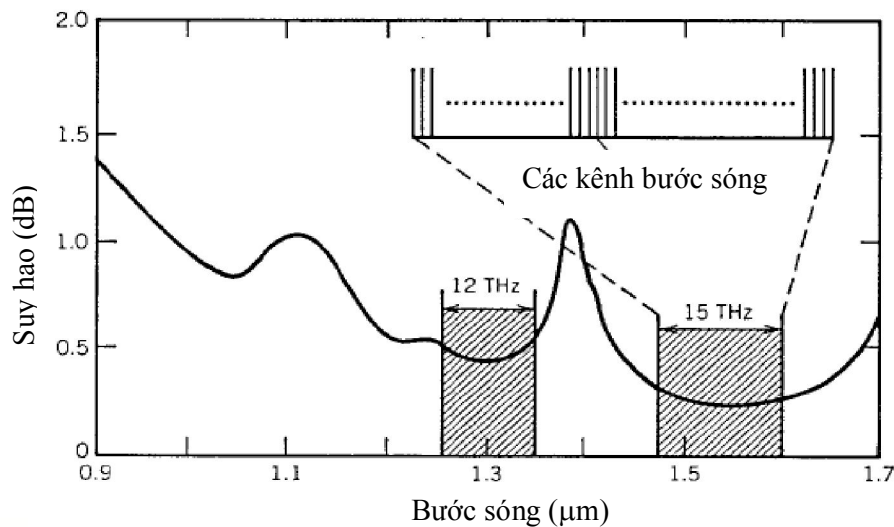
+ Băng C: là băng tần quang phủ vùng bước sóng 1550 nm, có giá trị bước sóng từ 1530 nm đến 1570 nm. Chữ C xuất phát từ chữ cái đầu tiên của từ Conventional (thông thường) ám chỉ vùng bước sóng hay sử dụng cho các hệ thống thông tin quang đường dài hiện nay.

+ Băng L: là băng tần quang có các bước sóng dài hơn so với băng C. Giá trị bước sóng của băng L từ 1570 đến 1625 nm. Chữ L xuất phát từ chữ cái đầu tiên của từ Long wavelength (bước sóng dài – so với vùng bước sóng của băng C).

+ Băng S: là băng tần quang có các bước sóng ngắn hơn so với băng C. Giá trị bước sóng của băng S từ 1460nm đến 1530 nm. Chữ S xuất phát từ chữ cái đầu tiên của từ Short wavelength (bước sóng ngắn – so với vùng bước sóng của băng C).

+ Ngoài các băng tần trên, người ta còn định nghĩa băng E và băng U. Băng E là vùng phủ các bước sóng từ 1360 nm đến 1460 nm. Vùng bước sóng này phủ trùm lên vùng bước sóng 1390 nm – là đỉnh hấp thụ OH trong sợi quang thông thường. Chữ E xuất phát từ chữ cái đầu tiên của từ Extended (mở rộng), ám chỉ đây là vùng được mở rộng thêm do trước đây vùng bước sóng có đỉnh hấp thụ này là một trở ngại lớn để có thể sử dụng với sợi quang thông thường. Băng U là vùng phủ các bước sóng từ 1625 nm đến 1675nm. Chữ U xuất phát từ chữ đầu tiên của từ Ultra-long wavelength (bước sóng siêu dài – so với vùng bước sóng của băng C).

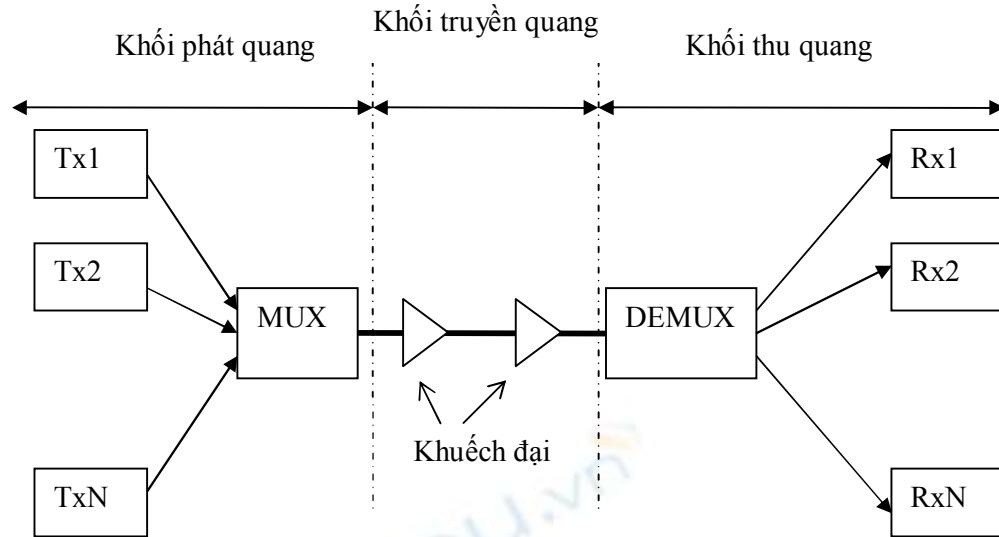
Hình 1.3 mô tả trực quan nguyên lý cơ bản của ghép kênh theo bước sóng dựa vào phổ suy hao của sợi quang.



Hình 1.3. Mô tả nguyên lý hệ thống đa kênh bước sóng dựa vào phổ suy hao của sợi quang

1.2.2. Sơ đồ khối tổng quát và nguyên lý ghép kênh quang phân chia theo bước sóng (WDM)

Hình 1.4 dưới đây mô tả sơ đồ khối tổng quát của một hệ thống WDM cấu hình điểm-điểm, truyền đơn hướng.



Hình 1.4. Sơ đồ khối tổng quát hệ thống WDM

Hệ thống thông tin quang WDM này về cơ bản cũng gồm 3 khối chính: khối phát quang, khối thu quang và khối truyền quang.

+ Khối phát quang gồm N bộ phát quang tương ứng với N bước sóng $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ và một bộ ghép kênh quang theo bước sóng. Đầu ra của khối phát quang là N bước sóng đã được ghép lại để có thể ghép lên đường truyền quang.

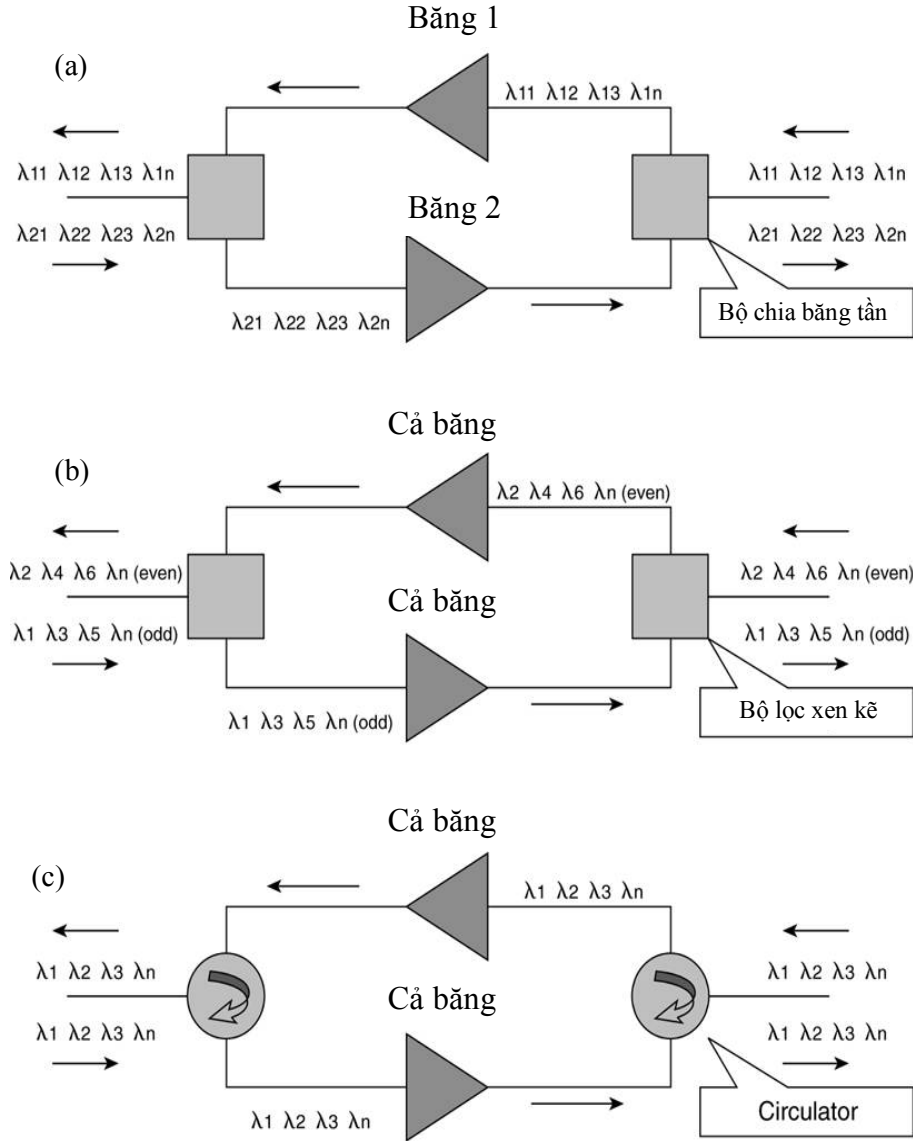
+ Khối truyền dẫn quang là một sợi quang và các bộ khuếch đại đường truyền. Các bộ khuếch đại được đặt dọc theo đường truyền quang tại các khoảng cách hợp lý nhằm đảm bảo bù suy hao cho tín hiệu đến được phía đầu thu. Sợi quang được dùng trong các hệ thống WDM chủ yếu là sợi đơn một tiêu chuẩn đã được lắp đặt cho các hệ thống đơn kênh trước đó. Tuy nhiên, nếu một hệ thống WDM được lắp mới, loại sợi quang được dùng có thể là sợi đơn một dịch tán sắc không bằng không (NZ-DSF – Non Zero Dispersion Shifted Fiber) hoặc sợi có diện tích hiệu dụng lõi sợi lớn (LMA – Large Mode Area).

+ Khối thu quang gồm một bộ tách kênh bước sóng và N bộ thu quang để thu được N kênh bước sóng riêng biệt.

Một hệ thống WDM truyền dẫn đơn hướng sẽ có các bước sóng chiếu phát trên một sợi và các bước sóng chiếu thu trên một sợi khác. Đối với hệ thống WDM song hướng sẽ có các bước sóng chiếu phát và chiếu thu đều truyền trên cùng một sợi. Như vậy, tại mỗi điểm truyền thông, sẽ có cả khối phát và khối thu quang.

Để có thể truyền chung hai hướng trên một đường truyền quang, tại mỗi đầu truyền thông người ta có thể sử dụng các kỹ thuật sau:

- Sử dụng bộ chia băng tần (hình 1.5.a)
- Sử dụng bộ lọc xen kẽ bước sóng (hình 1.5.b)
- Sử dụng bộ quay vòng một chiều – circulator (hình 1.5.c)



Hình 1.5. Một số kỹ thuật truyền song hướng WDM: (a) sử dụng bộ chia tách băng tần, (b) sử dụng bộ lọc xen kẽ bước sóng và (c) dùng circulator.

1.2.3. Các đặc điểm và các tham số của hệ thống WDM

1.2.3.1. Các đặc điểm WDM

Công nghệ WDM có các đặc điểm sau:

- Tận dụng tài nguyên dải tần rất rộng của sợi quang.

Công nghệ WDM tận dụng tài nguyên băng tần truyền dẫn rất lớn của sợi quang, làm cho dung lượng truyền dẫn của sợi quang so với truyền dẫn đơn bước sóng tăng từ vài lần tới hàng trăm lần. Do đó, có thể giảm chi phí đầu tư.

Dùng công nghệ WDM có thể ghép N bước sóng truyền dẫn trong sợi quang đơn mode và có thể truyền dẫn hoàn toàn song công. Do vậy, khi truyền dẫn thông tin đường dài với dung lượng lớn có thể tiết kiệm số lượng lớn sợi quang. Thêm vào đó là khả năng mở rộng dung lượng cho hệ thống quang đã xây dựng.

- Có khả năng đồng thời truyền dẫn nhiều tín hiệu: Vì trong công nghệ WDM sử dụng các bước sóng độc lập với nhau nên có thể truyền dẫn nhiều tín hiệu có đặc tính hoàn toàn khác nhau, thực hiện việc tổng hợp và phân chia các dịch vụ viễn thông, bao gồm tín hiệu số và tín hiệu tương tự, tín hiệu PDH và tín hiệu SDH, truyền dẫn tín hiệu đa phương tiện (thoại, số liệu, hình ảnh...).
- Có nhiều ứng dụng: Căn cứ vào nhu cầu, công nghệ WDM có thể có rất nhiều ứng dụng như trong mạng đường trục, mạng phân phối kiểu quảng bá, mạng cục bộ nhiều đường, nhiều địa chỉ... Bởi thế, nó rất quan trọng trong các ứng dụng mạng.
- Giảm yêu cầu xử lý tốc độ cao cho một số linh kiện quang điện: Tốc độ truyền dẫn tăng lên không ngừng nên tốc độ xử lý tương ứng của nhiều linh kiện quang điện tăng lên theo nhưng không đáp ứng được đủ. Sử dụng công nghệ WDM có thể giảm yêu cầu quá cao về tốc độ đối với linh kiện mà vẫn có thể đáp ứng dung lượng lớn.
- Kênh truyền dẫn IP: Ghép kênh bước sóng đối với khuôn dạng số liệu là trong suốt, tức là không có quan hệ gì với tốc độ của tín hiệu và phương thức điều chế tín hiệu xét trên phương diện điện. Ghép kênh bước sóng cũng là biện pháp mở rộng và phát triển mạng lý tưởng, là cách thuận tiện để đưa vào dịch vụ băng rộng. Chỉ cần dùng thêm một bước sóng là có thể tăng thêm một dịch vụ mới hoặc dung lượng mới mong muốn.
- Có khả năng truyền dẫn hai chiều trên cùng một sợi quang: đối với các mạng yêu cầu tối thiểu hóa đường truyền sợi quang như các mạng truy nhập quang ... Kỹ thuật ghép nhiều bước sóng truyền dẫn hai chiều trên cùng một sợi quang là rất hiệu quả.
- Cấu hình mạng có tính linh hoạt, tính kinh tế và độ tin cậy cao.

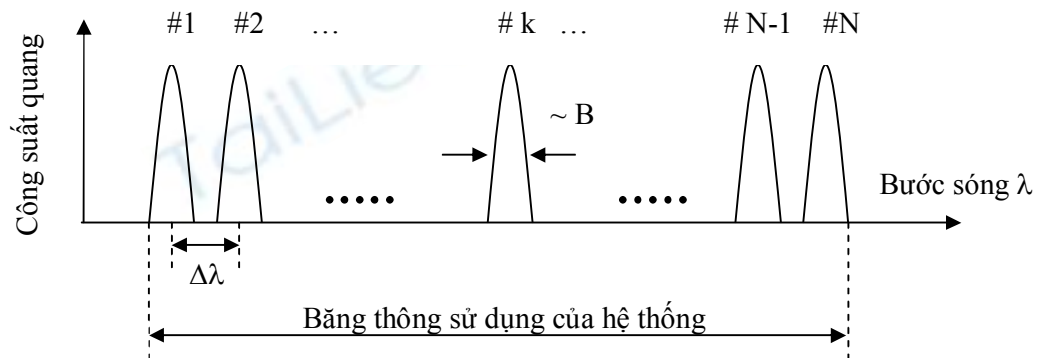
1.2.3.2. Các tham số của hệ thống WDM

Để đánh giá, so sánh các hệ thống WDM, người ta đưa ra các tham số hệ thống như dưới đây:

- a. Số lượng kênh bước sóng N

- b. Khoảng cách giữa các kênh bước sóng $\Delta\lambda$
- c. Băng thông sử dụng của hệ thống $N \times \Delta\lambda$
- d. Tốc độ truyền tin trên mỗi kênh bước sóng B
- e. Dung lượng của hệ thống $N \times B$
- f. Dung lượng truyền dẫn của hệ thống $N \times B \times L$
- g. Hiệu suất sử dụng kênh bước sóng $B/\Delta\lambda$

Hình 1.6 mô tả một số tham số trên một cách trực quan hơn.



Hình 1.6. Mô tả trực quan các tham số của hệ thống WDM

Ví dụ, một hệ thống WDM hoạt động ở băng C, gồm 32 kênh, với khoảng cách kênh 100 GHz, tốc độ truyền dẫn mỗi kênh 10 Gbit/s, khoảng cách truyền dẫn 500 km sẽ có các tham số sau: Số lượng kênh $N = 32$, khoảng cách kênh $\Delta\lambda = 100 \text{ GHz} = 0.8 \text{ nm}$, băng thông sử dụng $= 3200 \text{ GHz} = 25.6 \text{ nm}$, tốc độ truyền tin trên mỗi kênh $B = 10 \text{ Gbit/s}$, dung lượng của hệ thống $= 320 \text{ Gbit/s}$, dung lượng truyền dẫn của hệ thống $= 160 \text{ Tbit/s-km}$ và hiệu suất sử dụng kênh bước sóng 10%.

Thông thường, các tham số chính được quan tâm chủ yếu là số lượng kênh, tốc độ kênh, khoảng cách truyền dẫn và dung lượng truyền dẫn của hệ thống.

Bảng 1.1 dưới đây liệt kê các tham số chính của một số hệ thống WDM trong các phòng thí nghiệm.

Bảng 1.2 dưới đây liệt kê các tham số chính của một số hệ thống WDM hiện đang được khai thác trên thế giới.

Bảng 1.1. Các tham số chính của một số hệ thống WDM trong phòng thí nghiệm.

Số kênh bước sóng N	Tốc độ kênh B (Gbit/s)	Khoảng cách truyền dẫn L (km)	Dung lượng truyền dẫn (Tb/s-km)	Trích dẫn
10	2	68	1.3	N.A.Olsson et al., EL., 1985
17	20	150	51.0	A.R. Chraplyvy et al., PTL, 1995
273	40	117	1277.6	K.Kufuchi et al., OFC, 2001
26	100	410	1066.0	D. Mongardien et al., ECOC, 2009
5	320	525	840.0	P. Guan et al., ECOC, 2009

Bảng 1.2. Các tham số chính của một số hệ thống WDM hiện đang được khai thác trên thế giới.

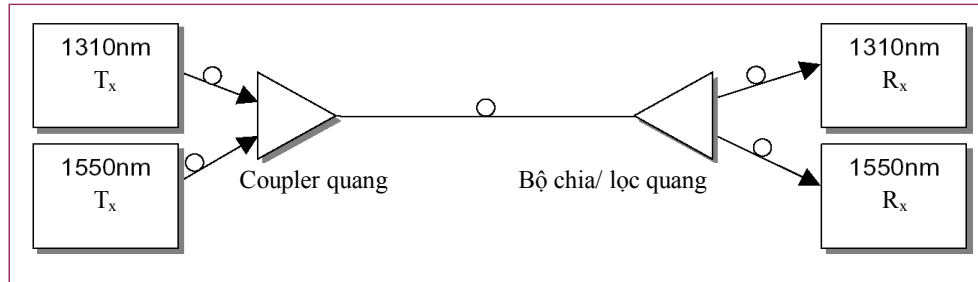
Số kênh bước sóng N	Tốc độ kênh B (Gbit/s)	Khoảng cách truyền dẫn L (km)	Dung lượng truyền dẫn (Pb/s-km)	Hệ thống
8 + 4	10 + 40	1 700	0.4	Mạng đường trục DWDM backbone VNPT (2010)
48	10	39 000	18.7	Mạng liên lục địa SEAMEWE3 (2007)
64	10	18 800	12	Mạng liên lục địa SEAMEWE4 (2008)
48	40	20.000	38.4	Mạng kết nối khu vực Đông Nam Á với tuyến cáp của Mỹ AAG (2009)

1.2.4. Phân loại và các chuẩn của hệ thống WDM

1.2.4.1. Hệ thống WDM băng tần rộng (BWDM – Broad passband WDM)

Đây là hệ thống WDM ra đời sớm nhất trong lịch sử phát triển của WDM. Nó thực hiện truyền dẫn 2 kênh bước sóng trong đó mỗi kênh bước sóng thuộc một cửa sổ truyền dẫn (vùng 850 nm, 1310 nm hoặc vùng 1550 nm).

Đặc điểm của hệ thống này là chi phí hệ thống thấp, tuy nhiên dung lượng và khoảng cách truyền dẫn bị giới hạn. Hình 1.7 mô tả một hệ thống điểm-điểm đơn hướng ghép hai bước sóng thuộc vùng cửa sổ thứ 2 (1310 nm) và vùng cửa sổ thứ 3 (1550 nm).



Hình 1.7. Ví dụ một hệ thống BWDM đơn hướng điểm - điểm

1.1.4.2. Hệ thống WDM ghép mật độ thấp (CWDM – Coarse WDM)

Đây là hệ thống WDM ra đời từ đầu những năm 1990 cho phép ghép nhiều hơn 2 bước sóng trên hệ thống. Khoảng cách giữa các bước sóng khá lớn (cỡ 20 nm).

ITU-T đã đưa ra chuẩn G.694.2 quy định về khoảng cách các kênh, bước sóng trung tâm của hệ thống này như sau:

- Khoảng cách các kênh: 20 nm
- Bước sóng trung tâm: 1552.52 nm
- Dải bước sóng hoạt động từ 1270 nm đến 1610 nm

1.1.4.3. Hệ thống WDM ghép mật độ cao (DWDM – Dense WDM)

Đây là hệ thống WDM ra đời từ giữa những năm 1990 và cũng chính là các hệ thống WDM hiện tại đang khai thác trên thế giới. Hệ thống này cho phép ghép rất nhiều các bước sóng trên hệ thống. Khoảng cách giữa các bước sóng chỉ cỡ 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz và thậm chí là 25 GHz.

ITU-T đã đưa ra chuẩn G.692 quy định về khoảng cách các kênh, bước sóng trung tâm của hệ thống DWDM như sau:

- Khoảng cách các kênh: 100 GHz
- Bước sóng trung tâm: 1552.52 nm
- Vùng bước sóng hoạt động: Băng S, C, L, U.

1.3. CÁC PHẦN TỬ CƠ BẢN TRONG HỆ THỐNG WDM

1.3.1. Nguồn quang và thu quang

1.3.1.1. Nguồn quang

Nguồn quang sử dụng cho WDM có thể là các laser đơn một hoặc một laser đa một hoặc nguồn siêu băng rộng (supercontinuum) kết hợp với bộ lọc dạng răng lược. Dưới đây chúng ta sẽ lần lượt xét các nguồn quang trên.

a. Laser đơn một cho WDM

Thông thường, một laser đơn một sử dụng cho hệ thống WDM cũng không quá khác biệt so với một laser đơn một sử dụng cho hệ thống đơn kênh. Tuy nhiên, có một số yêu cầu nghiêm ngặt đối với laser trong WDM, đó là:

- Sử dụng điều chế ngoài: cho phép tạo ra các định dạng mã tín hiệu khác nhau như NRZ, RZ, CS-RZ hay DPSK. Các dạng mã điều chế này không những cho phép giảm phổ kênh tín hiệu điều chế mà còn có khả năng chịu đựng các ảnh hưởng khác tốt hơn như tán sắc màu, tán sắc một phân cực. Ngoài ra điều chế ngoài còn cho phép tốc độ điều chế cao, không bị chirp tần số.

Hiện tượng chirp tần số trong điều chế trực tiếp laser là sự thay đổi tần số ở sườn lên của xung tín hiệu (bit 1). Hiện tượng này liên quan đến quá trình thay đổi mật độ hạt tải đột ngột trong vùng nghèo của tiếp giáp p-n. Sự thay đổi mật độ hạt tải đột ngột sẽ khiến cho chiết suất vùng tích cực thay đổi khiến tần số chọn lọc từ khoang cộng hưởng cũng thay đổi theo.

- Độ rộng phổ hẹp: thông thường, laser DFB hoặc DBR là những lựa chọn thích hợp cho yêu cầu này. Tuy nhiên, một nguồn quang có độ rộng phổ quá hẹp lại không hoàn toàn thích hợp với hệ thống WDM bởi ngưỡng công suất của hiệu ứng tán xạ kích thích Brillouin, một hiệu ứng phi tuyến làm suy giảm chất lượng hệ thống, tỉ lệ thuận với độ rộng phổ nguồn quang.

- Độ ổn định tần số cao: Đây là yêu cầu thiết yếu đối với một hệ thống WDM bởi khoảng cách của các kênh bước sóng trong hệ thống là rất hẹp (<1 nm) nên chỉ cần một kênh bước sóng trôi khỏi bước sóng định của nó cỡ nm là hệ thống không thể hoạt động bình thường được nữa.

Nguyên nhân của việc trôi tần số có thể do nhiệt độ hoặc sự già hóa vật liệu sử dụng trong laser. Khi nhiệt độ thay đổi tức thời trong khoang cộng hưởng, chiết suất của khoang cộng hưởng ngay lập tức thay đổi theo khiến cho tính chọn lọc bước sóng của khoang cộng hưởng cũng thay đổi. Do đó, bước sóng phát xạ bị thay đổi. Ngoài ra, khi nhiệt độ thay đổi, năng lượng vùng cấm của electron cũng thay đổi khiến bước sóng phát xạ thay đổi theo. Trong trường hợp nhiệt độ trong khoang