

**波長分割多重光ローカルエリアネットワークと
その要素技術に関する研究**

塩沢 隆広

目 次

第1章 序 論	1
1. 1 光ネットワークの発展	1
1. 2 光ネットワークの構成	3
1. 2. 1 全国 (National) ネットワーク (中長距離ネットワーク)	4
1. 2. 2 県内 (Regional) ネットワークと地域 (Local) ネットワーク	6
1. 2. 3 加入者 (Access) ネットワーク	6
1. 2. 4 ローカルエリアネットワーク (LAN: Local Area Network)	6
1. 3 本研究の内容と本論文の構成	7
第1章の参考文献	10
第2章 光ローカルエリアネットワークの要素技術	11
2. 1 序	11
2. 2 光ネットワークに適用される多重化技術	11
2. 3 波長分割多重 (WDM) システムの分類	13
2. 4 波長分割多重 (WDM) 用光源とフィルタ	16
2. 4. 1 波長分割多重 (WDM) 用光源	16
2. 4. 2 波長分割多重 (WDM) 用フィルタ	20
2. 4. 3 波長分割多重 (WDM) システムにおける波長フィルタ所要特性	26
2. 4. 4 光源と波長フィルタの波長分割多重 (WDM) システムへの適用要件	28
2. 5 結 一本論文で提案するシステムの位置付けー	30
第2章の参考文献	33
第3章 デマンドアサイン波長分割多重マルチアクセス光ローカルエリアネットワーク	37
3. 1 序	37
3. 2 ネットワークの構成	37
3. 3 システム設計	40
3. 3. 1 波長チャネル数	40
3. 3. 2 パワーバジェットの設計例	40
3. 4 アクセスコントローラ	43
3. 5 実験システム	44
3. 6 結	48
第3章の参考文献	50

第4章 波長分割・時分割・空間分割複合多重映像信号分配光ネットワーク	51
4. 1 序	51
4. 2 放送局向け映像信号分配ネットワークの要件とネットワークの構成	52
4. 3 システム設計	55
4. 3. 1 時分割多重(TDM)システム	55
4. 3. 2 波長分割多重(WDM)システム	56
4. 3. 3 波長チャネル間クロストークと波形劣化	56
4. 3. 4 パワーバジェット	58
4. 4 装置開発と特性	60
4. 5 結	69
第4章の参考文献	71
第5章 上り周波数分割マルチアクセス／下り時分割多重光アクセスネットワーク	73
5. 1 序	73
5. 2 システム構成	74
5. 3 光ビート雑音の検討	76
5. 4 システム設計	76
5. 4. 1 レベル設計	76
5. 4. 2 下りの CNR	79
5. 4. 3 上りの CNR	80
5. 4. 4 分散によるパワーペナルティ	81
5. 4. 5 伝送容量	82
5. 5 結	84
第5章の参考文献	86
第6章 波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワーク	87
6. 1 序	87
6. 2 システム構成	87
6. 3 システム検討	89
6. 3. 1 波長切換え光源の高速波長安定化	89
6. 3. 2 スロット使用状態の検出	90
6. 3. 3 パワーバジェットの設計例	91
6. 4 高速波長切換え光源	93
6. 4. 1 光スイッチを用いた高速波長切換え光源の構成	93
6. 4. 2 実 験	95

6. 5 ATM セル伝送実験	97
6. 6 結	98
第6章の参考文献	99
 第7章 結 論	 101
7. 1 本研究の成果	101
7. 2 今後の課題	106
7. 2. 1 光ネットワークの研究課題	106
7. 2. 2 波長分割多重 (WDM) 用デバイスの充実	108
7. 2. 3 光デバイスの低コスト化	108
第7章の参考文献	109
 付録 略語表	 111
謝 辞	115
本研究に関する発表文献	117
その他の発表文献	119

第1章 序 論

1. 1 光ネットワークの発展

光ファイバ通信は、1980年代より世界的に導入された。現在、国内においては、基幹回線の光ファイバ化がほぼ終了し、いわゆる FTTH (Fiber to The Home) を目指して加入者網（アクセスネットワーク）への導入が始まろうとしている。また、企業内通信、データ転送に用いられる LAN (Local Area Network) においても、ギガビットイーサネットやファイバチャネルに代表される様に、高速光ファイバ通信技術が導入されつつある。光ファイバ通信技術は、いわゆる情報化社会を支える基幹技術となっている。また、現状のあるいは今後のインターネットの爆発的普及を考えると、今後光ファイバ通信の重要性は、増すことになる。本章では、最初に光ファイバ通信の歴史、言い換えると、光ネットワークの発展の歴史を概観する。光ネットワークの展開を表1. 1にまとめる。

1970年に米国ベル研究所の林らが、ダブルヘテロ（DH: Double Hetero）構造を有する半導体レーザの室温連続発振に成功するとともに、米国コーニング社により 20dB/km という低損失光ファイバが実現され、これらが光ファイバ通信の研究の活発化を促すことになった [1]。1980年代に入ると、1970年代の研究成果を受け、基幹回線における光ファイバ通信の実用化が推進された。音声トラフィックが主体であった1980年代に対して、1990年代に入るとデータトラフィックが急増する。ちなみに、音声トラフィックの成長率が年率8%であったのに対して、データトラフィックの成長率は、年率35%と予測されている。情報化社会を支えるインフラストラクチャとしての光ネットワークの重要性が益々増していることが分かる。

基幹回線における光ファイバ通信システム導入の経過を見ると、国内では、1981年より伝送速度6~100Mb/sの光ファイバ伝送システムの導入が始まり[2]、1985年には、伝送速度400Mb/sの旭川・

表1. 1 光ネットワークの展開

		アクセスネットワーク	基幹ネットワーク	
基礎研究期	1970	DH半導体レーザ 光ファイバ		
基幹回線 への 光ファイバ通 信の導入	1984	ISDN実験開始		
	1985		日本縦貫ルート	400Mb/s
	1989		第三太平洋横断ケーブル(TCP-3)	280Mb/s
			第四ハワイケーブル(HAW-4)	280Mb/s
WDMの導入と アクセス系の 光ネットワーク化	1996		スプリント8波WDM	2.4Gb/sX8
			第五太平洋横断ケーブルネットワーク(TPC-5CN)	5Gb/s
	1997	CATV試験提供(FTTH)	アジア太平洋ケーブルネットワーク(APCN)	5Gb/s
	1998	πシステム導入開始(FTTC)		
		FDDI		

鹿児島間（全長 3,400km）の日本縦貫ルートが完成している[3]。また、国際通信においては、1989 年に、伝送速度 280Mb/s の太平洋域初の光海底ケーブルである第三太平洋横断ケーブル（TCP-3）と第四ハワイケーブル（HAW-4）が運用開始され[4]、1992 年には、伝送速度 560Mb/s の第四太平洋横断ケーブル（TCP-4）が運用開始された[5]。また、1996 年と 1997 年には、伝送速度 5Gb/s の第五太平洋横断ケーブルネットワーク（TPC-5CN）とアジア太平洋ケーブルネットワーク（APCN）がそれぞれ運用開始された[6,7]。

波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）について見ると、1990 年代に北米を中心に実用化が進んだ。1990 年代のデータトラフィックの増加に対して、北米では、光ファイバの利用率に余裕が無く、新規に光ファイバを敷設するより、波長分割多重（WDM）通信システムを導入する方が経済的であったため、波長分割多重（WDM）へのニーズが高かった。これに対し、国内では、光ファイバの利用率に余裕があったため、米国の様に波長分割多重（WDM）通信システムの導入を急ぐ必要が無かった。更に、国内では、NTT が分散シフト光ファイバを敷設していたため、（Er ドープ光ファイバアンプが使用できる） $1.5\mu\text{m}$ 帯の波長分割多重（WDM）通信システムでは、四光波混合によるクロストークが発生することから、波長分割多重（WDM）通信システムを導入するのが難しい状況にあった*1。

米国では、長距離電話会社のスプリントが 1996 年に 2.4Gb/s の 8 チャンネル波長多重システムを導入した。最近では、10Gb/s の 32~40 チャンネル、更には、160 チャンネル波長多重システムが実用化されている[8,9]。今後のデータトラフィックの増加に対応できる伝送容量を確保するために、更に 40Gb/s 以上の伝送容量を持つ光ファイバ通信システムが研究されている[10]。

伝送速度 10Gb/s までの光ファイバ通信システムにおいては、電氣的時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）方式を前提として、伝送速度を上げることにより伝送容量を増加してきた。これに対し、40Gb/s 以上の伝送容量実現を目標とする現在、伝送容量拡大のために次の三つの方式が検討されている。

(A) 電氣的時分割多重（TDM）

(B) 光学的時分割多重（OTDM: Optical Time Division Multiplexing）

(C) 波長分割多重（WDM）

電氣的時分割多重（TDM）は、従来の方式の延長線上にあり、電氣的に信号を時分割多重（TDM）する方式で、高速の多重回路（MUX: Multiplexer）、多重分離回路（DEMUX: Demultiplexer）、光送信器（Transmitter）、光受信器（Receiver）、波形等化などが研究課題となる。光学的時分割多重（OTDM）は、光領域で時分割多重、分離を行うもので、光領域の多重度分、電氣的時分割多重（TDM）方式よりも電氣的多重、分離回路、光送受信器の速度が緩和される。波長分割多重（WDM）は、光領域での周波数分割多重（FDM: Frequency Division Multiplexing）を行うもので、これも光領域の多重度分、電氣的時分割多重（TDM）方式よりも電氣的多重分離回路、光送受信器の速度が緩和される。

図 1. 1 に基幹回線における 1980 年代からの伝送容量の変化を示す。波長分割多重（WDM）は、

*1 四光波混合は零分散波長で発生し易く、 $1.5\mu\text{m}$ 波長分割多重(WDM)通信システムでは、 $1.3\mu\text{m}$ が零分散波長となるノーマル光ファイバに対して、 $1.5\mu\text{m}$ が零分散波長となる分散シフト光ファイバの方が、四光波混合が発生し易い。

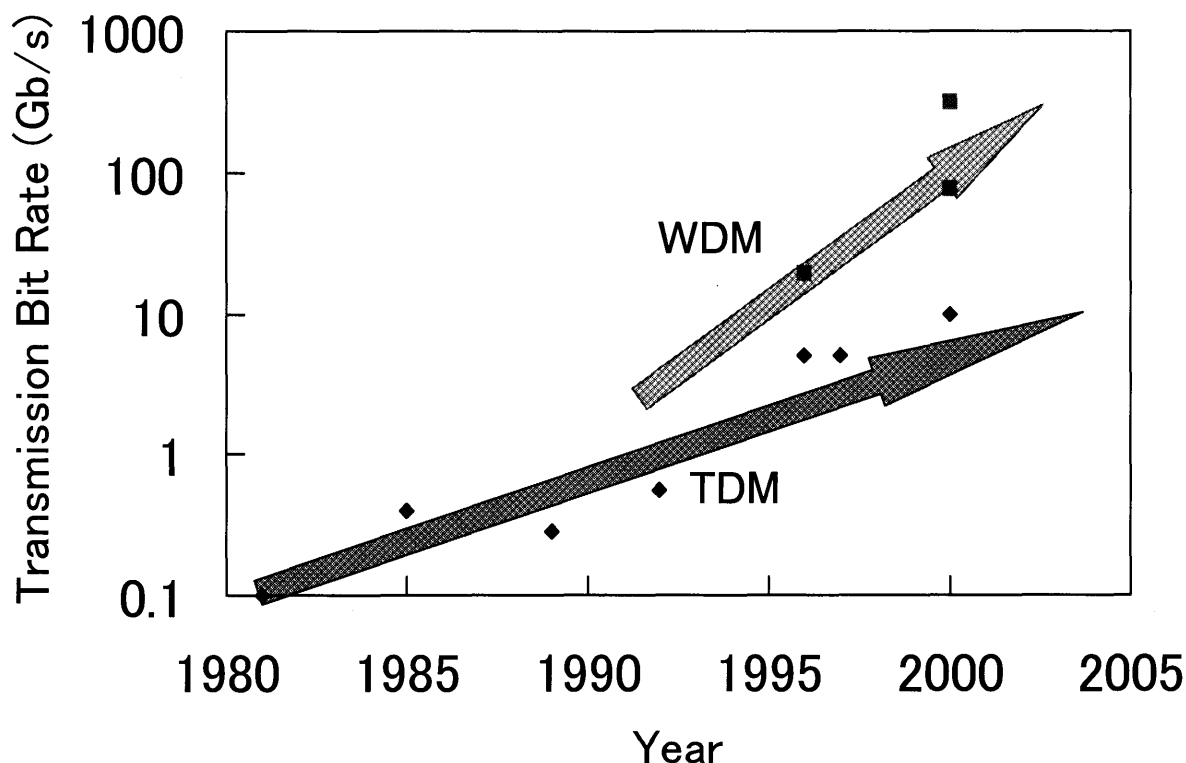


図 1. 1 基幹回線における伝送容量の拡大

1990 年ぐらいから立ち上がり始めている。時分割多重 (TDM) された信号を更に多重できることから時分割多重 (TDM) よりも大きな伝送容量が比較的容易に得られる。波長分割多重 (WDM) は、インターネットの爆発的普及に伴うデータトラフィックの増大に対応するための有効な技術となっている。

一方、光加入者網 (光アクセスネットワーク) の研究開発は、1970 年代後半から始まり、1984~1987 年には、霞ヶ関と三鷹地区において、ISN (Information Network System) のパイロットシステムによる実験が行われた[2]。また、1997 年には、横浜市において、CATV 映像伝送サービスの試験提供が開始された[10]。本サービスは、PDS (Passive Double Star) 形式の通信システムに、波長分割多重 (WDM) により CATV の信号を重畳し、一芯光ファイバでいわゆる FTTH (Fiber to the Home) を実現するものである。更に、1998 年には、神戸、名古屋、青森において、新アクセスシステム (通称、 π システム) の導入が開始された[10,11]。 π システムは、PDS 形式により、アクセス点の電柱までを光化するもので、いわゆる FTTC (Fiber to the Cube) を実現したものである。

LAN の光化も 1970 年代後半から研究が開始され、1980 年~1990 年代には、波長分割多重 (WDM) を応用した光 LAN などが提案されている。また、1990 年代前半には、FDDI (Fiber distributed Data Interface) などの標準化光 LAN が規格化された[12]。

1. 2 光ネットワークの構成

全光ネットワークの構成例を図 1. 2 に示す[13-15]。同図に示す全光ネットワークは、全国 (National) ネットワーク (中長距離ネットワーク)、県内 (Regional) ネットワーク、地域 (Local) ネットワーク、加入者 (Access) ネットワーク、企業内ネットワークの各レイヤーより構成される。全国 (National)

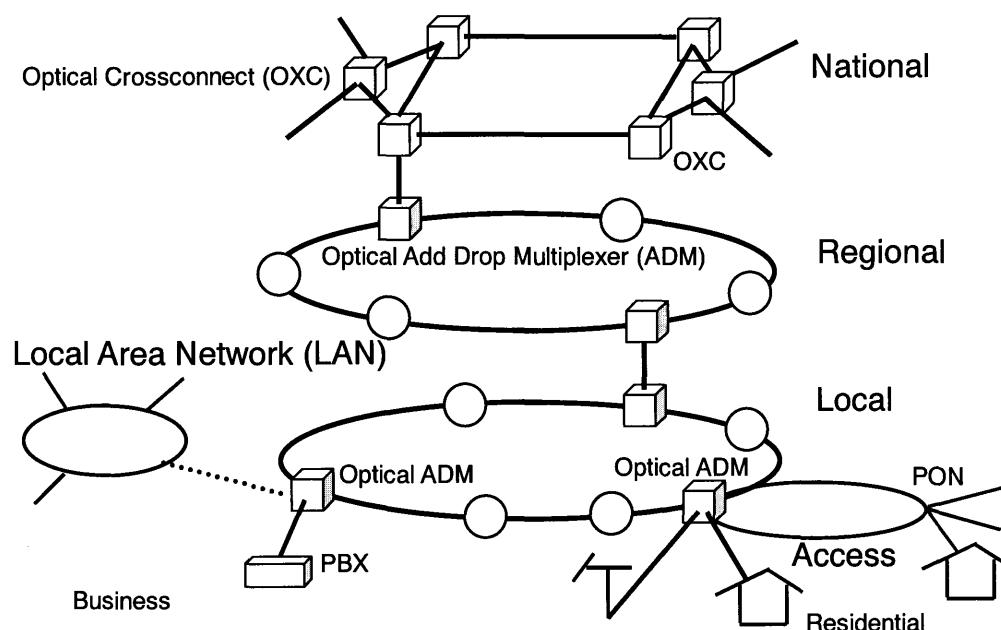


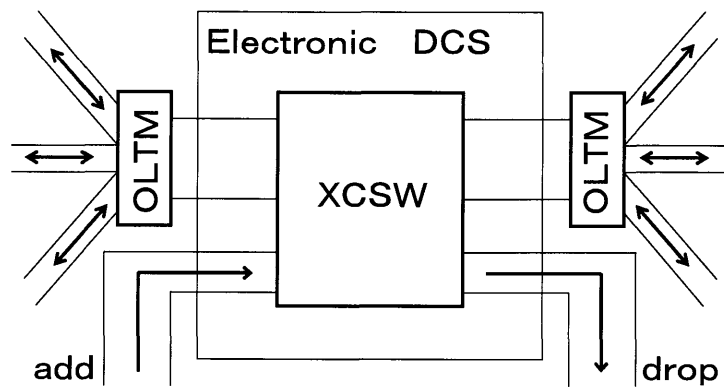
図 1. 2 光ネットワークの構成例

ネットワークには、拡張性とフレキシビリティに優れたメッシュ型ネットワークが、県内（Regional）ネットワークと地域（Local）ネットワークには、セルフヒーリング機能を持ったリングネットワークが適用される。加入者（Access）ネットワークには、経済性に優れた PON (Passive Optical Network)が適用される。企業内ネットワークなどに用いられる LAN には、ループ型、あるいは、スター型光ネットワークが適用される。次にレイヤー毎の動向と課題について検討する。

1. 2. 1 全国（National）ネットワーク（中長距離ネットワーク）

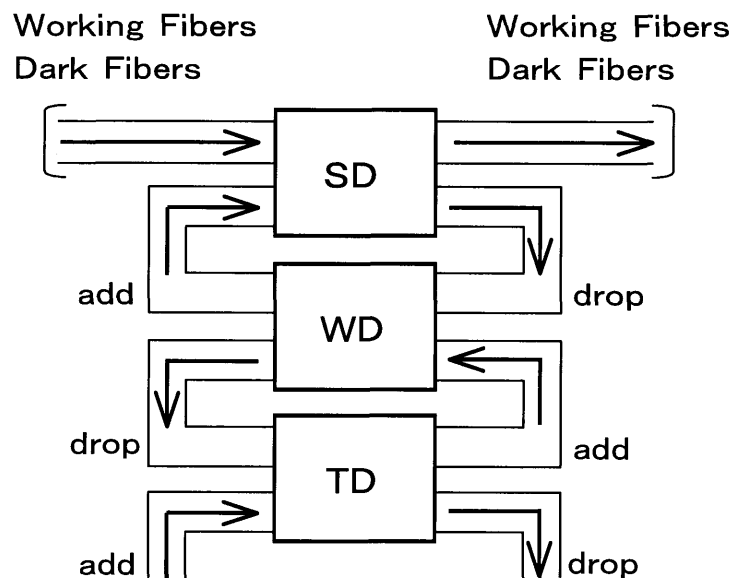
全国ネットワークには、分散して配置される都道府県を結合するのに適したメッシュ型ネットワークが適用される。各ノードは、クロスコネクト（Crossconnect）機能を有し、他ノードへの接続を行うと共に自ノード宛のトラフィックを終端する。クロスコネクトを電氣的に行うデジタルクロスコネクト（DCS: Digital Crossconnect）と光レベルでクロスコネクトを行う光クロスコネクト（OXC: Optical Crossconnect）が検討されている。全国ネットワークの回線伝送速度は、10Gb/s 以上になり、ノードの大容量化が予想される。このため、将来的に光クロスコネクトが導入されるものと考えられ、光クロスコネクトの研究が盛んに行われている。

波長分割多重（WDM）伝送を用いた場合、自ノード宛のトラフィックと他ノード宛のトラフィックを波長で分けることが可能であり（波長ラベルあるいは、波長アドレス）、効率的にクロスコネクトを行える。このため、波長ラベルの割り付け方法やノード構成などが検討されている[13]。また、光スイッチを用いた空間分割多重（SDM: Space Division Multiplexing）を組み合わせるクロスコネクトを行う方式も検討されている[16]。光スイッチを用いることで、光レベルでのネットワークの再構築が容易になると同時にプロテクションスイッチとしての機能を持たせることができる。また、ネットワークの再構築（回線切換え）を無瞬断で行うことも検討されている[16]。更に、波長分割多重（WDM）伝送を導入したネットワークに適した制御技術（ネットワークマネジメントシステム（NMS: Network Management



DCS : Digital Cross-Connect System
 XCSW : Cross-Connect Switch
 OLTM : Optical Line Terminator and Multiplexer

(a) 電氣的クロスコネクトノード



SD: Photonic Space Division Switching Network
 WD: Photonic Wavelength Division Switching Network
 TD: Time Division Switching Network

(b) 光クロスコネクトノード

図1. 3 クロスコネクトノード

System)) も検討されている。

ここで、筆者らが提案する光クロスコネクト[16]を紹介する。図1. 3 (a) は、従来から検討されている電氣的なクロスコネクトである。全ての信号は、入力部で O/E (Opto-Electric)変換された後、多重分離 (DEMUX) される。信号の一部は Add/Drop され、電氣的にクロスコネクトされた後、再び多重 (MUX) されて、E/O (Electro-Optic)変換される。同図 (b) は、筆者らが提案する光クロスコネクトである。空間分割多重 (SDM) 光スイッチと波長分割多重 (WDM) 光スイッチおよび時分割多重 (TDM)

スイッチを複合している。SD 光スイッチでは、波長分割多重 (WDM) されたままの信号が SD 光スイッチによりクロスコネクタされる。WDM 光スイッチでは、波長によりルーティング先を決定する波長パス[13]に対応するクロスコネクタが行われる。更に、TDM スwitchでは、電気的クロスコネクタが行われる。TDM スwitchで Add/Drop された信号は、下位のネットワークレイヤ（県内（Regional）ネットワークと地域（Local）ネットワーク）へ接続される。

1. 2. 2 県内（Regional）ネットワークと地域（Local）ネットワーク

県内ネットワークあるいは、地域ネットワークには、リングネットワークが適用される。同ネットワークは、その機能から転送ネットワークとも呼ばれる。通常、右回りと左回りに同じトラフィックを流すことで、障害回復（セルフヒーリング）機能を持たせる。各ノードは、自ノード宛のトラフィックを終端し、自ノードからのトラフィックをリングネットワークに乗せる ADM (Add Drop Multiplexing)機能を持つ。

転送ネットワークについても波長分割多重 (WDM) 伝送の適用が考えられる。この場合、メッシュ型ネットワークと同様に、自ノード宛のトラフィックと他ノード宛のトラフィックを波長で区別すること（波長ラベル）が可能であり、特定の波長の分離と挿入が可能な AD (Add Drop)型波長フィルタを用いて、ADM 機能を実現することが検討されている。波長 ADM は、波長分割多重 (WDM) 伝送を適用した全国ネットワークのノードに共通した技術である。転送ネットワークにおいても方式および NMS などが研究課題となる。

1. 2. 3 加入者（Access）ネットワーク

加入者（Access）ネットワークには、PON (Passive Optical Network)が適用される。加入者ネットワークでは、低コスト化が重要な課題であり、ネットワークの形態としては、パッシブダブルスター (PDS: Passive Double Star)型ネットワークの適用が検討される。PDS 型光ネットワークは、セントラルオフィス (CO: Central Office) と 8~16 のネットワークターミネータ (NT: Network Terminator) を、スターカプラを介して結ぶ。PDS 型光ネットワークでは、複数のネットワークターミネータとのマルチアクセス (MA: Multiple Access) にどのような方式を採用するかが課題となる。

加入者ネットワークで映像信号を分配する方式として、波長 $1.3\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ の波長分割多重を適用し、通常の音声、データトラフィックは、 $1.3\mu\text{m}$ を用いて、映像信号は、 $1.5\mu\text{m}$ を用いて伝送する方式なども検討されている。

経済性の理由から、加入者（Access）ネットワークにおいては、当面時分割多重が主流になると予測されるが、将来の更なるトラフィック増化に対応するため、高密度波長分割多重の適用なども検討されている。また、無線 LAN、極小ゾーンワイヤレスアクセス方式などのマイクロ波フォトリクス技術の導入も注目されている。

1. 2. 4 ローカルエリアネットワーク (LAN: Local Area Network)

LAN の用途は、企業内通信、コンピュータネットワークの他に、監視映像伝送など多岐に渡る。公衆ネットワークに接続される場合もあるが、閉じたネットワークを形成する場合もある。また、その規模も大小さまざまなものである。

光 LAN は、その開発の経緯から以下の二つに分類することができる。

(A) 従来の電気による LAN を光化した光 LAN

(B) 初めから光ファイバ通信技術を取り入れて設計された光 LAN

ギガビットイーサネットなどは、前者に、FDDI や WDM 光 LAN は、後者に分類される。

また、トポロジーから以下の三つに分類することができる。

(A) ループ型

(B) スター型

(C) バス型

10Gb/s クラスの光 LAN の実現方法として時分割多重と波長分割多重がある。LAN は、その経済性が重要視されるため、今後の波長分割多重用デバイスの価格低減が LAN への波長分割多重の導入の重要な要件となる。また、波長分割多重 LAN についてもその用途に適した方式、NMS (Network Management System)を採用することが重要であり、これらが光 LAN の課題となる。

1. 4 本研究の内容と本論文の構成

本章では、光ネットワークの発展の歴史を概観し、最終形態と考えられる全光ネットワークの構成を示した。現在、全光ネットワークに向けた研究開発が進められている。しかし、一度に全光ネットワークが実現される訳では無い。全光ネットワーク導入のシナリオの一段階として、波長分割多重 (WDM) などの技術を導入した光ネットワークを、技術のための技術で無く、実用システムとして段階的に導入して行くことが重要である。このためには、比較的規模が小さく、閉じたネットワークである LAN などから光ネットワークの実用化を進めていくことが好都合である。また、実用化を考えたステップが光ネットワークの適用範囲を広げるものと考えられる。

本研究では、全光ネットワーク構成中の地域 (転送) ネットワーク、加入者 (Access) ネットワーク、信号分配ネットワークへ適用が可能である光ローカルエリアネットワークの提案を行う。これらの光ネットワークは、波長分割多重技術を基幹技術とする光ローカルエリアネットワークであり、その要素技術に関する提案、実験、検討を行った。また、これらの光ネットワークの提案は、実用化を意識したものであり、実現性が高いことが特長の一つである。

以下に本研究の内容と本論文の構成をまとめる。

第2章では、最初に、光ネットワークの要素技術となる多重化技術をまとめる。次に、この中で、重要な位置を占める、また、本論文の主題である波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) システムについて、光源と波長フィルタの動作モード (固定波長, 可変波長) による分類を行う。更に、代表的な波長分割多重 (WDM) 用光源とフィルタについて述べ、光源とフィルタから分類した各波長分割多重 (WDM) システムに対して適用可能な光源およびフィルタについてまとめる。最後に、本論文で提案する各光ネットワークについて、光源とフィルタから見た波長分割多重 (WDM) システムの分類における位置付について述べる。

第3章では、DA-WDMA (Demand Assign Wavelength Division Multi-Access)を用いた光 LAN を提案す

る。本光 LAN は、既存の標準光 LAN とこれに付加される波長 (WD) チャネルから構成される。WD チャネルは、標準光 LAN の伝送速度に依存しない、他チャネルのデータ伝送の影響を受けない伝送路を提供できる。また、本光 LAN は、既存の標準 LAN を拡張することにより実現される。更に、第 3 章では、提案する光 LAN の WD チャネル数、レベルダイアグラムなどのシステム設計を行う。また、本光 LAN の有効性を示すために開発した実験システムについて述べる。本実験システムでは、DA-WDMA 制御を実現するための専用のコントローラとソフトウェアを開発した。また、本実験システムには、AO (Acousto-Optic) フィルタによる可変波長 ADM (Add Drop Multiplexing) を用いている。提案する光 LAN で用いている DA-WDM の概念は、加入者系光ネットワークやオフィス間光ネットワークなどへも適用可能である。

第 4 章では、フジテレビジョンに導入したシステムを中心に放送局向光ネットワークについて述べる。放送局、特にキー局 (複数の系列放送局の中心的役割を果たす局) では、放送局内で多チャネルの映像信号を各スタジオの副調整室や VTR 室などに分配するネットワークを必要とする。一方、放送局内映像伝送ネットワークは、放送局内という閉じた空間内のネットワークであることから、波長分割多重の様な新しい技術を導入し易い環境にあった。1997 年 3 月より、本放送を開始したフジテレビジョンの新社屋に、放送局内映像信号分配ネットワークとして世界で最初の光ネットワーク (波長分割・時分割複合多重光ネットワーク) を導入した。この光ネットワークにより、キー局で要求される大容量、フレキシブルなネットワークが構成できる。第 4 章では、最初にキー局の映像信号分配ネットワークに要求される特性、仕様について述べ、次に、この要求仕様を満たす波長分割・時分割複合多重光ネットワークの構成と設計について述べる。更に、開発した装置とその特性およびフジテレビジョン新社屋への導入状況について述べる。

第 5 章では、加入者ネットワークへの適用が期待できる U-FDMA/D-TDM (Upstream-Frequency-Division-Multiple Access/Downstream-Time-Division-Multiplexing) 光マルチアクセスネットワークを提案する。本ネットワークの下りの TDM 通信は、放送モードでブロードバンドサービスを提供する。また、双方向通信が容易に実現でき、送信光源に通常の SCM (Subcarrier Multiplexing) 方式の様に線形性の高いデバイスを必要としない。上りの通信の受信器で発生する光ビート雑音を避ける一つの方法として送信光源に広い光スペクトル幅を持つ SLD (Superluminescent Diode) を用いることを提案する。CNR (Carrier to Noise Ratio) と光ファイバの分散によるパワーペナルティを計算し、チャネル容量を求める。

第 6 章では、波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワークを提案する。本光ネットワークは、WDM 技術を用いた光ネットワークで、光 ATM (Asynchronous Transfer Mode) 交換網としての機能を持つ。本光ネットワークは、高速光転送網、MAN (Metropolitan Area Network) 等のネットワークに適用できる。第 6 章では、最初に提案するネットワークの構成、特長を述べ、次に、光デバイス、制御技術の点から本ネットワークの実現性を検討するとともに、パワーバジェットの設計例を示す。更に、本ネットワークの要素技術である高速の波長切り換え光源について、二つの可変波長半導体レーザと光スイッチを用いる構成を提案する。また、高速波長安定化のためにファブリペローエタロン (FP: Fabry-Perot etalon) を用いる方法を提案する。本光ネットワークの基本動作である高速パケット信号伝送、選択受

信の実験を行い、本光ネットワークの実現性を示す。

第7章では、結論として本研究の成果をまとめるとともに、提案する光ネットワークの今後の展開について述べる。DA-WDMA 光 LAN には、DA-WDM の回線の代わりに、固定波長光源と可変波長フィルタを用いた回線を用いることが考えられる。また、十分な WD チャンネル数を確保できれば、自由度の高い光 LAN を構成することが可能となる。映像信号分配光ネットワークには、大規模光スイッチャや、IP (Internet Protocol) ネットワークの導入も考えられる。加入者系光ネットワークでは、WDM デバイスの低価格化による WDM ネットワークへの展開が期待される。WDM パケット転送光ネットワークは、次世代技術を導入した光ネットワークであり、今後の要素技術の進展による実用化が期待される。

第1章の参考文献

- [1] 藤井陽一, "光工学," pp.2-3, アグネ承風社, 東京, 1993.
- [2] T. Kimura, "Fiber Optic Transmission Systems—Status and Trends in Japan," IEEE J. Selec. Area in Commun., Vol. SAC-4, No. 4, pp. 498-505, July 1986.
- [3] 小山正樹, 箕輪純一郎, 藤井洋二, "光通信回路とシステム," pp.110-111, オーム社, 東京, Feb. 1987.
- [4] Y. Iwamoto and H. Fukinuki, "Recent Advances in Submarine Optical Fiber Cable Transmission Systems in Japan," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. LT-3, No. 5, pp. 1005-1006, Oct. 1985.
- [5] 新納康彦, "光海底ケーブルネットワークの現状と将来", KDD テクニカルジャーナル, No. 3, pp.2-5, 1990.
- [6] 田中正人, 秋葉重幸, "TPC-5CN、APCN の完成と将来の大容量海底ケーブル通信技術," KDD テクニカルジャーナル, No.28, pp.4-7, 1997.
- [7] 堀内幸夫, "無中継光海底ケーブルシステム," KDD テクニカルジャーナル, No.29, pp.18-20, 1997.
- [8] J. P. Ryan, "WDM: North American Deployment Trends," IEEE Commun. Magazine, pp.40-44, Feb. 1998.
- [9] 信田稔, 中村真也, "超大容量伝送と IP over WDM を実現する DWDM 伝送システム「SpectralWave シリーズ」," OPTRONICS, No. 5, pp. 149-153, 2000.
- [10] 玉木規夫, "光アクセス系のシステム技術," O plus E, Vol. 21, No. 1, pp. 63-67, Jan. 1999.
- [11] 荒木伸男, "NTT R&D 50 and Future 2 ネットワーク技術," N T T 技術ジャーナル, pp.14-18, Aug. 1998.
- [12] 岡田義邦, "光 LAN とその標準化," OPTRONICS, No. 2, pp. 63-66, 1991.
- [13] 佐藤健一, 高知尾昇, "フォトリックネットワークと波長多重," O plus E, No. 215, pp. 90-99, Oct. 1997.
- [14] 吉田淳一, 宮哲雄, 吉國裕三, 姫野明, "次世代光ネットワークの実現に向けた光デバイスの研究開発動向," N T T 技術ジャーナル, pp. 58-62, 1998.
- [15] 逸見直也, "超テラビット級光ネットワーキング," N E C 技報, Vol. 52, No. 12, pp. 34-39, Dec. 1999.
- [16] T. Shiragaki, M. Fujiwara, S. Suzuki, C. Burke, and T. Shiozawa, "Optical Digital Cross-Connect System Using Photonic Switch Matrices and Optical Amplifiers," J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 8, pp. 1490-1496, Aug. 1994.

第2章 光ローカルエリアネットワークの要素技術

2. 1 序

前章では、光ネットワークの発展の歴史を概観し、最終形態と考えられる全光ネットワークの構成を示した。光ローカルエリアネットワーク、また、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) システムを技術的側面から検討することは、今後の光ネットワークの研究の動向あるいは、発展方向を考える上で重要である。また、本論文で提案する各光ローカルエリアネットワークの位置付を理解する上でも重要である。

本章では、最初に、光ネットワークに適用される多重化技術をまとめる。次に、この中で、重要な位置を占める、また、本論文の主題である波長分割多重 (WDM) システムについて、光源と波長フィルタの動作モード (固定波長, 可変波長) による分類を行う。更に、代表的な波長分割多重 (WDM) 用光源とフィルタについて述べ、光源とフィルタから分類した各波長分割多重 (WDM) システムに対して適用可能な光源およびフィルタについてまとめる。最後に、本論文で提案する各光ローカルエリアネットワークについて、本章で述べる波長分割多重 (WDM) システムの分類における位置付について述べる。

2. 2 光ネットワークに適用される多重化技術

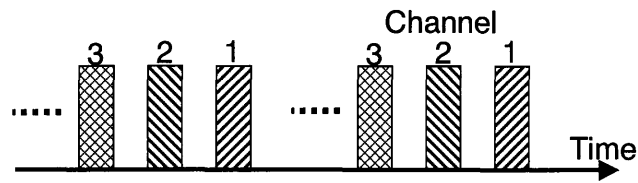
基幹回線の伝送容量を増やすための多重化技術については、第1章でも述べたが、ここで光ネットワークに適用される多重化技術を改めてまとめる。主要な多重化技術として、以下の5つが上げられる。

- (A) 時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing)
- (B) 空間分割多重 (SDM: Space Division Multiplexing)
- (C) 波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing)
- (D) サブキャリア (副搬送波) 多重 (SCM: Subcarrier Multiplexing)
- (E) 光符号分割多重 (OCDM: Optical Code Division Multiplexing)

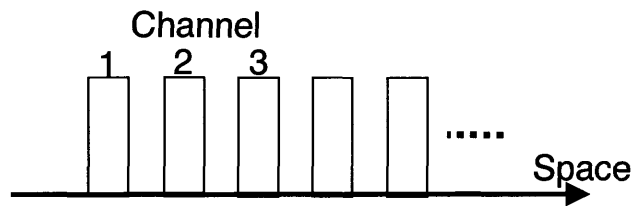
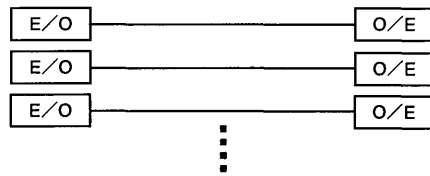
基幹回線では、当初時分割多重 (TDM) を単独で用いる方式が採用されていたが、波長分割多重 (WDM) と複合した方式が用いられる様になってきた。この様にネットワークの大容量化に対応するために、複合された方式を用いた光ネットワークが実用化、あるいは、検討されていくものと考えられる。以下に、光ネットワークの要素技術となるこれらの多重化技術について概観する。図2. 1に、これら多重方式の概念図を示す。

(A) 時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing)

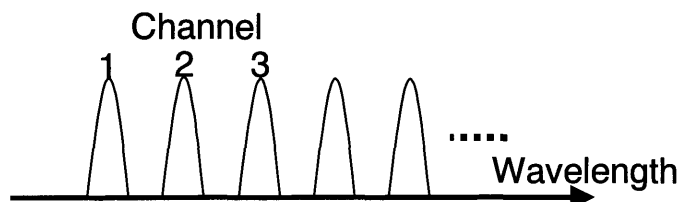
時分割多重 (TDM) は、従来から基幹回線を中心に採用されている方式である。従来は、電気的時分割多重 (TDM) 方式が用いられていたが、基幹回線の伝送速度が 10Gb/s を超える様になり、光学的時分割多重 (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) が検討されている。ただし、光学的時分割多重



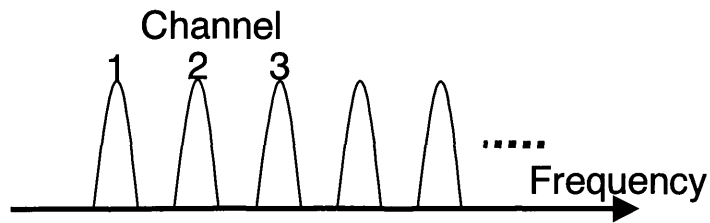
(a) TDM (Time Division Multiplexing)



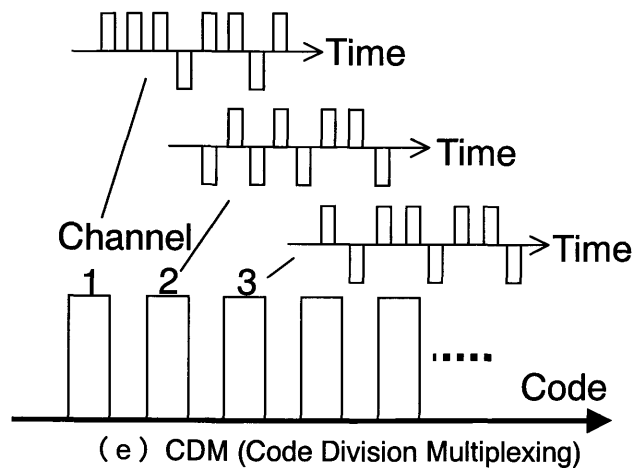
(b) SDM (Space Division Multiplexing)



(c) WDM (Wavelength Division Multiplexing)



(d) SCM (Subcarrier Multiplexing)



(e) CDM (Code Division Multiplexing)

図 2.1 光ネットワークに適用される多重化技術

(OTDM) は、10Gb/s 程度まで電氣的に時分割多重された信号を光學的に多重するもので、その光學的
多重部の多重度は低い。従って、多重 (MUX: Multiplexing)、多重分離 (DEMUX: Demultiplexing) の大
部分が電氣的に行われる点は共通している。

(B) 空間分割多重 (SDM: Space Division Multiplexing)

ポイント・ツー・ポイント (Point to Point) 伝送に限定してみると、空間分割多重 (SDM) は、複数
の光ファイバを用いる伝送方式であるから、この意味では従来から用いられた方式である。交換部分の
機能を含めてみると、空間分割多重 (SDM) は光スイッチを用いた方式を意味する。従って、空間分割
多重 (SDM) は、光スイッチの開発と密接に関連する。低コスト、大規模、小形の光スイッチの実用化
により、空間分割多重 (SDM) 方式の適用範囲が広がるものと考えられる。最近、基幹回線のクロスコ
ネクト向け大規模光スイッチの研究が活発化している[1-4]。

(C) 波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing)

前述の様に、波長分割多重 (WDM) は、基幹回線において、既設光ファイバ回線の伝送容量を増やす
目的で、北米を中心に実用化された。最近では、ITU (International Telecommunication Union) で 100GHz
(0.8nm)あるいは、50GHz (0.4nm)間隔の波長グリッドが規格化[5]され、波長多重用の半導体レーザも入
手し易い状況になった。ポイント・ツー・ポイント (Point to Point) 伝送に限定してみると、波長分割
多重 (WDM) は、単純に伝送容量を増やす技術であるが、交換機能を含めてみた場合、用途に応じたい
ろいろな方式が考えられる。

(D) サブキャリア (副搬送波) 多重 (SCM: Subcarrier Multiplexing)

サブキャリア (副搬送波) 多重 (SCM) は、半導体レーザを副搬送波多重 (SCM) された信号で強度
変調する技術である。CATV の光ファイババックボーンや移動通信の光マイクロセル方式などで実用化
されている[6]。O/E, E/O を省くと従来のミキサやチューナがそのまま使え、伝送路には、光ファイバ
を用いるので高品質な伝送が可能である。O/E, E/O に用いる半導体レーザやフォトダイオード (PD)
に非線形性があると混変調が生じるため線形性の良いデバイスが必要とされる。

(E) 光符号分割多重 (OCDM: Optical Code Division Multiplexing) [7, 8]

光符号分割多重 (OCDM) は、送信側でチャンネルごとに異なる符号で変調し、符号間の直交性を利用
して受信側で同一符号をカギとして復号化することで多重分離を行う方式である。多重分離の自由度が
高いこと、非同期のアクセスが可能であること、通信セキュリティの向上が期待できることなどが特長
である。

2. 3 波長分割多重 (WDM) システムの分類

前節では、光ネットワークに適用される5つの多重化技術についてまとめた。これら多重化技術の中
で、波長分割多重 (WDM) は、実用性と広い応用性を持ち、今後も重要な多重化技術となる。ここでは、
光源と波長フィルタの動作モード (固定波長, 可変波長) により、WDM システムを分類する。

WDM システムで使用される光源には、固定波長で使用される固定波長光源とある波長範囲の任意の
1 波長を選択できる可変波長光源がある。また、波長フィルタには、波長多重された光信号から固定の

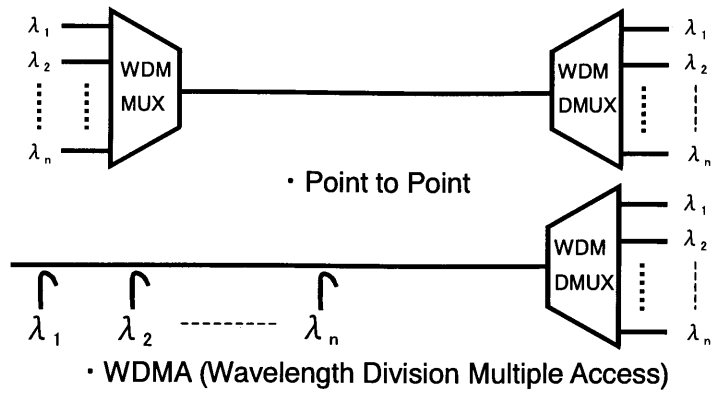
表 2. 1 光源とフィルタから見た波長分割多重 (WDM) システムの分類

Tx (Transmitter)	Rx (Receiver)	System	Number (Demand)
Constant	Constant	Point to Point	160~∞
		WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	16~32
Constant	Variable	Broadcasting (Signal Distribution)	32~256
		WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	16~32
Variable	Constant	Wavelength Label (Wavelength Path)	160~∞
Variable	Variable	DA(Demand Assign)-WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	16~32
—	—	Other Combination System	

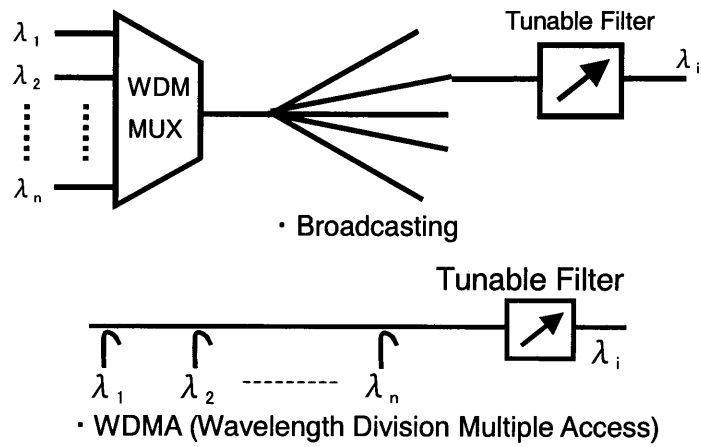
1 波長を、あるいは、複数の波長を同時に分離する固定波長フィルタとある波長範囲の任意の 1 波長を分離できる可変波長フィルタがある。表 2. 1 に、光源と波長フィルタの動作モード（固定波長、可変波長）による WDM システムの分類を示す。表 2. 1 では、WDM システムを補完する WDM 以外の技術を用いたシステムを含めて、WDM システムを 5 つに分類した。また、分類に基づく代表的システムを図 2. 2 にまとめた。

第 1 番目に分類されるのは、固定波長光源と固定波長フィルタを用いた WDM システムである。適用される代表的システムとして、図 2. 2 (a) に示す様なポイント・ツー・ポイント (1 対 1) の伝送と複数のノードから送信される信号をセントラルオフィスで受信する波長分割多重マルチアクセス (WDMA: Wavelength Division Multiple Access) が考えられる。ポイント・ツー・ポイント (1 対 1) の伝送では、WDM を用いることにより 1 本の光ファイバで複数の信号を同時に伝送することができる。伝送効率を高めたい場合や既設の光ファイバ通信システムの伝送容量を増やしたい場合などに用いられる。現在では、32 波長から多いものでは 160 波長の WDM 伝送が実現されている。波長分割多重マルチアクセス (WDMA) では、各ノードに特定の波長が割当てられ、セントラルオフィスに伝送されるまでに波長多重される。WDM を用いることにより、光ファイバの敷設コストを削減できる。セントラルオフィスでは、WDM-DMUX (WDM Demultiplexer)により全ての波長が分離された後、各ノードからの信号がそれぞれ受信される。加入者系等での使用を考えると 16 波長から 32 波長以上の WDM チャンネル数が確保できれば有効と考えられる。

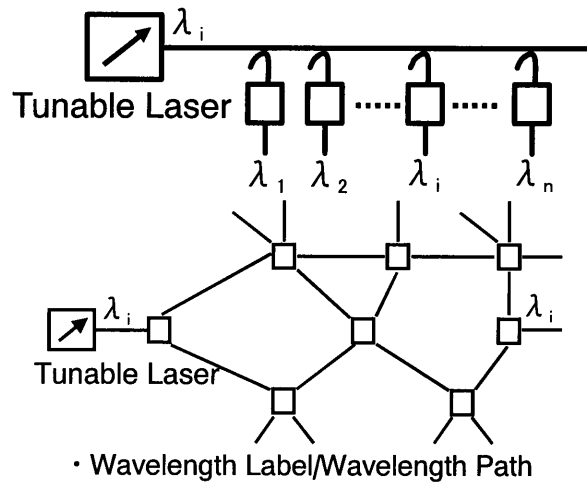
第 2 番目に分類されるのは、固定波長光源と可変波長フィルタを用いた WDM システムである。適用される代表的システムとして、図 2. 2 (b) に示す様な信号分配ネットワークや複数のノードからの信号を選択的に受信する波長分割多重マルチアクセス (WDMA: Wavelength Division Multiple Access) が考えられる。信号分配ネットワークでは、波長多重した信号を複数のノードに分配し、各ノードで多重された信号から必要な信号を可変波長フィルタにより選択的に受信する。要求される波長チャンネル数は、アプリケーションに依存するが、32~256 チャンネル程度が必要とされる。波長分割多重マルチアク



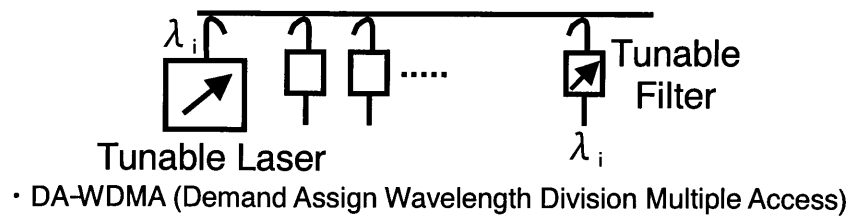
(a) Tx: Constant/Rx: Constant



(b) Tx: Constant/Rx: Variable



(c) Tx: Variable/Rx: Constant



(d) Tx: Variable/Rx: Variable

図 2. 2 波長分割多重 (WDM) システムの分類

セス (WDMA) では、各ノードに特定の波長が割当てられ、セントラルオフィスに伝送されるまでに波長多重される。WDM を用いることにより、光ファイバの敷設コストを削減できる。セントラルオフィスでは、可変波長フィルタにより各ノードからの信号を選択的に受信する。加入者系等での使用を考えると 16 波長から 32 波長以上の WDM チャンネル数が確保できれば有効と考えられる。

第 3 番目に分類されるのは、可変波長光源と固定波長フィルタを用いた WDM システムである。適用される代表的システムとして、図 2. 2 (c) に示す様な波長ラベル (波長アドレス) が考えられる。図 2. 2 (c) の上側の図は、バス型のトポロジーの例である。1 番目のノードでは、伝送路から波長 λ_i の信号のみをドロップする。送信ノードでは、可変波長レーザを波長 λ_i にチューニングし、送信することにより、宛先のノードに信号を伝送することができる。図 2. 2 (c) の下側の図は、メッシュ型のトポロジーの例である。1 番目のノードは、波長 λ_i にアドレスされている。送信ノードでは、可変波長レーザを波長 λ_i にチューニングし、信号を送信する。メッシュ上の各ノードでは、波長ラベルを参照して、波長 λ_i にラベルされた信号を 1 番目のノードへルーティングする。ラベル数としては多い方が望ましいが、波長を再利用することで、16 波長から 32 波長以上の WDM チャンネル数が確保できれば有効と考えられる。また、波長変換[9]による波長再利用も検討されている。

第 4 番目に分類されるのは、可変波長光源と可変波長フィルタを用いた WDM システムである。適用される代表的システムとして、図 2. 2 (d) に示す様な DA-WDMA (Demand Assign Wavelength Division Multiple Access) システムが考えられる。i 番目のノードから j 番目のノードへのトラフィック要求が生じると、両ノード間の通信に波長 λ_i が割付けられる。送信ノードでは、可変波長レーザを波長 λ_i にチューニングし、信号を送信する。受信ノードでは、可変波長フィルタを波長 λ_i にチューニングし、信号を受信する。DA-WDMA を用いたシステムでは、少ない波長を有効に利用することができるので、経済的なシステムの構築が可能になる。LAN (Local Area Network) 等での使用を考えると 16 波長から 32 波長以上の WDM チャンネル数が確保できれば有効と考えられる。

第 5 番目に分類されるのは、時分割多重 (TDM)、空間分割多重 (SDM)、サブキャリア (副搬送波) 多重 (SCM)、光符号分割多重 (OCDM) などの波長分割多重 (WDM) 以外の多重化技術を用いたシステムである。これらの多重化技術は、波長分割多重 (WDM) と併用されてシステムを構成したり、波長分割多重 (WDM) を補完するシステムを構成したりする。

2. 4 波長分割多重 (WDM) 用光源とフィルタ

本節では、最初に、代表的な波長分割多重 (WDM) 用光源とフィルタについてまとめる。次に、WDM システムにおいて、光フィルタに要求される特性について検討する。

2. 4. 1 波長分割多重 (WDM) 用光源

前節の波長分割多重 (WDM) システムの分類に用いた様に、波長分割多重 (WDM) 用光源は、固定波長レーザと可変波長レーザに分類される。ここでは、それぞれの代表的レーザについてまとめる。表 2. 2 には、以下で述べる可変波長レーザをまとめる。

表 2. 2 代表的可変波長光源と波長可変範囲

Wavelength Tunable Laser	Tuning Range
DFB Laser	3～6nm
DFB Laser Array	～15nm
3-Section DFB Laser	～2.2nm
DBR Laser	～15nm
SSG-DBR Laser	～25nm
GCSR Laser	～125nm
MEMS External Cavity Laser	3～40nm
MEM-VCSEL	～50nm

(1) 固定波長レーザ

(A) DFB レーザ[10, 11]

波長分割多重 (WDM) システムに用いられる代表的固定波長レーザは、DFB (Distributed Feedback)レーザである。図 2. 3 (a) に、代表的な DFB レーザである埋め込み型長波長半導体レーザの構造を示す。コアとなる活性層の近傍にグレーティングが形成され、このグレーティングがレーザ共振器を構成するとともに、その波長選択性により縦単一モード発振を実現している。このレーザの場合は、埋め込みによる三次元導波路構造を持ち、これにより横単一モード発振を実現している。長波長半導体レーザは、約 0.1nm/K の波長温度依存性と約 0.01nm/mA の波長電流依存性を持つ。波長分割多重 (WDM) システムに導入された当初は、波長の経年変化の問題から光学共振器などを用いて波長安定化を行うことが検討されたが、現在では、50GHz～100GHz 波長間隔の WDM システムでは、温度と電流を安定化するオープンループ制御でも必要な安定度が得られることが確認されている。通常、一つのウエハから数 nm の波長範囲の半導体レーザチップが得られる。一つのウエハで広い波長範囲の半導体レーザチップを製造する技術も検討されている。

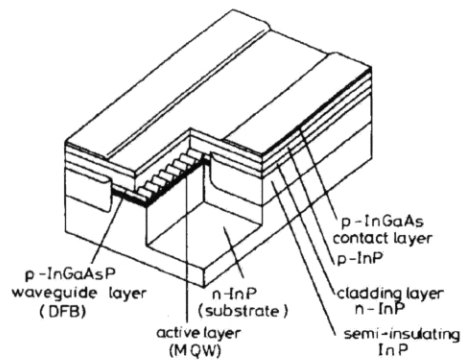
(2) 可変波長レーザ[12-14]

(A) DFB レーザ

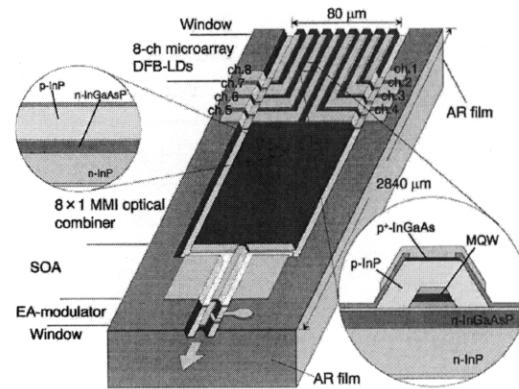
DFB レーザは、代表的固定波長レーザであるが、先に述べた様に長波長半導体レーザの場合、約 0.1nm/K の波長温度依存性と約 0.01nm/mA の波長電流依存性を持つ。したがって、温度と電流を制御することにより、数 nm の可変範囲を持つ可変波長レーザとして使用することができる (図 2. 3 (a))。

(B) DFB レーザアレイ[15, 16]

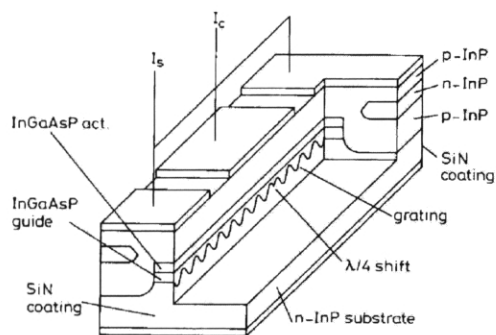
異なる波長の複数の DFB レーザをアレイ化し、光合波器や光増幅器とモノリシックに集積化した可変波長レーザが研究されている。波長可変動作は、駆動素子の切換えと素子温度の制御の組



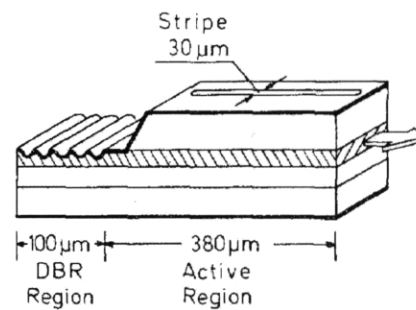
(a) DFB (Distributed Feedback) Laser



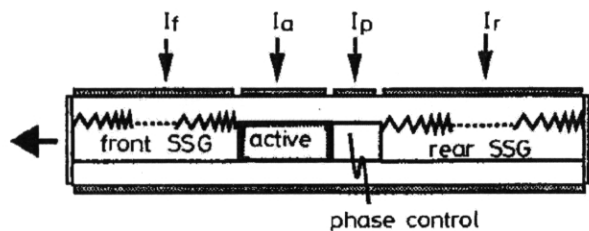
(b) DFB Laser Array



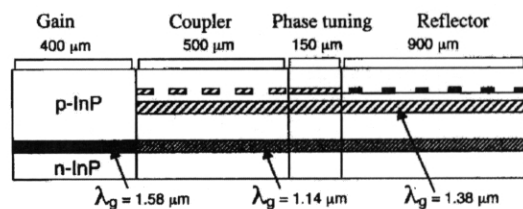
(c) 3-Section DFB Laser



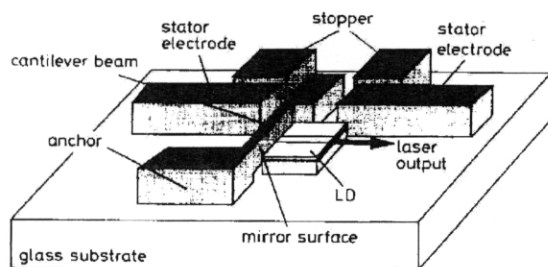
(d) DBR (Distributed Bragg Reflector) Laser



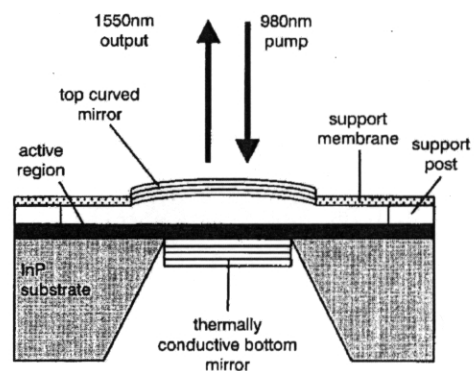
(e) SSG (Super-Structure Grating)-DBR



(f) GCSR Laser



(g) 外部共振器集積レーザ



(h) MEM-VCSEL Laser

図 2. 3 波長多重 (WDM) システムに用いられる光源

合せにより実現する。光合波器により、通常の半導体レーザと同じ様に射出口を一ヶ所にすることができ、従来のモジュール技術が適用できる。また、光増幅器を集積することにより、光合波器の損失を補償することができるので、従来の半導体レーザと同等の光出力レベルが得られる。図 2. 3 (b) は、8 個の DFB レーザを集積した例である。一つの DFB レーザで約 3nm の可変範囲を持ち、全体で約 15nm の可変範囲となる。

(C) 3 電極 DFB レーザ[17]

結合係数の比較的大きい DFB レーザでは、光強度が共振器の中央部に集中するため、空間的ホールバーニングが生じる。中央の電極の電流を増すことで、空間的ホールバーニングを補償し、閾値電流密度を低下させる。このキャリア密度の減少は、屈折率を高くし、これにより、発振波長を長くすることができる。図 2. 3 (c) に 3 電極 (3-Section) DFB レーザの構造を示す。1.2mm の比較的大きな共振器により、スペクトル線幅が狭窄化される。2.2nm の可変幅全体で 20mW 以上の出力と 1MHz 以下のスペクトル線幅が得られている。

(D) DBR レーザ[18]

DBR (Distributed Bragg Reflector)レーザは、活性領域と波長選択性を持った DBR 領域から構成される (図 2. 3 (d))。DBR 領域のキャリア密度を変化させることにより屈折率が変化し、DBR 領域のフィルタ特性を制御することができる。これにより、発振波長を可変することができる。この屈折率変化の応答速度は、キャリア寿命で決まり、1ns 程度である。キャリア密度の変化による屈折率変化は 1%程度であり、得られる可変範囲は、15nm 程度となる。

(E) SSG-DBR レーザ[19]

SSG (Super-Structure Grating)-DBR レーザは、広帯域可変波長 DBR レーザの一種であり、基本構造は、活性領域の両側に DBR 領域を持った DFB レーザである。図 2. 3 (e) に SSG-DBR レーザの構造を示す。回折格子は、ピッチが周期的に変化する超周期構造のチャープ回折格子である。これにより、複数の鋭いピークを持った反射特性が得られる。この両側の DBR 領域の鋭い反射ピークの間隔は、僅かに異なるため、重なり合う特定ピーク波長で発振が得られる。この状態で、前後のピーク波長を僅かにずらすと、重なり合う特定ピーク波長がずれることにより、発振波長が変化する。この波長変化は、バーニア効果により、屈折率変化に対して、大きな変化となる。二つの DBR 領域と位相調整領域のチューニングで 100GHz 間隔 32 波長 (約 25nm) を発振させた報告がある。

(F) GCSR レーザ[20]

図 2. 3 (f) に GCSR (Vertical Grating Assisted Codirectional Coupler Laser with a Super Structure Grating Distributed Bragg Reflector)レーザの構造を示す。GCSR レーザは、活性領域、粗調用の 15 μ m 周期の回折格子を持つ結合領域、連続チューニングを可能にする位相調整領域、DBR 領域から構成される。活性領域からの発光は、下側の導波路を通り、波長選択性のある結合領域で上側の導波路へ結合され、DBR 領域で反射される。DBR 領域の下側の導波路は、不要な波長成分のフィードバックを避けるために、2次元導波路化することにより無反射化している。

チャープ回折格子により 125nm 以上の広い波長範囲に渡るくし状の反射ピークが得られる。これにより、100nm の可変幅において、20 波長の安定な発振を実現した。

(G) 外部共振器集積レーザ[21]

MEMS (Micro Electro Mechanical System)を用いた外部共振器集積半導体レーザが研究されている。外部共振器半導体レーザには、広い可変範囲、狭スペクトル線幅が得られる可能性があり、期待されている。図 2. 3 (g) に外部共振器半導体レーザの構造を示す。Si マイクロマシン技術により作成された外部ミラーと半導体レーザをガラス基板上に集積している。外部ミラーと半導体レーザの間隔を 0~0.5 μ m の間で連続的に可変できる。この外部共振器半導体レーザは、850nm 付近で、3nm の波長可変範囲であったが、原理的にはより広い波長可変範囲が得られることが期待できる。

(H) MEM-VCSEL[22]

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)に MEMS (Micro Electro Mechanical System)を用いた外部ミラーを集積した MEM-VCSEL (Micro-Electromechanical Tunable Vertical Cavity Surface Emitting Laser)が研究されている。図 2. 3 (h) に MEM-VCSEL の構造を示す。底面と上面のミラーで共振器を構成する。底面のミラーと上部の梁(膜)の間に電圧を印加することにより共振器間隔を変えることで、発振波長を可変する。39V の印加電圧に対して 50nm の連続的波長可変が実現されている。

2. 4. 2 波長分割多重 (WDM) 用フィルタ

前節の波長分割多重 (WDM) システムの分類に用いた様に、波長分割多重 (WDM) に用いられる波長フィルタは、固定波長フィルタと可変波長フィルタに分類される。ここでは、それぞれの代表的波長フィルタについてまとめる。表 2. 3 には、以下で述べる可変波長フィルタをまとめる。

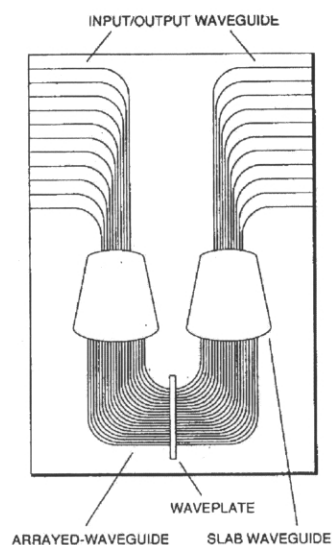
表 2. 3 代表的可変波長フィルタと波長可変範囲

Wavelength Tunable Filter	FWHM	Tuning Range	Tuning Time
Dielectric Thin Film (Rotation Type, Linear Type)	0.3~0.4nm	10~50nm	10~30ms
Piezo Actuator Fabry-Perot Filter	0.3nm	10~40nm	~10 μ s
MEMS Fabry-Perot Filter	0.5nm	10~40nm	~10 μ s
PSC DFB Filter	~0.1nm	~1nm	~2.5ns
Semiconductor Fabry-Perot Filter		~2.5nm	
FBG (SMA Coil)		1.2nm	
FBG (Ni Heater)		0.14nm	~10ns
AO Filter	~1nm	>40nm	several μ s

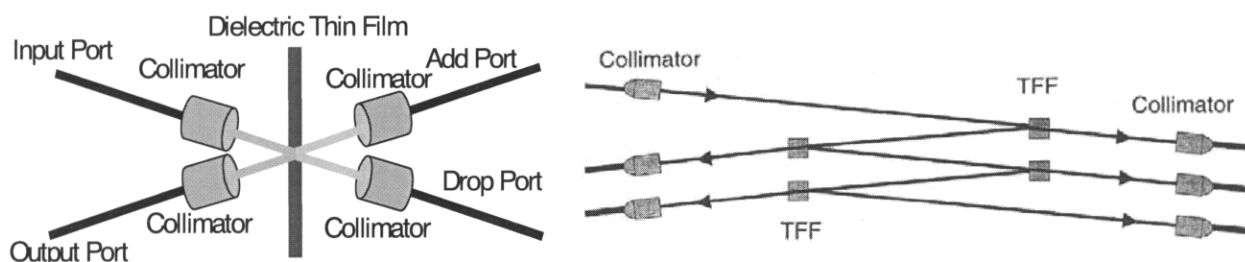
(1) 固定波長フィルタ

(A) AWG[23-25]

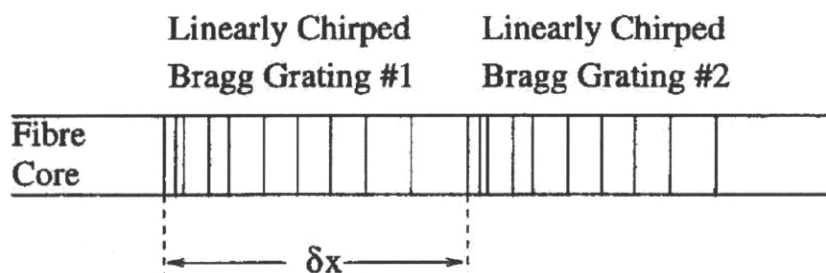
近年、光ファイバ製造技術と LSI 製造技術を組合せることによりシリコン基板上に石英系ガラスの光導波路を形成する技術が発達した。AWG (Arrayed Waveguide Grating)は、回折格子と同じ分光機能をアレイ導波路により実現したデバイスである。図 2. 4 (a) に示す様に、AWG は、数本の入出力導波路と長さの異なる複数のアレイ導波路、および両者を接続する扇状のスラブ(2次元)導波路から構成される。入力導波路に入射された光は、入力側スラブ導波路において回折により広がり、アレイ導波路を形成する複数の導波路を同位相で励振する。アレイ導波路は、その長さが一定値ずつ異なるので、伝搬した光は、出力側スラブ導波路において、位相条件が成立する特定の方向の出力導波路に結合する。したがって、入力導波路に異なる波長が多重さ



(a) AWG (Arrayed Waveguide Grating)



(b) 誘電体フィルタ



(c) FBG (Fiber Bragg Grating)フィルタ

図 2. 4 波長多重 (WDM) システムに用いられる固定波長フィルタ

れた光を入射すると、波長ごとに分波された光を出力導波路から取り出すことができ、波長フィルタ（波長 DMUX）として機能する。逆に、各出力導波路から対応する波長の光を入射させれば、入力導波路の一つから多重化された光を取りだせる。この様に、AWG は、波長 MUX としても機能し、(3dB) 光カップラで構成する波長 MUX よりも損失が少ない特長がある。石英系ガラス導波路は、屈折率温度依存性を持つため、AWG モジュールには、基板全体の温度を安定化するためのヒータあるいは、ペルチェ素子が内蔵される。モジュールの大きさは、数十 mm 程度である。16~80 波長の WDM に対応したデバイスが製作されている。

(B) 誘電体多層膜フィルタ[26]

誘電体多層膜フィルタも WDM システムにおいて広く波長フィルタとして用いられてきた。図 2. 4 (b) に誘電体多層膜フィルタを用いた 4 ポートの Add/Drop フィルタと多ポートの波長 DMUX の構造を示す。Add/Drop フィルタの場合、入力ポート、出力ポート、Add ポート、Drop ポートの 4 つのポートから構成される。入力光は、入力ポートのコリメータレンズで平面波に変換され、誘電体多層膜フィルタへ入射される。誘電体多層膜フィルタでは、入射光の特定の波長を透過し、残る波長を反射する。透過光は、コリメータレンズで集光され、Drop ポートへ出力される。Drop ポートへ出力されるのと同じ特定波長の光が Add ポートへ入力されると、コリメータレンズで平面波に変換され、誘電体多層膜フィルタを透過し、反射光と合波されてコリメータレンズで集光され、出力ポートへ出力される。したがって、入力された波長多重光から特定の波長を Add/Drop することができる。多ポートの波長 DMUX は、入力ポート、出力ポート、Drop ポートで構成される Drop フィルタを多段に接続した構造で、各段の透過波長の異なる誘電体多層膜フィルタにより、順次特定波長が分離され、各段毎の出力ポートに出力される。この様に、誘電体多層膜フィルタは、多段化することで波長チャネル数を増やすことができる。多段化した場合は、挿入損失の低減が課題となる。モジュールの大きさは、数十 mm 程度である。現在、0.8nm (100GHz) 間隔の WDM システムに対応可能な半値幅を持つ誘電体多層膜フィルタが作製されている。

(C) FBG フィルタ[27]

図 2. 4 (c) に FBG (Fiber Bragg Grating)を用いたファブリペローフィルタの構造を示す。B/Ge をドープした光ファイバをアルゴンレーザで干渉露光することにより、光ファイバ内の 2 ヶ所に回折格子を形成して、ファブリペローフィルタ (Fabry-Perot Filter) を構成する。回折格子をチャープ回折格子とすることで広帯域化している。フィネス (Finesse) 1.6, 自由スペクトル間隔 (FSR: Free Spectral Range) 1.6nm のファブリペローフィルタが試作されている。

(2) 可変波長フィルタ[28, 29]

(A) 誘電体多層膜フィルタ

機械的稼働部を持つ誘電体多層膜フィルタが可変波長フィルタとして用いられている。近年、誘電体多層膜フィルタの設計、製造技術が向上し、従来実現できなかった 0.8nm (100GHz)間隔の DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)システムに使用可能な狭半値幅の帯域透過フィルタが製作できるようになった。誘電体多層膜フィルタを用いた可変波長フィルタの代表的な

ものに、回転型と直線変位型がある。いずれの場合も 16~40 波長の WDM システムに対応できる可変波長フィルタが製作されている。モジュールの大きさは、数十 mm 程度である。また、いずれの場合も機械的稼動をとまなうため、波長可変速度は、数十 ms となる。以下に両者の構造について説明する。

●回転型

図 2. 5 (a) の回転型において、入射光は、コリメータレンズで平面波に変換され、帯域透過特性を持つ誘電体多層膜フィルタに入射される。透過光はコリメータレンズで集光され、出力側光ファイバへ結合される。誘電体多層膜フィルタの透過波長は、入射角に依存するので、誘電体多層膜フィルタを回転させることにより、透過波長を可変することができる。回転型の場合、挿入損失の偏光依存性、角度依存性を小さくすることが重要になる。

●直線変位型

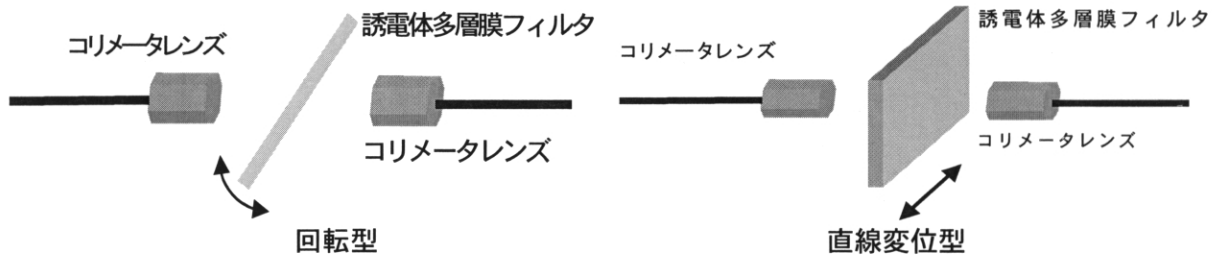
図 2. 5 (a) の直線変位型において、入射光は、コリメータレンズで平面波に変換され、帯域透過特性を持つ誘電体多層膜フィルタに入射される。透過光はコリメータレンズで集光され、出力側光ファイバへ結合される。誘電体多層膜フィルタは、基板面内で透過波長が連続的に変化する様に作製されていて、誘電体多層膜フィルタを直線的に移動することにより、透過波長を可変することができる。直線変位型の場合、入射光を誘電体多層膜フィルタへ垂直に入射することができるので、挿入損失の偏光依存性、波長依存性を小さくすることができる。

(B) ファブリペローフィルタ

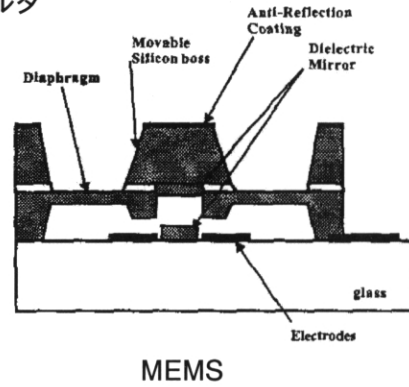
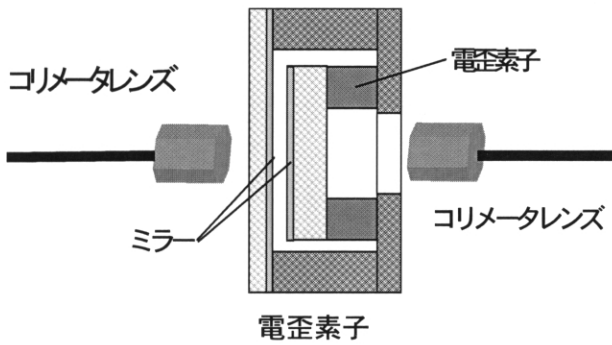
ファブリペローフィルタの共振器（ミラー）間隔を稼動することにより、透過波長を可変することができる。ファブリペローフィルタは、等周波数間隔の透過ピークを持ち、その間隔を自由スペクトル間隔（FSR: Free Spectral Range）と呼ぶ。通常の WDM システムで使用する場合、可変波長フィルタは、多重された複数の波長から一波長のみを抽出するために使用される。この場合、自由スペクトル間隔（Free Spectral Range）は、使用する波長帯域よりも広くなければならない。このためには、共振器（ミラー）間隔を狭くする必要がある。ファブリペローフィルタを用いた可変波長フィルタの代表的なものに、電歪素子を用いたものと MEMS (Micro Electro Mechanical System)を用いたものがある。以下に両者の構造について説明する。

●電歪素子を用いたファブリペロー可変波長フィルタ

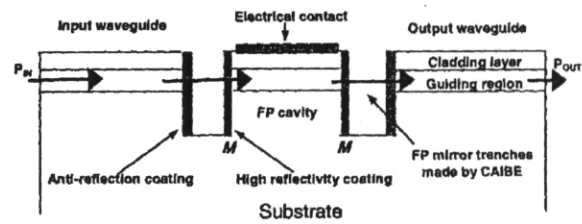
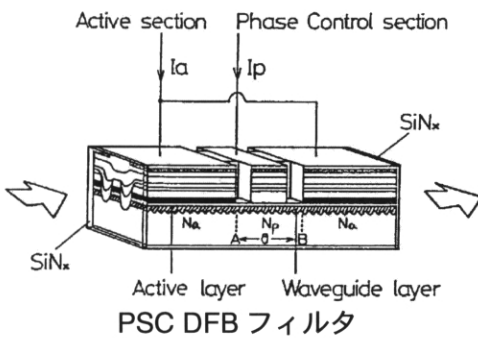
図 2. 5 (b) 左図は、電歪素子を用いた可変波長フィルタである。入射光は、コリメータレンズで平面波に変換され、誘電体多層膜により形成された対向する 2 つのミラーを経て、コリメータレンズで集光され、出力側の光ファイバに結合される。この対向する 2 つのミラーがファブリペロー共振器を構成し、片方のミラーが電歪素子により稼動することにより、共振器間隔が制御され透過波長が可変される。可変域全体で半値幅などのフィルタ特性を確保するためには、2 つのミラーの平行度が保たれる必要がある。自由スペクトル間隔 40nm 以上、半値全幅 0.3nm 以下の可変波長フィルタが製作されている。モジュールの大きさは、数十 mm 程度である。また、波長可変速度は、数 μ s となる。



(a) 誘電体フィルタ

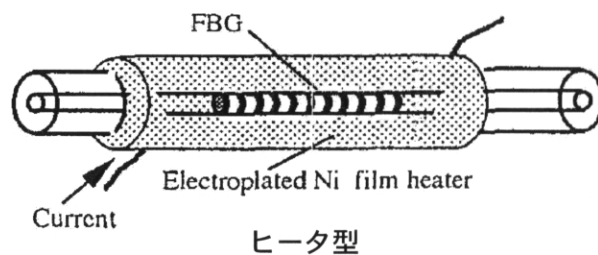
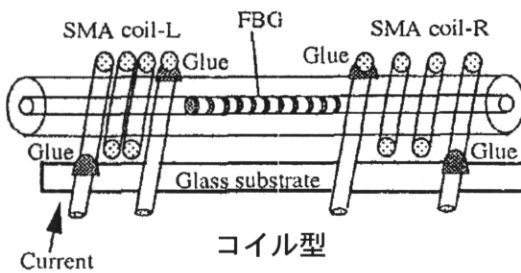


(b) ファブリペローフィルタ

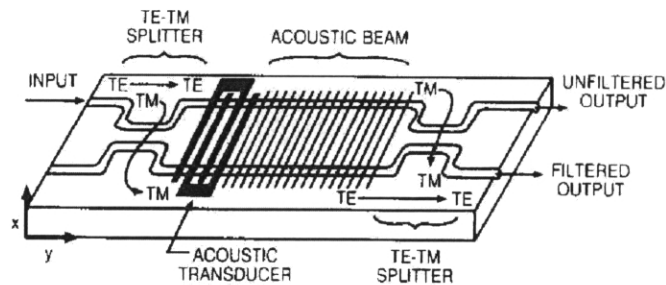


半導体ファブリペローフィルタ

(c) 半導体フィルタ



(d) FBG (Fiber Bragg Grating) フィルタ



(e) AO (Acousto-Optic) フィルタ

図 2. 5 波長多重 (WDM) システムに用いられる可変波長フィルタ

●MEMS を用いたファブリペロー可変波長フィルタ[30]

図 2. 5 (b) 右図は、MEMS (Micro Electro Mechanical System)を用いた可変波長フィルタである。MEMS は、微細加工技術を用いて製作された稼動部を持つデバイスである。同 MEMS フィルタでは、ガラス基板上に作製された固定ミラーとその上部の SOI ウエハに形成された稼動ミラーによりファブリペロー共振器が構成される。共振器間隔は、ミラーに隣接して形成されている電極に印加される電圧によって生じる静電力により可変される。自由スペクトル間隔 35nm 以上、半値幅 0.5nm 以下の可変波長フィルタが製作されている。チップの大きさは、6.2X7.2mm である。また、波長可変速度は、数 μ s となる。

(C) 半導体フィルタ (PSC DFB, ファブリペロー)

半導体可変波長フィルタについては、いくつかの試みがなされている。LD (Laser Diode)や PD (Photodiode)などの他の半導体デバイスとの集積化が容易であることに特長がある。一般的に、フィルタ特性は得やすいが、波長可変幅を広く取ることが難しい。ここでは、PSC (Phase-shift-controlled) DFB フィルタと半導体ファブリペローフィルタを紹介する。

●PSC DFB フィルタ[31]

図 2. 5 (c) 左図に、PSC (Phase-shift-controlled) DFB フィルタの構造を示す。位相制御領域が二つの活性領域に挟まれた構造となっている。位相制御領域は、大きな実効屈折率変化を得るために利得を持たない。活性領域の長さは、それぞれ 200 μ m、位相制御領域の長さは、100 μ m であり、チップ全体の長さは、500 μ m である。横モードの制御と電流狭窄のために DC-PBH (Double-Channel Planar Buried Heterostructure)構造を採用している。位相制御領域と活性領域の電流を制御することにより、120GHz (0.95nm)の可変範囲に渡って、24.5dB の利得と 12~13GHz の 10dB 帯域幅が得られている。自然放光のレベルは、透過光に対して 15dB 以上低いレベルにある。また、約 2.5ns の高速な波長可変が可能である。

●半導体ファブリペローフィルタ[32]

図 2. 5 (c) 右図に、導波路型半導体ファブリペローフィルタの構造を示す。InP 系の半導体導波路上に、CAIBE (Chemically-Assisted Ion-Beam Etching)によりギャップを作製し、端面に誘電体高反射膜を施すことにより 2 つのミラー形成し、ファブリペロー共振器とする。また、入出力側の導波路端面には無反射膜を施し、複合共振器とならない様にしている。基板面とファブリペロー共振器領域上部に電極を形成し、電流を制御することにより、透過波長を可変できる。試作したデバイスの素子長は、1mm で、自由スペクトル間隔 (FSR) 9nm, 消光比 12dB であった。また、30mA の電流変化に対して、透過波長の可変幅は、2.5nm であった。約 10ns の高速な波長可変が可能である。

(D) FBG フィルタ[33]

図 2. 5 (d) に FBG (Fiber Bragg Grating)を用いた可変波長フィルタを示す。左図は、SMA (Surface Memory Alloy)コイルを用いた可変波長フィルタである。2 つのコイルを稼動機構として用いている。光ファイバ内の FBG 部がコイル内に置かれる。FBG の両端は、SMA コイルに固定さ

れる。SMA コイルの端は、ガラス基板に固定される。SMA コイルには、60℃で記録された形状に戻る性質がある。同図において、SMA コイルは、最初に伸びた状態にある。SMA コイルは、電流を流すことにより記録された形状に戻る。これにより FBG 部が伸ばされる。500mW (2V-0.25A) に対して、反射波長を 1.2nm 可変させることができる。

図 2. 5 (d) 右図は、50 μ m、長さ 20mm の Ni 薄膜を FBG 領域に電気メッキしたものである。下地として Au メッキを用いている。これにより FBG 領域を直接加熱することができる。これにより、反射波長を 0.4nm/W で変化させることができる。350mW で 0.14nm の可変幅が得られた。

(E) AO フィルタ[34, 35]

AO (Acousto-Optic) フィルタは、LiNbO₃ 導波路上での光と音響波（表面弾性波）の相互作用を利用している。LiNbO₃ 導波路上では、位相整合条件を満足する特定の波長のみについて、TE/TM モード変換が起こる。したがって、入力光を TE モードに制限し、TM モードに変換された光のみを取り出せば、波長フィルタとなる。このとき、表面弾性波の周波数を変化させることにより、TE/TM モード変換が起こる光波長を変化させることができるので、可変波長フィルタを実現できる。図 2. 5 (e) は、入出力部に導波路型のモードスプリッタを配置することにより偏光無依存化したダイバーシティ型の AO フィルタである。表面弾性波の周波数は、広範囲に可変することができるので、1.3~1.6 μ m に渡る可変波長フィルタが実現できる。音響波導波路により音響波の強度分布に重み付けをすることにより、1nm 程度の半値全幅（FWHM: Full Width Half Maximum）が得られている。また、波長可変速度は、弾性表面波の速度と相互作用長により決まり、数 μ s である。

2. 4. 3 波長分割多重（WDM）システムにおける波長フィルタ所要特性

ここでは、波長分割多重（WDM）システムにおいて、波長フィルタに要求される特性について検討する。

最初に、波長フィルタの透過特性と WDM 波長チャネル間隔の関係を検討する。ここでは、簡単のために、波長フィルタの透過特性をローレンツ関数で近似する。図 2. 6 は、ローレンツ関数で近似した波長フィルタの透過特性である。横軸は、波長フィルタの半値全幅（FWHM） $\Delta \lambda_F$ で正規化した透過波長ピークからの波長である。第 4 章のアイパターンシミュレーションにより、約 2Gb/s の伝送速度において、WDM のクロストークによるパワーペナルティを 1dB 以下にするためには、隣接波長の抑圧比を約 13dB 以上にする必要がある。このためには、WDM 波長間隔は、 $2.2 \Delta \lambda_F$ 以上である必要がある。固定波長レーザと固定波長フィルタを用いるシステムの場合、レーザの波長と波長フィルタの透過波長ピークを完全に一致させることは困難なため、約 1dB のマージンを確保すると WDM 波長間隔は、 $2.5 \Delta \lambda_F$ 以上である必要がある。このとき波長間隔の 10%にあたる $0.25 \Delta \lambda_F$ レーザ波長と波長フィルタの透過波長ピークがずれたとしても、隣接波長の抑圧比は、13dB 以上となる。また、レーザ波長と波長フィルタの透過波長ピークが $0.25 \Delta \lambda_F$ ずれたときの透過損失の増加は、約 1dB である。WDM システムにおいては、レーザ波長と波長フィルタの透過波長ピークの相対誤差が波長間隔の 10%以下である

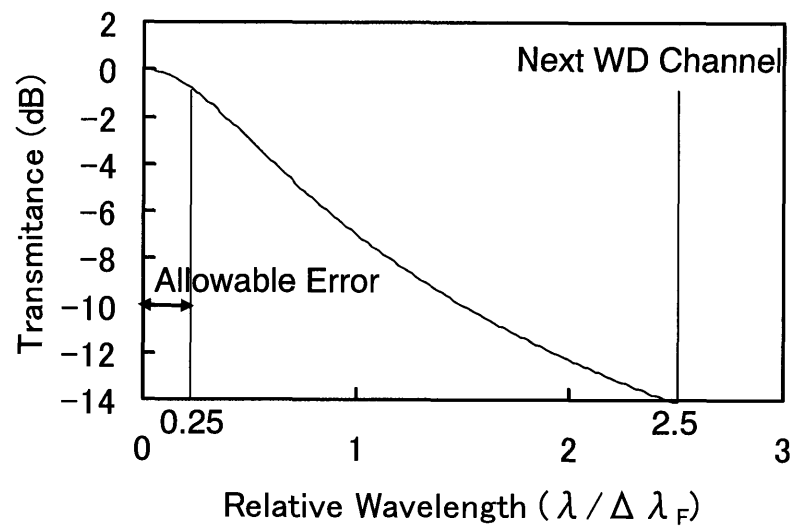


図 2. 6 ローレンツ型透過特性

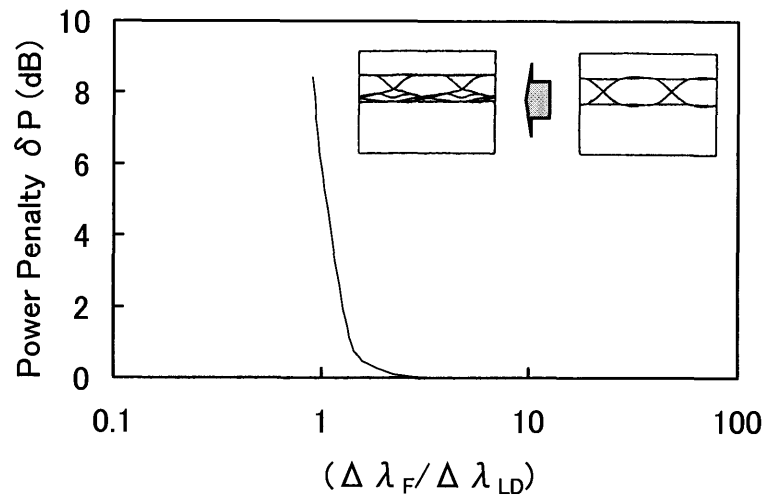


図 2. 7 波長フィルタによる波形劣化のパワーペナルティ

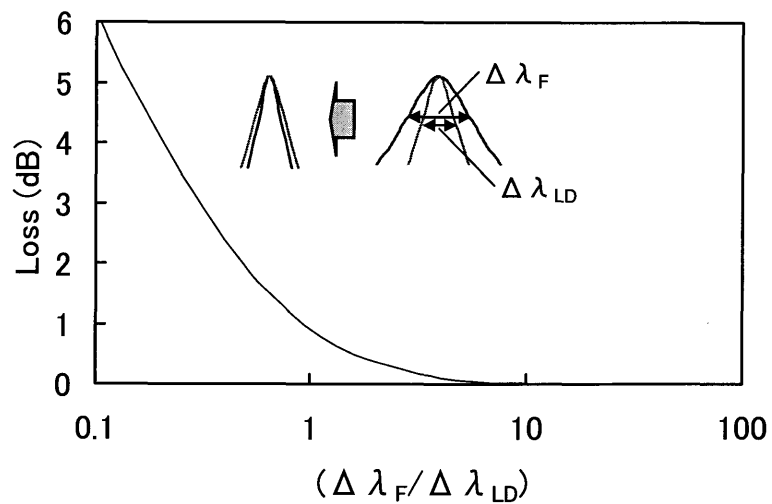


図 2. 8 波長フィルタによる光パワー損失

必要がある。

一方、波長フィルタによる帯域制限は、受光特性に対して、(1) 送信光源のスペクトルが波長フィルタにより削られることによる波形劣化のパワーペナルティ、(2) 送信光源のスペクトルが波長フィルタにより、削られることによる光パワー損失の二つの影響を及ぼすと考えられる。

図 2. 7 は、第 4 章のアイパターンシミュレーションと同様な方法により、波長フィルタの半値全幅 (FWHM) $\Delta \lambda_F$ と送信光源の半値全幅 (FWHM) $\Delta \lambda_{LD}$ の比に対する送信光源のスペクトルが波長フィルタにより削られることによる波形劣化のパワーペナルティ δP をアイ開口劣化により求めたものである[36]。 $\Delta \lambda_F / \Delta \lambda_{LD} < 2$ の領域で急激にパワーペナルティ δP が大きくなることが分かる。

図 2. 8 は送信光源のスペクトルが波長フィルタにより、削られることによる光パワー損失 δL を、波長フィルタの半値全幅 (FWHM) $\Delta \lambda_F$ と送信光源の半値全幅 (FWHM) $\Delta \lambda_{LD}$ の比に対して求めたものである。光パワー損失 δL が 1dB 以下であるためには、 $\Delta \lambda_F / \Delta \lambda_{LD} > 3$ である必要がある。

以上の結果より、波長フィルタの帯域制限によるシステム設計上の影響を考慮すると、 $\Delta \lambda_F / \Delta \lambda_{LD} > 3 \sim 4$ がシステム設計上の指針となる。

2. 4. 4 光源と波長フィルタの波長分割多重 (WDM) システムへの適用要件

本節では、代表的な波長分割多重 (WDM) 用光源とフィルタについてまとめた。また、前節では、光源とフィルタの動作モード (固定波長, 可変波長) により、WDM システムを分類し、各システムに要求される波長チャネル数について述べた。使用可能な波長チャネル数は、単純に言えば多い方が良いが、より多くの波長チャネル数を確保できる技術、デバイスは、より高価でもある。システム側では、現状のデバイス (光源、フィルタ) を使いこなして、必要とされるシステムを構築することが課題となる。デバイス側では、低価格のデバイスでより多くの波長チャネルが利用できる様にすることが、あるいは、システム側が要求するデバイスを適切な価格で提供することが課題となる。特に、可変波長フィルタが低価格で供給されれば、WDM システムの適用範囲がより広がり、WDM システムがより普及するものと考えられる。

また、可変波長光源および可変波長フィルタにおいては、適用するシステムにも依存するが、波長切換え時間が重要になる。波長切換え時間も短ければ短いほど良いが、より短い波長切換え時間を確保できる技術、デバイスは、より高価でもある。回線交換的なシステムでは、短い波長切換え時間を要求されることは、比較的少ないと考えられが、パケット交換的なシステムでは、比較的短い波長切換え時間を要求される。通常は、パケット長に対して数%のカード時間を設けることにより、システムのデバイスに対する波長切換え時間の仕様が緩和している。半導体レーザの場合、波長可変範囲にもよるが、波長切換え時間は、数 ns～数 μ s である。可変波長フィルタの場合、波長切換え時間は動作原理に依存し、表 2. 3 に示す様に、数 ns～数十 ms の範囲に及ぶ。

前節の WDM システムの分類において、固定波長光源と固定波長フィルタの組合せに分類されるポイント・ツー・ポイントには、光源として DFB レーザが、波長 MUX, DMUX (波長フィルタ) として AWG が用いられる。現状では、多重度の多いもので、160 波長多重のシステムが実現されている。同じく固定波長光源と固定波長フィルタの組合せに分類される WDMA システムにも、光源として DFB レーザが、

波長 DEMUX (波長フィルタ) として AWG が用いられる。加入者系や LAN などへの応用で必要とされる 16~32 波長多重以上の波長多重度を確保できる。

固定波長光源と可変波長フィルタの組合せに分類される信号分配システムには、光源として DFB レーザが、波長 MUX として 3dB カプラを多段に接続したスターカプラが、可変波長フィルタとして、誘電体多層膜フィルタ、ファブリペローフィルタ、AO フィルタなどが用いられる。例えば、第 4 章で述べる放送局向けの映像信号分配光ネットワークでは、 μs オーダで波長切変えが可能な波長フィルタを用いれば、映像信号のブランキング切変えが実現できる。このため、AO フィルタなどの μs オーダでの波長切変えが可能な波長フィルタの商用化が期待される。WDMA (Wavelength Division Multiple Access) システムには、光源として DFB レーザが、波長多重部 (MUX) として 3dB カプラや誘電体多層膜フィルタが、可変波長フィルタとして、誘電体多層膜フィルタ、ファブリペローフィルタ、AO フィルタなどが用いられる。加入者系や LAN などへの応用で必要とされる 16~32 波長多重以上の波長多重度を確保できる。この場合、可変波長フィルタの波長を比較的短い時間で切替えるのであれば、WDMA では無く、TDMA (Time Division Multiple Access) などを用いる方が有利と考えられる。したがって、このシステムは、回線交換的な応用に限定され、可変波長フィルタには、高速な波長切変えは、要求されないと考えられる。

可変波長光源と固定波長フィルタの組合せに分類される波長ラベル (波長アドレス) を用いたシステムには、光源として各種の半導体可変波長レーザが、固定波長フィルタとして、誘電体多層膜フィルタなどが用いられる。このシステムには、大きな波長多重度が期待されるが、現状で得られる波長多重度は、可変波長光源の可変範囲に制限され、十数波長から数十波長程度である。このシステムの場合、回線交換的な応用とパケット交換的な応用の両方が考えられる。パケット交換的な応用の場合、システム性能は、可変波長光源の波長切換え時間の制限を受ける。可変波長光源として、半導体レーザを用いる場合、システム性能は、半導体レーザの波長切換え時間 (数 ns~数 μs) の制限を受ける。第 6 章では、複数の光源と光スイッチを用いることで、半導体レーザを単独で用いる場合の制限を緩和する方法を提案する。

可変波長光源と可変波長フィルタの組合せに分類される DA-WDMA (Demand Assign Wavelength Division Multiple Access) システムには、光源として各種の半導体可変波長レーザが、可変波長フィルタとして、誘電体多層膜フィルタなどが用いられる。現状の DA-WDMA システムに要求される十数波長から数十の波長多重度が得られる。可変波長光源と可変波長フィルタの双方の波長を高速に切替えるシステムも考えられるが、制御が難しくなるため、当面は、第 3 章で提案する様な回線交換的な応用から実用化されるものと考えられる。

WDM システムと光源および波長フィルタの関係を表 2.4 にまとめた。固定波長光源と固定波長フィルタの組合せに分類されるポイント・ツー・ポイントにおいては、約 160 の波長チャネル数が利用可能であり、現状の要求をある程度満足している。今後、光源、フィルタ、その他の技術の向上により、より多くの波長チャネルが利用できるようになることが期待される。固定波長光源と可変波長フィルタの組合せに分類される信号分配システムにおいては、大きなシステムでは、256 近くの波長チャネル数が要求

表 2. 4 波長分割多重 (WDM) システムと光源, 波長フィルタの組合

Tx (Transmitter)	Rx (Receiver)	System	Laser	Filter	WDM Ch. Number	WDM Ch. Number (Demand)	Chapter Number
Constant	Constant	Point to Point	DFB	AWG	160	160 $\sim\infty$	
		WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	DFB	AWG	16 \sim 32	16 \sim 32	
Constant	Variable	Broadcasting (Signal Distribution)	DFB	Dielectric Thin Film, Fabry-Perot, AO	16 \sim 32	32 \sim 256	Chapter 4
		WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	DFB	Dielectric Thin Film, Fabry-Perot, AO	16 \sim 32	16 \sim 32	
Variable	Constant	Wavelength Label (Wavelength Path)	Semiconductor Lasers	Dielectric Thin Film	16 \sim 32 \sim 64	160 $\sim\infty$	Chapter 6
Variable	Variable	DA(Demand Assign)-WDMA	Semiconductor Lasers	Dielectric Thin Film, Fabry-Perot, AO	16 \sim 32	16 \sim 32	Chapter 3
—	—	Other Combination System	—	—	—	—	Chapter 5

される。可変波長フィルタの可変範囲が波長チャネル数の主な制限要因である。可変波長フィルタの性能向上により、より多くの波長チャネルが利用できるようになることが期待される。可変波長光源と固定波長フィルタの組合せに分類される波長ラベル（波長アドレス）システムにおいては、可変波長光源の可変範囲が波長チャネル数の主な制限要因である。可変波長光源の性能向上により、より多くの波長チャネルが利用できるようになることが期待される。

2. 5 結 一本論文で提案するシステムの位置付け

本章では、最初に、光ローカルエリアネットワークに適用される主な多重化技術についてまとめた（表 2. 5）。これら多重化技術の中で、波長分割多重（WDM）は、実用性と広い応用性を持ち、今後重要な多重化技術となる。

次に、光源と波長フィルタの動作モード（固定波長、可変波長）により、WDM システムを分類し、各システムの特長および要求される波長チャネル数について述べた（表 2. 6）。

次に、これら WDM システムに用いられる代表的な（固定波長、可変波長）光源と（固定波長、可変波長）フィルタについてまとめた（表 2. 7, 表 2. 8）。

次に、WDM システムにおいて、波長フィルタに要求される特性について検討した。波長フィルタの透過特性をローレンツ関数で近似し、その半値全幅（FWHM）を $\Delta\lambda_F$ すると、第 4 章のアイパターンシミュレーションの結果より、WDM 波長間隔は、 $2.5\Delta\lambda_F$ 以上である必要がある。また、レーザ波長と波長フィルタの透過波長ピークの相対誤差が波長間隔の 10%以下である必要がある。

一方、送信光源のスペクトルが波長フィルタにより削られることによる波形劣化のパワーペナルティと送信光源のスペクトルが波長フィルタにより削られることによる光パワー損失から、波長フィルタの半値全幅（FWHM） $\Delta\lambda_F$ と光源の半値全幅（FWHM） $\Delta\lambda_{LD}$ 比について、 $\Delta\lambda_F/\Delta\lambda_{LD} > 3\sim 4$ がシステム設計上の指針となることを示した。

更に、分類した WDM システム毎に、適用可能な光源と波長フィルタについて検討し、WDM システムと光源および波長フィルタの関係を表 2. 4 にまとめた。

表 2. 5 光ローカルエリアネットワークに適用される次の主な多重化技術

(A) 時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing)
(B) 空間分割多重 (SDM: Space Division Multiplexing)
(C) 波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing)
(D) サブキャリア (副搬送波) 多重 (SCM: Subcarrier Multiplexing)
(E) 光符号分割多重 (OCDM: Optical Code Division Multiplexing)

表 2. 6 光源と波長フィルタの動作モード (固定波長, 可変波長) による WDM システムの分類

(A) 固定波長光源／固定波長フィルタ	●ポイント・ツー・ポイント (Point to Point) ●WDM (Wavelength Division Multiple Access)
(B) 固定波長光源／可変波長フィルタ	●Broadcasting (Signal Distribution) ●WDM (Wavelength Division Multiple Access)
(C) 可変波長光源／固定波長フィルタ	●Wavelength Label (Wavelength Path)
(D) 可変波長光源／可変波長フィルタ	●DA (Demand Assign)-WDM
(E) その他のシステム	●SCM他

表 2. 7 波長分割多重 (WDM) 用光源

(1) 固定波長レーザ	(A) DFBレーザ
(2) 可変波長レーザ	(A) DFBレーザ (B) DFB レーザアレイ (C) 3-Section DFBレーザ (D) DBRレーザ (E) SSG-DBRレーザ (F) GCSRレーザ (G) 外部共振器集積レーザ (H) MEM-VCSEL

表 2. 8 波長分割多重 (WDM) 用フィルタ

(1) 固定波長フィルタ	(A) AWG (B) 誘電体多層膜フィルタ (C) FBG (Fiber Bragg Grating) フィルタ
(2) 可変波長フィルタ	(A) 誘電体多層膜フィルタ ●回転型 ●直線変位型 (B) ファブリペローフィルタ ●電歪素子を用いたファブリペロー可変波長フィルタ ●MEMS電歪素子を用いたファブリペロー可変波長フィルタ (C) 半導体フィルタ (PSC DFB, ファブリペロー) ●PSC DFBフィルタ ●半導体ファブリペローフィルタ (D) FBG (Fiber Bragg Grating) フィルタ (E) AO (Acousto-Optic) フィルタ

本節では、次に、本論文で提案する各光ネットワークについて、光源とフィルタから見た波長分割多重 (WDM) システムの分類における位置付について述べる。表 2. 4 に、本論文の対応する章番号を記した。

第 3 章では、DA-WDMA (Demand Assign Wavelength Division Multi-Access)を用いた光 LAN を提案する。本光 LAN は、既存の標準光 LAN とこれに付加される WD チャネルから構成される。DA-WDMA 部分は、可変波長光源と可変波長フィルタを用いる WDM システムに属する。第 3 章で提案する光 LAN は、この DA-WDMA システムと既存の光 LAN を組合せたところに特長がある。

第 4 章では、放送局向の WDM 映像信号分配光ネットワークについて述べる。本光ネットワークは、放送局内の回線センタから、WDM により多チャネルで大容量な映像信号を放送局内各所 (スタジオ副調整室, VTR 室など) へ分配し、分配先で必要な映像信号を自由に選択受信するシステムである。固定波長光源と可変波長フィルタを用いる WDM システムに属する。また、分散配置型のトポロジを用いた同光ネットワークの応用型は、スター型光 LAN とみなすことができる。

第 5 章では、加入者ネットワークへの適用が期待できる U-FDMA/D-TDM (Upstream-Frequency-Division-Multiple Access/Downstream-Time-Division-Multiplexing)光マルチアクセスネットワークを提案する。本ネットワークでは、上りのマルチアクセスは、FDMA (Frequency Division Multi-Access)により実現される。また、下りの TDM (Time Division Multiplexing)通信は、放送モードでブロードバンドサービスを提供する。上りの通信の受信器で発生する光ビート雑音を避ける一つの方法として WDM を用いる方法と送信光源に広い光スペクトル幅を持つ SLD (Superluminescence Laser Diode)を用いる方法が考えられる。本光ネットワークは、WDM システムを補間するその他のシステムに分類される。また、本ネットワークにより光 LAN を構成することも可能である。

第 6 章では、波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワークを提案する。本光ネットワークは、可変波長光源と固定波長フィルタを用いる WDM システムに分類される。第 6 章では、本システムにおいて重要な要素技術となる高速波長切換え光源についても提案する。本光ネットワークにより、第 1 章で述べた転送ネットワークを構成することが可能である。また、本光ネットワークは、光 LAN とみなすことができる。

第2章の参考文献

- [1] L. Y. Lin, E. L. Goldstein, and R. W. Tkach, "Free-Space Micromachined Optical Switches for Optical Networking," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, Vol. 5, No. 1, pp. 4-9, Jan./Feb. 1999.
- [2] J. L. Jackel, J. J. Johnson, and W. J. Tomlinson, "Bistable Optical Switching Using electrochemically generated bubbles," *Optics Lett.*, Vol. 15, No. 24, pp. 1470-1472, Dec. 1990.
- [3] M. Makihara, M. Sato, F. Shimokawa, and Y. Nishida, "Micromechanical Optical Switches Based on Thermocapillary Integrated in Waveguide Substrate," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, No. 1, pp. 14-18, Jan. 1999.
- [4] 加藤雅浩, 蓮田宏樹, "WDMで打って出る," *日経エレクトロニクス*, No. 788, pp. 143-167, Jan. 2001.
- [5] ITU-T Recommendation G.692, "Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers," Oct. 1998.
- [6] 塚本勝俊, 大塚裕幸, "光・電波融合ネットワークの現状と将来," *信学誌*, Vol. 80, No. 8, pp. 859-868, Aug. 1997.
- [7] K. Kitayama, H. Sotobayashi, and N. Wada, "Optical Code Division Multiplexing (OCDM) and Its Applications to Photonic Networks," *IEICE Trans. Fundam.*, Vol. E82-A, No. 12, pp. 2616-2626, Dec. 1999.
- [8] 外林秀之, "光符号分割多重ネットワーク", *応用物理*, Vol. 71, No. 7, pp. 853-859, July 2002.
- [9] M. J. Offside, J. E. Carroll, M. E. Bray, and A. Hadjifotiou, "Optical Wavelength Converters," *Electron. Commun. Eng. J.*, Vol. 7, No. 2, pp. 59-71, Apr. 1995.
- [10] M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda, A. Katzir, A. Yariv, and H. W. Yen, "GaAs-GaAlAs Double-Heterostructure Injection Lasers with Distributed Feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-11, No. 7, pp. 436-439, July 1975.
- [11] P. Speier, J. Bouayad-Amine, U. Cebulla, K. Dutting, M. Klenk, G. Laube, H. P. Mayer, R. Weinmann, K. Wunstel, E. Zielinski, and O. Hildebrand, "10 Gbit/s MQW-DFB-SIBH Lasers Entirely Grown by LPMOVPE," *Electron. Lett.*, Vol. 27, No. 10, pp. 863-864, May 1991.
- [12] 吉國裕三, "波長可変レーザーの開発動向とそのシステム応用への期待", *応用物理*, Vol. 71, No. 11, pp. 1362-1366, Nov. 2002.
- [13] T. P. Lee and C. E. Zah, "Wavelength-Tunable and Single-Frequency Semiconductor Lasers for Photonic Communications Networks," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 27, No. 10, pp. 42-52, Oct. 1989.
- [14] Y. Kotaki and H. Ishikawa, "Wavelength Tunable DFB and DBR Lasers for Coherent Optical Fiber Communications," *IEE Proc.-J*, Vol. 138, No. 2, pp. 171-177, Apr. 1991.
- [15] K. Kudo, K. Yashiki, T. Sasaki, Y. Yokoyama, K. Hamamoto, T. Morimoto, and M. Yamaguchi, "1.55- μ m wavelength-Selectable Microarray DFB-LD's with Monolithically Integrated MMI Combiner,

- SOA, and EA-Modulator," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 12, No. 3, pp. 242-244, Mar. 2000.
- [16] 小滝裕二, "分布帰還型アレイ波長選択光源", 応用物理, Vol. 71, No. 11, pp.1372-1375, Nov. 2002.
- [17] Y. Kotaki, S. Ogita, M. Matsuda, Y. Kuwahara, and H. Ishikawa, "Tunable, Narrow-Linewidth and High-Power /4-Shifted DFB Laser," Electron. Lett., Vol. 25, No. 15, pp. 990-992, July 1989.
- [18] H. Kawanishi, Y. Suematsu, K. Utaka, Y. Itaya, and S. Arai, "Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP Injection Laser Partially Loaded with First-Order Distributed Bragg Reflector," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-15, No. 8, pp. 701-706, Aug. 1979.
- [19] H. Ishii, Y. Tohmori, M. Yamamoto, T. Tamamura, and Y. Yoshikuni, "Modified Multiple-Phase-Shift Super-Structure-Grating DBR Lasers for Broad Wavelength Tuning," Electron. Lett., Vol. 30, No. 14, pp. 1141-1142, July 1994.
- [20] P. -J. Rigole, S. Nilsson, L. Backbom, T. Klinga, J. Wallin, B. Stalnacke, E. Berglind, and B. Stoltz, "Access to 20 Evenly Distributed Wavelengths Over 100 nm Using Only a Single Current Tuning in a Four-Electrode Monolithic Semiconductor Laser," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 7, No. 11, pp. 1249-1251, Nov. 1995.
- [21] Y. Uenishi, M. Tsugai and M. Mehregany, "Hybrid-Integrated Laser-Diode Micro-External Mirror Fabricated by (110) Silicon Micromachining," Electron. Lett., Vol. 31, No. 12, pp. 965-966, June 1995.
- [22] D. Vakhshoori, P. Tayebati, C. -C. Lu, M. Azimi, P. Wang, J. -H Zhou, and E. Canoglu, "2mW CW Singlemode Operation of a Tunable 1550nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser with 50nm Tuning Range," Electron. Lett., Vol. 35, No. 11, pp. 900-901, May 1999.
- [23] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, "Wavelength Multiplexer Based on SiO₂-Ta₂O₅ Arrayed-Waveguide Grating," J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 6, pp. 989-995, June 1994.
- [24] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba, and Y. Inoue, "Transmission Characteristics of Arrayed Waveguide N x N Wavelength Multiplexer," J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 3, pp. 447-455, Mar. 1995.
- [25] 高橋浩, "石英系 AWG 波長合分波器の最近の技術進展," 信学論 C, Vol. J86-C, No. 5, pp. 491-499, May 2003.
- [26] T. Honda, A. C. Liu, J. Valera, J. Colvin, K. Sawyer, and R. R. McLeod, "Diffraction-Compensated Free-Space WDM Add-Drop Module with Thin-Film Filters," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 15, No. 1, pp. 69-71, Jan. 2003.
- [27] G. E. Town, K. Sugden, J. A. R. Williams, I. Bennion, and S. B. Poole, "Wide-Band Fabry-Perot-Like Filters in Optical Fiber," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 7, No. 1, pp. 78-80, Jan. 1995.
- [28] H. Kobrinski and K. -W. Cheung, "Wavelength-Tunable Optical Filters: Applications and Technologies," IEEE Commun. Mag., Vol. 27, No. 10, pp. 53-63, Oct. 1989.
- [29] D. Sadot and E. Boimovich, "Tunable Optical Filters for Dense WDM Networks," IEEE Commun. Mag., Vol. 36, No. 12, pp. 50-55, Dec. 1998.

- [30] N. Kanbara, K. Suzuki, T. Watanabe, and H. Iwaoka, "Precisely Tunable Fabry-Perot Filter for Optical Communications," Conference Digest of 2002 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs, ThC4, pp. 173-174, Aug. 2002.
- [31] T. Numai, "1.5 μ m Phase-Shift-Controlled distributed Feedback Wavelength Tunable Optical Filter," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-28, No. 6, pp.1513-1519, June 1992.
- [32] M. W. K. Mak, H. K. Tsang, and J. B. D. Soole, "High Tuning Speed Etched Cavity InGaAsP/InP Waveguide Fabry-Perot Filter," Digest of 1999 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, Vol. II, WB1.3, pp. 69-70, July 1999.
- [33] S. Nagaoka, N. Take, Y. Tawa, Y. Ohba, and Y. Takahashi, "Compact Tunable FBG Filters Using Ni Film Heater and Surface Memory Alloy (SMA) Coil Actuator," Technical Digest of CLEO/Pacific Rim 2001, Vol. II, pp. 26-27, July 2001.
- [34] D. A. Smith, J. E. Baran, J. J. Johnson and K.-W Cheung, "Integrated-Optic Acoustically-Tunable Filters for WDM Networks," IEEE J. Selected Areas in Commun., Vol. 8, No. 6, pp. 1151-1159, Aug. 1990.
- [35] E. Tony and S. K. Chavdhuri, "Acousto-Optic Filters," IEEE Potentials, Vol. 13, No. 4, pp. 19-22, Oct. /Nov. 1994.
- [36] 御園雅俊, 下坂直樹, 藤原雅彦, "光フィルタによる帯域制限が光受信特性に及ぼす影響," 信学春季大会, B-1047, 4, pp. 113, 1994.

