

# 光ネットワーク用デバイス

## Optical Devices for Photonic Networks

あらまし

本稿では、目まぐるしく大容量化が進む光ネットワークにおいて、要求される光デバイスについて概説するとともに、富士通がこれまで開発してきたいくつかの光デバイスについて紹介する。波長分割多重（WDM）方式において多重度が増す中、ネットワーク構築の経済性・柔軟性・高速性を考えると、光を光のまま処理できる光分岐挿入（OADM）装置や光クロスコネクタ（OXC）装置などが不可欠となる。この機能を実現するための光合波器、大規模光スイッチなど新たなデバイスが必要である。また、1波で40 Gbps以上のビットレートを持つシステムを実現するため、新たな高速の送受信器、分散補償器などのデバイスが必要となる。これらデバイスを機能別・方式別に分類し、最近の動向をまとめる。富士通の代表的なデバイスとして、外部変調器、波長可変フィルタ、半導体増幅器、波長可変レーザを取り上げる。

Abstract

This paper describes optical devices required for rapidly evolving large-capacity photonic networks and introduces some optical devices that Fujitsu has developed so far. As the degree of multiplexing in a wavelength division-multiplexing (WDM) system increases, optional add/drop multiplexers (OADMs) and optical cross-connects (OXC)s, which can process light as is, become indispensable for maintaining the economic efficiency, flexibility, and rapidity of network construction. To realize these functions, new devices such as WDM filters and large-scale optical switches are needed. Moreover, in order to create a system which has a bit rate of 40 Gbps or more per wave, devices such as new high-speed transceivers and dispersion compensators are required. This paper classifies these devices by their functions and methods, and summarizes the latest trends. An external modulator, acousto-optic tunable filter (AOTF), semiconductor optical amplifier (SOA), and tunable laser developed by Fujitsu are also described.



中澤忠雄（なかざわ ただお）  
Iプロジェクト部光機能デバイス  
研究部 所属  
現在、超高速光変調器、可変波長  
フィルタの開発に従事。



小滝裕二（こたき ゆうじ）  
フォト・エレクトロニクス研究所  
光半導体研究部 所属  
現在、光ファイバ通信システム向  
け光半導体デバイスの開発に  
従事。



森戸 健（もりと けん）  
フォト・エレクトロニクス研究所  
光半導体研究部 所属  
現在、波長可変レーザ、半導体光  
増幅器の開発に従事。

まえがき

インターネットの爆発的な普及に伴い、大容量伝送が可能な光通信ネットワークの整備が急速に進められている。伝送容量を拡大するには、オン・オフした光信号を時間軸上に詰め込む光時分割多重（OTDM：Optical Time-Division Multiplexing）方式と、異なる波長の光を重畳させて伝送する波長分割多重（WDM：Wavelength-Division Multiplexing）方式とがある。OTDM方式では、これまで約5年で4倍の速度で高速化が実現してきており、1996年に10 Gbpsシステム（FA-10G）が実用化になった。現在では、40 Gbpsシステムや更にそれを上回るビットレートのシステムが活発に検討されている。一方、WDM方式では、この10年以内に急速に発展した方式で、多重する波長の間隔を狭くしたり、使用する波長帯を広げるなどの方式を導入することにより、年率約2倍の速度で高速化が実現されている。2000年には10 Gbps信号を176波束ねて、1.76 Tbps伝送を可能とするシステム（FLASHWAVE OADX）が実用化された。このように今後もOTDM、WDMともに組み合わせることにより、さらなる高速・大容量化へのアプローチが模索され続けることになるものと考えられる。

WDM方式導入に伴い、これまでのようにノードにおいて光を電気に変換して処理していたのでは、波長数が多くなればなるほど装置の規模・コストが増大したり、光信号が持つ高速性を十分生かしきれないなどの問題が

発生する。そのため光信号を光のまま処理する光クロスコネクタ（OXC：Optical Cross Connect）装置や、光分岐挿入（OADM：Optical Add Drop Multiplexer）装置が必要となる。これらの装置は、ノード内で波長のルーティング機能や網再構成時/故障回復時の光パス切り換え機能を持ち、柔軟な大容量光ネットワークを経済的に構築する。これら機能を実現するためには、光合分波器、光スイッチ、波長可変光源などがキーデバイスとなる。また、ビットレートが40 Gbps以上と速くなり、光パルスの幅が狭くなると、波長分散、偏波分散によるパルスの広がりを補償する分散補償器が重要となる。

上述した要求機能を実現するため様々な材料を用いた種々のデバイスが活発に検討されている。本稿では、光ネットワーク進化のかぎを握る新機能デバイスの最近の動向を概説するとともに、富士通が開発している光デバイスをいくつか紹介する。

光ネットワークを支える光デバイスの種類

光ネットワークの大容量化の進展に伴い、光デバイスの種類も急速に分化するとともに、高い機能が求められる。光デバイスを分類するには、いくつかの切り口がある。表-1には一つの見方として、機能別に見た分け方を縦に、材料別に見た分け方を横にしてその交点に代表的なデバイスを示した。ここでは呼称のあるデバイスはその呼び方を示し、括弧内には用いている原理を示してある。

表-1 光デバイスの種類

機能	材料					
	光導波路型				ファイバ	空間伝搬
	ガラス	半導体	ニオブ酸リチウム	有機材料		
送受信器	-	固定レーザー・波長可変レーザー PD	-	-	-	-
変調器	-	LD直接変調 EA変調器(電界吸収) MZI変調器(EO効果)	MZI外部変調器 (EO効果)	MZI外部変調器 (EO効果)	-	-
波長変換器	-	(非線形光学効果)	SHGデバイス (非線形光学効果)	-	-	-
光増幅器	(希土類元素による増幅作用)	SOA	(希土類元素による増幅作用)	-	EDFA ラマン増幅器	-
光合分波器	AWG型	AWG型	AOTF (AO効果)	AWG型	ファイバグレーティング	誘電体多層膜 回折格子
インターレーバ	ラティスタイプ	-	-	-	ラティスタイプ	波長板型 薄膜型
光スイッチ	(熱光学効果) (パブルによる反射)	EA(電界吸収),SOA MZI型(EO効果,利得飽和) 交差型(EO効果,電流注入)	(EO効果)	(熱光学効果)	(機械式)	ミラー,プリズム MEMS(機械式) 液晶型
可変アッテネータ	(熱光学効果)	EA変調	AOTF(AO効果) MZI(EO効果)	-	(機械式)	(磁気光学効果)
利得等化器	ラティスタイプ トランスバーサル型 AWG型	-	AOTF (AO効果)	-	ファイバグレーティング ファイバ型AOTF (AO効果)	誘電体多層膜 液晶型
波長分散・偏波分散補償器	ラティスタイプ	-	偏波制御器 偏波アナライザ	-	分散補償ファイバ ファイバグレーティング	VIPA

## 送受信器・変調器・波長変換器

現在、波長の固定されたレーザが用いられているが、WDMでは複数の波長が必要となるため、経済的なシステム構築を考えると、波長可変レーザの開発に期待が持たれる。また、ノードにおける波長切り換え機能・波長変換機能の実現は、柔軟なシステムを構築する上で重要と考えられる。

電気信号を光信号に変換する方法は、1 Gbps以下の低速の場合にはレーザの直接変調が用いられてきた。これ以上の速度では、波長チャープ（光パルス内の波長変化）による伝送特性劣化が顕著になるため、マッハツェンダ干渉計を原理とする外部変調方式が採用された。現在、ニオブ酸リチウム（LiNbO<sub>3</sub>）結晶を用いた外部変調器による10 Gbps変調が商用レベルでの最高速度であり、40 Gbpsへの更なる高速化が活発に研究されている。

## 光増幅器

光を光のまま増幅できる光増幅器は、電気信号に変換することなく異なる波長を一括して増幅できるため、WDMの進展を促した。1980年代末に希土類元素であるエルビウム（Er）をドープした光ファイバ増幅器（EDFA：Erbium-Doped Fiber Amplifier）が発明されて以来、高利得化、帯域の拡大および利得平坦化の検討が行われてきた。アルミニウムをコドープする手法により、波長1,532 nm付近にピークは残るものの、1,545～1,560 nmの広い領域で利得を平坦化することに成功し、実用化に至った。さらに、帯域を長波長側にシフトさせた1,570～1,600 nm用のEDFAも製品化されている。短波長側への検討は、ツリウム（Tm）をドープしたフッ化物ファイバなどが検討されている。最近、小型化を目指して、Erをドープした導波路型光増幅器が開発されている。

半導体光増幅器（SOA：Semiconductor Optical Amplifier）は、材料・原理がレーザと同じであるため、増幅帯域の設計が可能であり、小型であるという利点を持つ。集積化が容易であるため、経済的なシステム構築へのキーデバイスとして期待が持たれている。

## 光合分波器・インタリーバ

ノードや端局では、ファイバに異なる波長を束ねたり、分離したりするデバイスが不可欠となる。1波ずつに分けたり合波したりするデバイスが光合分波器で、偶数チャンネルと奇数チャンネルを分けるものがインタリーバである。

光合分波器の機能を実現するデバイスにはいくつかあ

り、アレイ導波路回折格子（AWG：Arrayed Waveguide Grating）、ファイバグレーティング、誘電体多層膜が挙げられる。それぞれ、扱える波長数、波長間隔、コストなどにおいて一長一短があり、システムに応じて使い分けられている。プレーナ光波回路（PLC：Planar Lightwave Circuit）技術を用いたAWGは特に大規模化が進んでおり、最近の報告では25 GHz間隔400チャンネルに対応するものが報告されている<sup>(1)</sup>。

インタリーバは、偶奇チャンネルを分離することにより、波長間隔を拡張する機能を持つ。WDMの波長間隔が狭くなるほどその機能は重要となり、波長間隔50 GHzを100 GHzへ、または、100 GHzを200 GHzへ変換するものが開発されている。構成としては、多段のマッハツェンダ干渉計で構成されたラティスフィルタを原理とするPLC型<sup>(2)</sup>のほか、ファイバ型、異方性結晶中の光軸間の光速差を用いて干渉計とする波長板型<sup>(3)</sup>、そしてマイケルソン干渉計を原理とした薄膜型<sup>(4)</sup>がある。

## 光スイッチ

光スイッチの研究は歴史が古く、空間伝搬型から導波路型に至るまで様々な形態のものが検討されてきた。システム用途に応じて異なる規模のものが要求されていて、例えば、プロテクションやOADM用途の小規模（1×2、2×2、1×N）のものから、メッシュ型ネットワークのノードに用いられる大規模（64×64～1,000×1,000）な光クロスコネクタ（OXC）用のものまで必要とされている。小規模のものは、ファイバやプリズムを可動させる機械的なスイッチが実用化されている。大規模化へのアプローチは、Y分岐、マッハツェンダ干渉計、方向性結合器、交差導波路などをスイッチエレメントとした導波路型が検討されてきている。これまでに、熱光学（TO：Thermo Optical）効果を原理としてPLCで構成した16×16スイッチ<sup>(5)</sup>、電気光学（EO：Electro Optical）効果を原理としてニオブ酸リチウムで構成した32×32スイッチ<sup>(6)</sup>が報告されている。

ここ数年で急速に進展したデバイスとしてMEMS（Micro Electro Mechanical System）がある。これは、マイクロマシン技術をベースにしたスイッチで、シリコン基板上に小型の可動ミラーが形成され、電気的に制御することによりスイッチング動作をする。1,296個（=36×36）のミラーアレイは比較的容易に製造でき、これを二つ対向させることにより、1,000×1,000規模のOXCが構成できる<sup>(7)</sup>。MEMSは大規模化へのブレークスルーとして期待されている。

## 可変アッテネータ・利得等化器

WDMネットワークでは、構成要素となっている光デバイスの波長特性、とくに光増幅器の波長特性により、各チャンネル間でパワーレベル差が生じる。可変アッテネータ・利得等化器は、この差を補償する機能を持つ。

波長ごとにレベルを調節する可変アッテネータには、ファイバを曲げたり、行路中に遮蔽板を挿入したりする機械的な方式や、磁気光学素子と偏光子を組み合わせた磁界制御式のものがあるが、いずれも集積化や多チャンネル化が困難である。また、PLCを用いたものは、TO効果で制御するので消費電力低減などの課題はあるが、集積化に適していることから高い期待が持たれている。

利得等化器は光増幅器の利得帯域を平坦化するもので、光増幅器に組み込まれて使用される。固定型と可変型に分けられ、長周期のファイバグレーティングや誘電体多層膜を用いたものは固定型、PLC、液晶型はTO効果や電界による制御が可能で可変型となる。実際のネットワークで発生する利得特性の時間変化へ追従させるため、可変型の検討が活発に行われている。

## 波長分散・偏波分散補償器

伝送中にパルスが広がる原因としては、パルスの中に含まれる微妙に異なる波長の光がファイバ伝送中に異なる屈折率を感じて広がる波長分散、そして、偏波によってファイバの屈折率が若干異なることによって広がる偏波分散（PMD：Polarization Mode Dispersion）がある。

波長分散補償器としては、グレーティング周期を徐々

に変化させたチャープトファイバグレーティング<sup>(8)</sup>、ラティス型のPLCを用いるタイプ<sup>(9)</sup>の開発が進んでいる。PLC型はAWGを集積化することにより、チャンネルごとに精密に補償できる利点がある。また、環境温度の変化などによる伝送線路の分散変化に追従するため、ダイナミックに調整できる補償器の需要が高まっている。富士通の開発したVIPA（Virtually Imaged Phased Array）は空間伝搬型の一つで、波長ごとに異なる分散量が得られる上、可変であるという特長を持つ<sup>(10)</sup>。

偏波分散補償器は、線路の偏波状態は通常は一定していないことから、ダイナミックな補償機能が要求される。そのため、偏波を監視する偏波モニタと、制御可能な偏波制御器が必要となる。このデバイスはここ数年で急速に研究開発が活発化してきており、PLCや、ニオブ酸リチウムを用いたモニタ・制御器が報告されている<sup>(11)</sup>。

## ニオブ酸リチウムを用いた光デバイス

ニオブ酸リチウムは強誘電体結晶の一つである。光導波路を作りやすい、電気光学定数が大きいの利点があるため、古くからデバイス適用への検討が行われてきた。しかし、通信用デバイスとして実用化されたのは比較的最近のことで（1992年）、富士通の開発した2.4 Gbps用外部変調器が初めてのものとなる。その後1995年には10 Gbps用変調器も製品化されている。本章では、ニオブ酸リチウムを用いたデバイスとして外部変調器、音響光学可変波長フィルタ（AOTF：Acousto-Optic Tunable Filter）について紹介する。

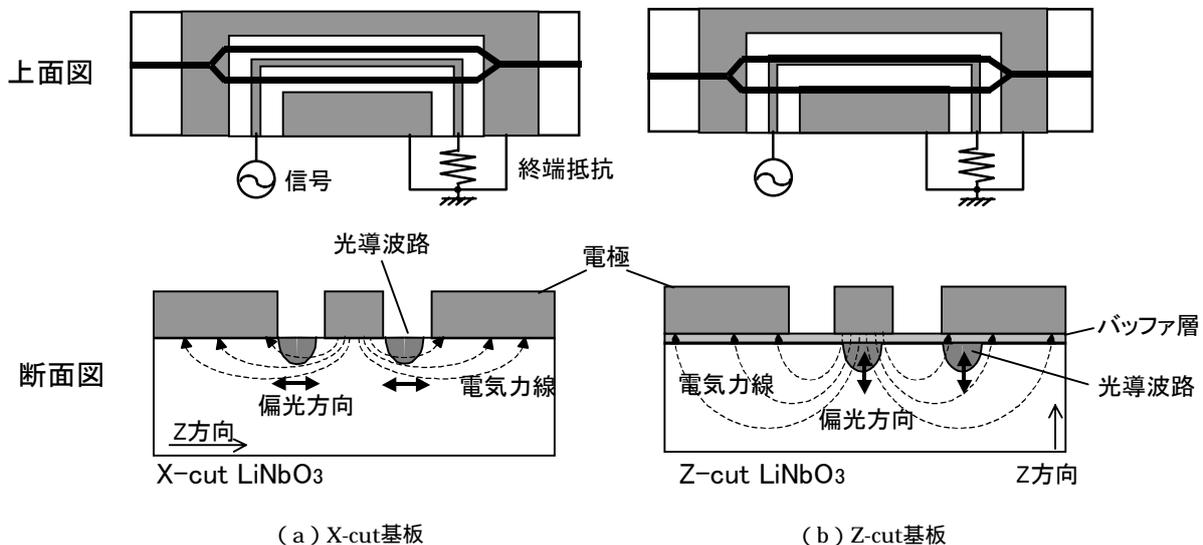


図-1 ニオブ酸リチウム外部変調器の構成  
Fig.1-Schematic of LiNbO<sub>3</sub> external modulator.

外部変調器

原理は、電気光学効果で生じた屈折率変調を、光導波路で形成されたマッハツェンダ干渉計を介して、光変調に変換するものである。Zカット、Xカット結晶のどちらを用いるかで、2種類の構成がある。結晶カットによる構成の違いを図-1に示す。いずれの結晶カットを用いるにせよ、最も大きな電気光学効果が得られるように、Z方向に効率良く電界が加わる電極構成になっている。

Xカットを用いた場合の特長は、物性的に温度ドリフトが小さく、バッファ層不要であることからDCドリフトも小さい上、対称な電極構成がとれるため波長チャープが零になるという利点を持つ。その反面、光・マイクロ波間の速度整合とコネクタ・線路間のインピーダンス整合とを両立させることが難しいという課題を持つ。

一方、Zカットの場合には、温度ドリフト、DCドリフトが大きい、非対称な電極形状に由来する波長チャープがあるなどの課題はあるものの、電極の厚さ・間隔を変えるだけで速度整合とインピーダンス整合との両立が

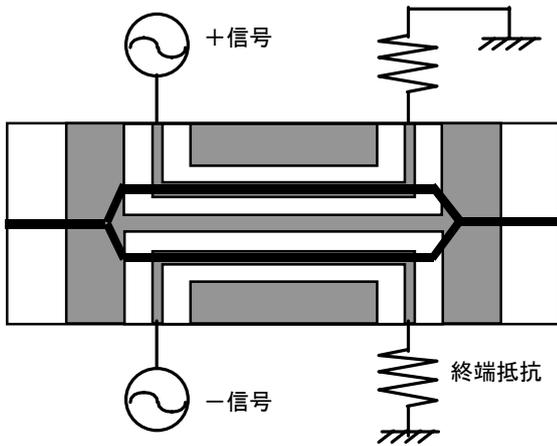


図-2 零チャープデュアル駆動型変調器  
Fig.2-Zero-chirp dual-driven modulator.

容易であるという利点を持つ。実用化を最後まで阻んでいた温度ドリフト<sup>(12)</sup>、DCドリフト<sup>(13)</sup>が解決されたことにより、ニオブ酸リチウム変調器は、Zカットを用いた構成で初めて製品化されるに至った。また、図-2のような対称な電極構成を用い、2電極のそれぞれに±の相補信号を印加することにより、零チャープのZカット変調器も開発されている。

今後、40 Gbps以上のシステムに適用していく場合の課題として、より厳密な速度整合、マイクロ波減衰の抑制、駆動電圧低減が重要となる。

AOTF

AOTFは、一つのチップで任意の波長を二つの行路に分離または挿入する機能を持つため、OADMを構築するための有力なデバイスとして注目されている。その構成を図-3に示す。くし形電極に170~180 MHzの制御信号を入力すると弾性表面波 (SAW: Surface Acoustic Wave) が励振される。SAWが伝搬している直線の光導波路内では、音響光学 (AO: Acousto Optical) 効果により特定の波長の偏波モードが回転し、波長選択性を生み出すこととなる。このモード変換部の両サイドに導波路型の偏光ビームスプリッタ (PBS: Polarization Beam Splitter) を集積化することにより、偏光無依存で動作するとともに、選択光、非選択光を異なる出力ポートへ導くことができる。制御信号の周波数を変えることにより、80 nm以上の広い範囲でチューニングでき、しかも、同時に複数の周波数の制御信号を投入することにより、多波長を同時に選択することが可能である。

従来、狭帯域化、高消光比化の困難さから、波長が高密度に並んだWDMシステムへAOTFを適用することは難しいと考えられていた。富士通では、薄膜SAWガイドの適用、多段化技術など、独自の技術を開発することにより、WDM用途として実用的な特性を得ている。<sup>(14)</sup>

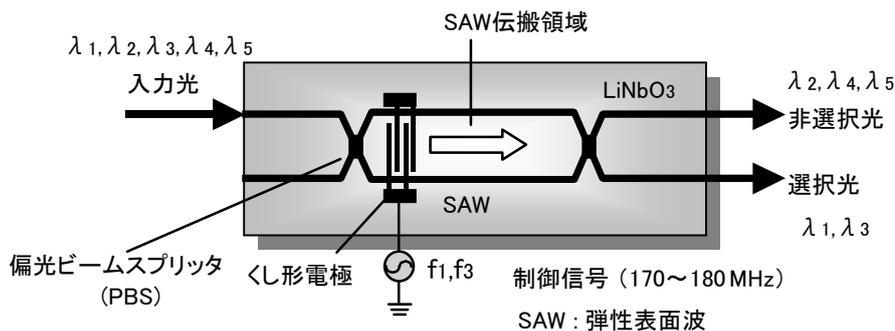
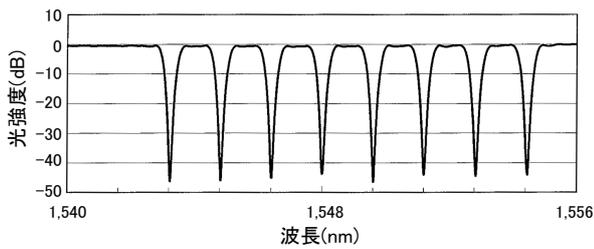
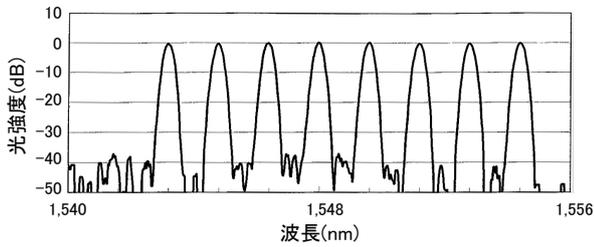


図-3 AOTFのチップ構成  
Fig.3-Schematic of acousto-optic tunable filter (AOTF).



(a) 非選択光



(b) 選択光

図-4 AOTFの特性  
Fig.4-Characteristics of AOTF.

AOTFの波長特性を図-4に示す。ここでは、1.6 nm間隔8波を同時に選択している場合の特性を示しており、40 dBという高い消光比が得られていることが分かる。また、0.8 nm間隔32波のうち任意の波長をダイナミックに分岐挿入できるOADMを試作して、良好な分岐挿入動作と伝送特性を確認している<sup>(15)</sup>。

## 半導体を用いた光デバイス

半導体を基板とした光デバイスは、光源、光変調器、光増幅器などアクティブな機能を持つものから、AWGなどパッシブなデバイスまで多岐にわたる。ここでは、富士通が開発した半導体光デバイスのうち、半導体光増幅器 (SOA) と波長可変レーザを紹介する。

### SOA

SOAは、小型、低コストな光増幅器としてのみならず、光をオン・オフする光ゲートとしても期待されている。素子構造を図-5に示す。チップ長は1 mm前後と小さく、通信用レーザと同様にInP基板上にInGaAsの活性層を有している。入出力端から150 μmずつの領域に、幅テーパ型モード変換器が集積され、ファイバと効率良く結合できるようになっている。これまでSOAでは、飽和光出力の増大と、利得の偏波無依存性を両立させることが困難であった。富士通では、量子効果による特性劣化を招く限界まで活性層を薄くすることによりモード断面積を増大し、図-6に示すように飽和光出力が

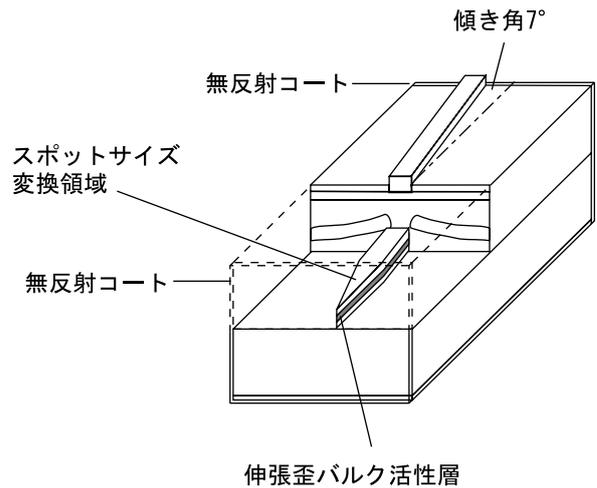


図-5 半導体光増幅器の構成  
Fig.5-Schematic of semiconductor optical amplifier (SOA).

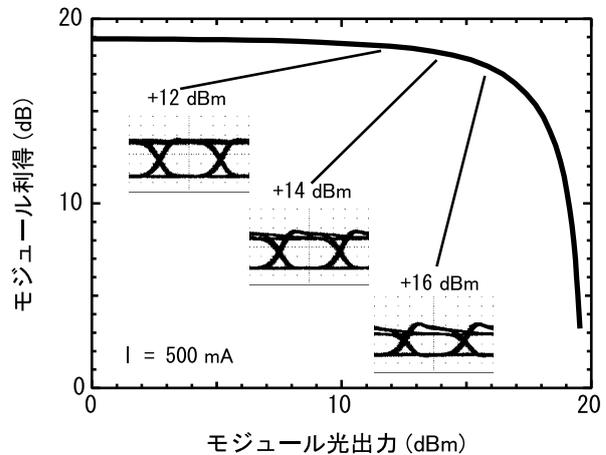


図-6 半導体光増幅器の特性  
Fig.6-Characteristics of SOA.

+ 17 dBmとこれまでより7 dB以上高い値を得るとともに、10 Gbps変調光に対して平均光出力 + 12 dBmまでパターン効果による波形劣化のない増幅を実現している<sup>(16)</sup>。さらに、活性層がより偏平になったことによって生じる利得の偏波依存性を、活性層を歪ませて材料利得が逆になる偏波依存性を意図的に発生させることにより相殺し、0.2 dB以下の偏波利得差を実現した。

### 波長可変レーザ

WDMシステムでは、複数波長の光源が必要となる。経済的なシステム構築を考えると、これまでのように、波長ごとに固定レーザを用意するのではなく、波長可変レーザを用いることが不可欠となる。また、ノードにおける波長切り換え機能を実現するなど、柔軟なシステムを構築する上でも波長可変レーザは重要である。

8個のDFBレーザを集積化することにより実現した波長可変レーザの構成を図-7に示す。各DFBレーザは3.2 nmの波長差を持っており、図-8に示すように温度を変えることによってそれぞれチューニングを行うことができる。1個のレーザは0.8 nm間隔の4波をカバーしているので、結果的に32波の任意の1波を出力させることができる。図-9には発振スペクトルを示す。50 dB以

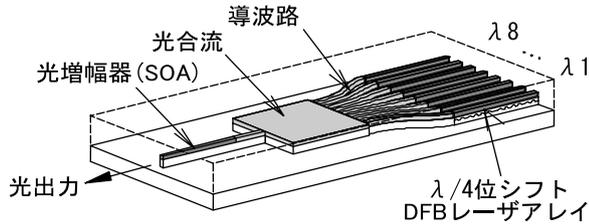


図-7 波長可変レーザの構成  
Fig.7-Schematic of tunable LD.

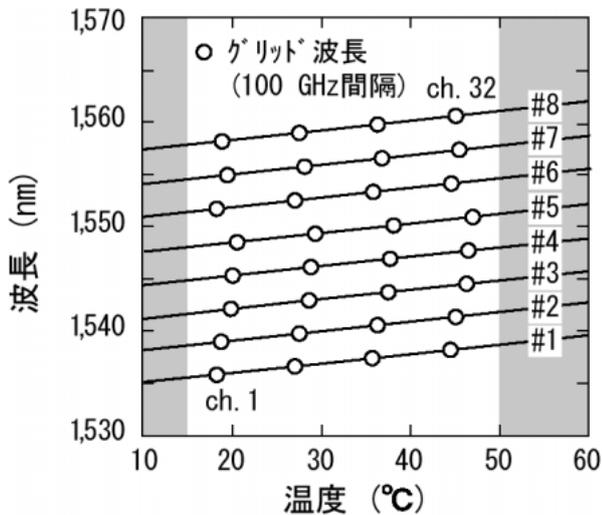


図-8 波長可変レーザの温度と発振波長  
Fig.8-Wavelength vs. temperature.

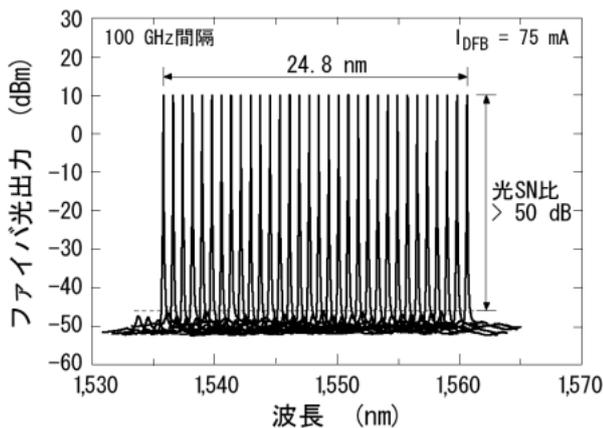


図-9 波長可変レーザの発振スペクトル  
Fig.9-Spectrum of tunable LD.

上の良好な光SN比が得られていることが分かる。<sup>(17)</sup>

む す び

本稿では、爆発的に大容量化が進む光ネットワークに要求される光デバイスについて、機能別に分類して概説するとともに、富士通で開発している光デバイスのいくつかを紹介した。今後、さらに光デバイスの開発競争は激化するものと考えられ、勝ち組となるには独自技術に基づく競争力あるデバイス開発が必須と考えられる。新たなニーズに応えるべく、新機能を持つデバイスをいち早く投入していきたい。

参考文献

- (1) Y. Hida et al. : 400-channel 25-GHz spacing arrayed-waveguide grating covering a full range of C-and L-bands . OFC2001 , WB2 , 2001 .
- (2) M. Oguma et al. : Flatpasband Interleave filter with 200GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure . *Electron. Lett.* , Vol.36 , No.15 , p.1299-1300 ( 2000 ) .
- (3) Kuang-Yi Wu et al. : Programmable Wavelength Router . *United States Patent* , USP5867291 .
- (4) J. C. Chon et al. : Ultra Small Dispersion, Low Loss, Flat-Top, and All-Fiber DWDM and NWDM Devices for High Speed Optical Network Applications . ECOC '2000 , p.103-104 .
- (5) T. Goh et al. : Low loss and high extinction ratio strictly nonblocking 16x16 thermooptic matrix switch on 6-inch wafer using silica-based planar lightwave circuit technology . *J. Lightwave Technol.* , Vol.19 , No.3 , 2001 .
- (6) H. Okayama et al. : Optical switch array using banyan network . *IEICE Trans. Electron.* , Vol.E82-C , No.2 , p.313-320 , ( Feb. 1999 ) .
- (7) R. Ryf et al. : 1296-port MEMS Transparent Optical Crossconnect with 2.07 Petabit/s Switch Capacity . OFC2001 , PD28 , 2001 .
- (8) K. O. Hill et al. : A periodic in-fiber Bragg gratings for optical fiber dispersion compensation . OFC94 , PD2 , 1994 .
- (9) T. Saida et al. : Polarization mode dispersion compensator on a planar lightwave circuit . CPT2001 , Wb-4 , 2001 .
- (10) M. Shirasaki et al. : Compensation of chromatic

- dispersion and dispersion slope using a virtually imaged phased array OFC2001 , TuS1-1 .
- (11) M. Rehage et al. : Wavelength-selective polarization analyzer with integrated Ti:LiNbO<sub>3</sub> acousto-optical TE-TM converter . *Electron. Lett.* , Vol.30 , p.1130-1131 (1994) .
- (12) I. Sawaki et al. : Thermally stabilized z-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide switch , CLEO '86 , MF2 , 1986 .
- (13) M. Seino et al. : A low DC-Drift Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulator assured over 15 years , OFC '92 , PD-3 , 1992 .
- (14) T. Nakazawa : Integrated Acousto-Optic Tunable Filter for Optical Add/Drop Multiplexers , *ECIO2001* , p.27-30 (2001) .
- (15) H. Miyata et al. : Fully Dynamic and Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer on 0.8nm Channel Spacing using AOTF and 32-Wave Tunable LD Module . OFC2000 , PD40 , 2000 .
- (16) 森戸健ほか : 高い飽和光利得を持つ1.55  $\mu$ m帯偏波無依存型半導体光増幅器における10Gb/s変調光増幅特性 . 2000年電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会 , C-4-13 , 2000 .
- (17) M. Boudaほか : アレイ集積型波長可変レーザ . 電子情報通信学会総合大会 . C-3-84 , 2001 .