

# MITSUBISHI

## 三菱電機技報

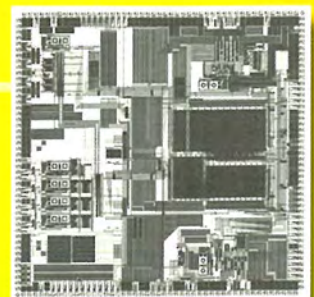
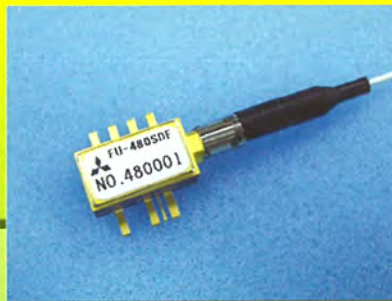
Vol.76 No.12

特集「光通信技術」

2002 **12**



### *Optical Communication & Device Technologies*



## 目次

### 特集「光通信技術」

ブロードバンドがもたらすITルネッサンスと光通信技術への期待…………… 1	菊池和朗
光通信システム技術及びデバイス技術の展望…………… 2	笠原久美雄・北山忠善・三宅良雄
光海底ケーブルシステム技術…………… 7	中川潤一・尾崎陽二郎・仲川栄一・浅川栄道・加藤雅敏
陸上幹線・メトロ伝送システム技術…………… 13	下笠 清・森田俊哉・西尾 猛・上村有朋・大田 聡・加治屋 哲
光アクセスシステム技術…………… 19	牧野真也・羽根稔尚・上田広之・横谷哲也・浅芝慶弘
通信用光半導体デバイス技術…………… 25	三井康郎
光通信用システムLSI技術…………… 31	近藤晴房・吉村 勉・前川繁登・久保和夫・高相 純
光コンポーネント技術…………… 36	平井俊之
次世代光伝送技術…………… 43	水落隆司・本島邦明
光ネットワーク技術(OXC)…………… 50	妹尾尚一郎・市川俊亭・秋田正志・高井伸之・八田竜夫
次世代光デバイス技術—波長可変レーザとモードロック半導体レーザ—…………… 57	井須俊郎・西村哲也・後藤田光伸・野村良徳

### 特許と新案

「光増幅装置」「光増幅装置」…………… 62
「OPTOELECTRONICS PACKAGE」…………… 63
三菱電機技報76巻総目次…………… 64

### スポットライト

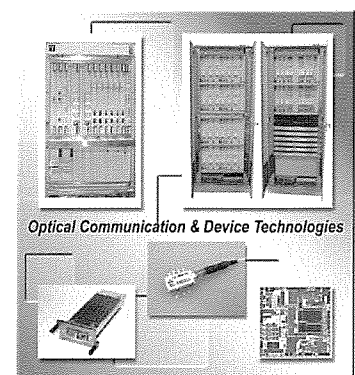
40Gbps用可変分散補償器…………… (表3)
--------------------------

### 表紙

#### ブロードバンドを支える光通信技術

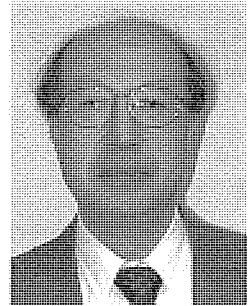
三菱電機では、ブロードバンド社会を支える通信インフラとなる光通信システム及び光・電子デバイスの開発を推進している。さらに、光海底ケーブルで培った波長多重伝送技術及び業界をリードする光・電子デバイス技術を核として、陸上波長多重伝送システムへの展開も図っている。省エネルギー社会を実現する環境配慮型製品の開発を目標とし、非冷却型光デバイス、大規模通信用LSI等のキーデバイス開発により、装置の大幅な低消費電力化と小型化を実現している。

表紙写真は代表的な製品群であり、伝送容量11.52Tbpsの10Gbps光海底ケーブルシステム波長多重伝送端局装置(左上)、伝送容量400Gbpsの陸上波長多重化装置(右上)及びそこに用いる10Gbpsイーサネット用光トランシーバ(左下)である。10Gbpsイーサネット用光トランシーバは、世界初の非冷却型10Gbpsレーザダイオードモジュール(下中央)と1チップイーサネットトランシーバLSI(右下)を用いて低消費電力化した。



## ブロードバンドがもたらすITルネッサンスと 光通信技術への期待

東京大学 先端科学技術研究センター  
教授 菊池和朗



9月上旬にコペンハーゲンを訪問し、米国のOFC (Optical Fiber Communication Conference)と肩を並べる光通信分野の国際学会であるECOC (European Conference on Optical Communication)に出席した。今年の投稿論文数は昨年の65%増の778件、採択率は50%と、光通信技術分野では相変わらず厳しい研究開発競争が行われている。しかし一方、併設展示会における通信機器ベンダーのブースの華やかさは、“ITバブル”絶頂期の1999年にニースで開催されたECOCとは比較すべくもない。国際決済銀行の本年5月のレポートによれば、ITバブルとその崩壊で、AT&T、WorldCom等の米国キャリアは総額5,000億ドルを越す負債を抱え、世界中の通信機器ベンダーのターゲットであった北米市場も低迷を続けている。光通信用コンポーネントの主要ベンダーであった米国Agereの撤退に象徴されるように、国内外の光通信機器ベンダーにとって苦しい時期が続いている。

ITバブルがはじけた今、明確に言えることは、通信の“実需”を喚起することなしに楽天的な通信需要予測を基にした幹線系への投資が、ITバブル発生の大きな原因となったことである。米国では、1996年のTelecommunications Actによって独占的地域通信会社の長距離通信への参入を許可する代わりに、加入者通信装置の開放を義務付けた。意に反して、この“規制緩和”が加入者への投資を限定的にし、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)等のブロードバンドサービスの高価格化を招いている。ADSLによるインターネット加入者の月額支払いは日本と比較して約2倍に上る。このような状況を見ると、通信需要を“実需”たらしめる光加入者の普及なしには、健全な光通信市場の回復は見込めないと考えられる。

一方、国内に目を転じると、光産業技術振興会の発表によれば、2001年度の光通信・情報産業の国内生産額は前年度比5.7%減の6兆6,675億円と、ここ20年間で初めてのマイナス成長を記録した。特に幹線系光通信機器及び関連測定器の生産額は20%を越す減少となっており、北米市場低迷の影響を受けている。その中であって、光加入者系の光通信装置は2000年度9.9%の成長率を記録し、2001年度も1.9%減にとどまっている。ADSL、ケーブルモデム技術を用いたインターネットの普及に伴い、光通信技術がそれら加入者線の多重化伝送技術として着実に実用化されている。

1990年代の米国通信業界隆盛の黎明(れいめい)期であった1992年、OFCの基調講演で、“Catalysis of the Government”が業界成長の重要な要素になるとの説を聞いた。御承知のとおり、その後、MONET等の産官学一体となった大規模な波長多重伝送技術の研究開発が現在の米国の光通信技術レベルを作り上げた。ヨーロッパでも、RACE、ACTSといった全欧州にまたがるプロジェクトが光通信技術の向上に果たした役割は大きい。日本でも、2001年1月にIT戦略本部が決定した「e-Japan戦略」に基づいて、5年以内にFTTHを適用した超高速インターネットの普及数を1,000万加入以上にすることを目的にした法整備、産官学連携の国家プロジェクトを国家として推進している。正に、光通信技術を駆使したブロードバンド通信によるITルネッサンスへ向けた国家的な取り組みが開始されたわけである。近年の国家プロジェクトは5年以内に新たな産業の目となることを期待されており、その意味で、企業の研究開発の責務が今まで以上に大きくなっている。今回の特集に当たり、日本の光通信技術及び産業の健全な発展を祈念する次第である。

# 光通信システム技術及びデバイス技術の展望

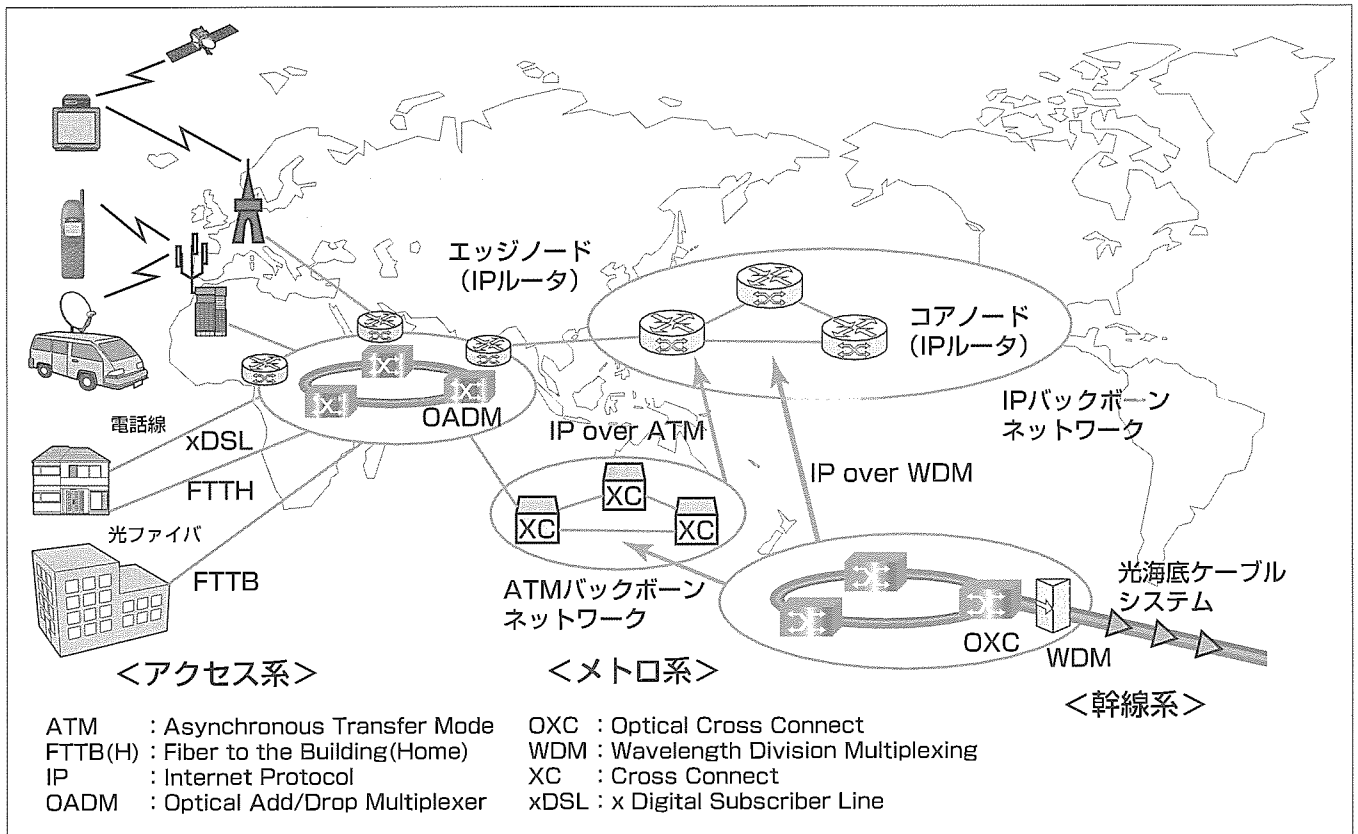
## 要旨

通信トラフィックは、1990年代後半から北米を中心に巻き起こったインターネットの爆発的なブームによって急速に伸びてきた。急速な通信トラフィック需要増は、WDM (Wavelength Division Multiplexing: 波長分割多重) 伝送技術を既存ネットワークへ導入することによって支えられてきた。ネットバブル崩壊後のIT (Information Technology: 情報技術) 不況下においても、通信トラフィックは、衰えることなく約2倍/年の割合で増加し続けており、量だけでなく、その内容も音声中心からATM (Asynchronous Transfer Mode) やIP (Internet Protocol) で代表されるパケット転送、デジタルデータ伝送へ大きく変化してきている。今後、常時接続PHSサービス、W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) や無線LAN (Local Area Network) といったブロードバンド無線アクセスネットワークに加え、xDSL (x Digital Subscriber Line) や

FTTH (Fiber to the Home) といった有線によるブロードバンドアクセスネットワークの普及に伴い、IPトラフィックはますます増加することが予想される。

ブロードバンドアクセス網の進展に伴い、幹線系とメトロ系のネットワークは、IP技術を駆使した高速・広帯域なIPバックボーンネットワークへと変遷すると予測される。その中心的な役割を担うのが、光通信技術を駆使したフォトリックネットワークである。

この特集では、光海底ケーブルシステムから光アクセスシステムまでの光通信システム技術及びそれらのシステムを構成するデバイス技術、さらに、次世代の光伝送、光ネットワーク、光デバイスの各技術に関する三菱電機の開発のアクティビティを紹介し、中長期的視点から光通信システム技術及びデバイス技術を展望する。



## ブロードバンド化を支えるフォトリックネットワーク

海底及び陸上幹線系では情報量の多い主要都市をメッシュ状に結ぶネットワーク、メトロ系のコアノードでは大容量のパケット転送を可能とする光クロスコネクタを、またメトロ系のエッジノードでは光アッド・ドロップ多重装置をそれぞれ用いて構成したネットワークへ変遷すると考える。アクセス系では、大容量・高品質で信頼性の高いサービスを提供できる光加入者方式、xDSL加入者線方式、無線アクセス方式など、ユーザーが自由に選択できる仕組みに整備されると考える。



## 1. ま え が き

世界各国がIT化を強力に進めているが、この波に乗り遅れた我が国では、IT戦略本部が、2001年1月、2005年までに世界最先端のIT国家の実現を目指したe-Japan戦略において、2005年には3,000万世帯にADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)、CATV、無線等の高速インターネットアクセスを、1,000万世帯に光ファイバを用いた超高速インターネットアクセス環境を整備する目標を示した<sup>(1)</sup>。これを受けた総務省の全国ブロードバンド構想では、2005年には約2,000万世帯が高速・超高速インターネットアクセス網に常時接続されると予測している<sup>(2)</sup>。

このようにアクセスネットワークのブロードバンド化が進展し100Mbpsレベルの魅力あるコンテンツを流通させるためには、数百Tbpsレベル以上のIPバックボーンネットワークが必要になると考えられる。このため、光の超広帯域性を利用した光伝送に加え、電気領域で処理していた信号の識別再生や多重/分離、スイッチング、ルーティング等を光の領域で処理し、ネットワーク全体の処理速度を1けたないし2けたの向上させるフォトニックネットワークの実現が不可欠になる。

本稿では、ネットワークの進展とそれらを支える技術を概観し、最後に、今後を展望する。

## 2. フォトニックネットワーク

### 2.1 フォトニックネットワークの研究開発の展開

WDM伝送方式の導入により、伝送路の伝送容量とノードの処理速度は、大きく乖離(かいり)してきている。すなわち、ノードにおいて、パケットの中継・交換をするIPルータの処理速度は、電気回路での発熱量によって約1Tbpsが限界といわれており、将来的に数百Tbps級の処理

を要求されると考えられるので、ボトルネックになる。このため、電気処理に光処理を活用しトータル的に処理速度を飛躍的に向上させるフォトニックネットワーク技術の研究開発を強力に推進する必要性が増しつつある<sup>(3)(4)</sup>。

図1にフォトニックネットワーク技術の研究開発の進展を示す。既にWDM伝送技術を用いたポイント-ポイントWDM伝送が実用化され、更に多くのトラフィックが集中するネットワークの中心部には、光アド/ドロップ多重化(OADM)機能、すなわち任意の波長の信号を入出力する機能を持つノードで構成されたWDMリングが導入されるようになる。ネットワークの規模が拡大するにつれて、一つのWDMリングではトラフィック需要を処理できなくなるので、WDMリングはネットワークの周辺部に複数設置されるようになり、そのネットワークの中心部に光クロスコネクタ(OXC)を設けWDMリングをメッシュ状に接続する波長パススイッチングネットワーク構成へ変遷すると考えられる。このノードは、光スイッチ部と波長変換部とから構成される。光スイッチ部には、大規模な波長パススイッチで構成されるOXCが用いられ、ミリ秒オーダーの切換速度が要求される。また、波長変換部にはE/O変換型が用いられる。

更にトラフィックが増大する場合、リングからメッシュへ入るノードでのパケット処理をIPルータで行っており、その電気処理速度の制限からボトルネックになることが予測される。このため、最初のフェーズとしては光スイッチング制御信号を電気処理で行いバースト的なパケットの塊ごとにスイッチングする光バーストスイッチングネットワーク構成へと変遷すると考えられる。このノードは、波長パススイッチングノードと同様に、光スイッチ部と波長変換部とから構成される。光スイッチ部で用いる光バーストス

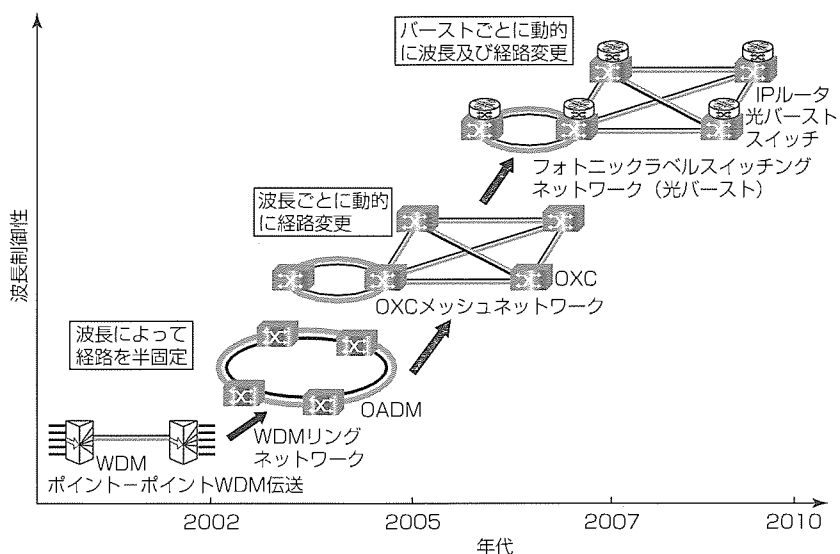


図1. フォトニックネットワーク技術の研究開発の進展

スイッチは、バースト的に発生するIPパケットのブロックごとに高速に波長の設定・解除を行うため、マイクロ秒オーダーの切換速度が要求される。また、波長変換部には、光処理のみで行う光波長変換素子が用いられる。なお、2010年以降には、最終フェーズとして、すべての電気処理を光処理で行いパケットごとにスイッチングする光パケットスイッチングネットワーク構成へ変遷すると考えられる。

## 2.2 ネットワークモデル

図2にネットワークモデルを示す。幹線系ネットワークには、光海底ケーブルシステム(3,000~10,000km)や陸上幹線システム(約400km, 長距離伝送の場合1,000~3,000km)があり、WDM伝送技術を導入し大容量化が図られる。メトロ系ネットワークは、幹線系とアクセス系とを効率良く接続するネットワークであり、波長数が32波から128波、伝送距離が80kmから400kmのメトロ・コアネットワークと、波長数が4波から16波、伝送距離が数十kmのメトロ・アクセスネットワークとがある。メトロ・コアネットワークでは、SDH(Synchronous Digital Hierarchy)網やATM網に加え、IP網、さらにはWDM網へとスイッチング技術の進展によって変遷していくものと思われる。WDMパスレベルでのスイッチング技術は、装置の経済化、装置収容面積の削減の面で重要性を増している。将来的には、各リングは波長を光バーストスイッチングによって実現することが重要となる。メトロ・アクセスネットワークでは、アクセス系の多様化、高速・広帯域化、IP化の進展により、Ethernetの直接収容、大容量蓄積システムを直接収容するファイバチャネルなどのインタフェースを経済的に収容することが要求される。CWDM(Coarse WDM)伝送技術を用いたリング網によって経済化が図られる。

アクセス系ネットワークでは、IP化による通信サービス

コストが下がっていくなか、ネットワークインフラコストを下げるのが最重要課題である。光アクセスシステムには光ファイバ線路や局内装置コスト、設置スペース等を極端に削減する技術が求められる。事業所向けのFTTBや家庭向けのFTTHを実現するものとして、1本の光ファイバを複数のユーザーが共有するPON(Passive Optical Network)方式が有力である。PONシステムには、高い通信品質や信頼性を持つATM網に接続するATM-PONシステムと、Ethernet信号を直接収容し経済化を重視するE-PON(Ethernet-PON)がある。E-PONシステムには、10Gbps, 100Gbpsに加え、1Gbpsを収容するインタフェースを持つものがある。特にGbpsクラスを加入者にサービスするGbE-PON(Gigabit Ethernet-PON)システムは、次期加入者システムとして期待されている。なお、APONやEPONも国際標準化が進められている。

## 3. フォトニックネットワークを支える技術

図3に、フォトニックネットワークを支えるシステム技術とキーデバイス/コンポーネント技術のロードマップ(研究開発目標)を示す。まず、幹線系ネットワークでは、特に光海底ケーブルシステムの10,000kmを想定した超長距離大容量伝送の場合、2005年には10Tbps, 2008年以降には20Tbpsが実現し、現在の光ファイバを用いた限界値30Tbps・Mmに迫る大容量化が達成されると考える。この大容量化は、時分割多重(Time Division Multiplexing: TDM)方式とWDM方式との最適な組み合わせで実現される。TDM方式では、2004年以降に40Gbpsが、2007年以降に80Gbpsないし160Gbpsが開発される。これと独立にWDM方式では、エルビウムドープファイバ増幅器(Er-Doped Fiber Amplifier: EDFA)の利得帯域のうち、2005

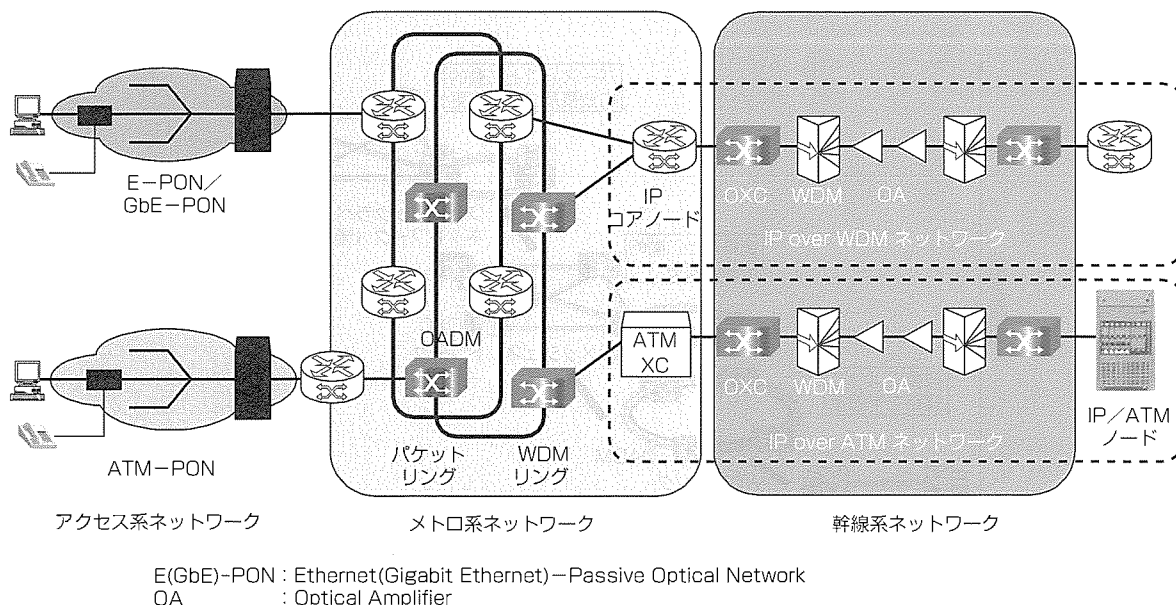


図2. ネットワークモデル

年代	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
幹線系ネットワーク <TDM方式>	640Gbps/1Tbps		2T/5Tbps		10Tbps		20Tbps	
<WDM方式>	TDM(10Gbps)		TDM(20G/40Gbps)		TDM(80G-160Gbps)			
キーデバイス/ コンポーネント	(64波) 20nm	(100波) 30nm	C+L帯(100波) 80nm	C+L+S帯(250波) 100nm	E+C+L+S帯(500波) 200nm			
キーデバイス/ コンポーネント	EA光変調器(40Gbps)		EA光変調器集積LD(40Gbps)		MZI光変調器(80Gbps)		モード同期パルスLD光源(40Gbps) ソリトン光源(160Gbps)	
キーデバイス/ コンポーネント	トランスポンダ(40Gbps)		分散イコライザ 偏波分散イコライザ		光遅延イコライザ			
キーデバイス/ コンポーネント	980nmポンプLD							
メトロ系ネットワーク <ノードシステム>	波長パススイッチング (波長変換はO/E変換)		フォトニックラベルスイッチング(光バーストスイッチング)					
<伝送系>	10Gbps×128波		10Gbps×250波		10Gbps×500波			
キーデバイス/ コンポーネント	波長ロッカー付き LDモジュール 光スイッチ(32×32)		波長可変LD		集積化多波長LD			
キーデバイス/ コンポーネント	波長変換モジュール							
アクセス系ネットワーク 事業所向け	1-100Gbps-ATM/Ether		10Gbps-ATM/Ether/WDM					
家庭向け	100Mbps-MC/E-PON		100Mbps-GbE-PON/WDM-PON					
キーデバイス/ コンポーネント	アンクルド直接変調DFB-LD PONモジュール 10Gbps Ethernetモジュール/トランスポンダ							

図3. フォトニックネットワーク技術のロードマップ

年以降にC帯+L帯+S帯の100nm帯域幅に250波を、また2007年以降にE帯+C帯+L帯+S帯の200nm帯域幅に500波を多重する技術が開発される。

このほか、低雑音光増幅器や分布ラマン増幅、狭帯域な光変復調、誤り訂正符号、分散マネジメントなどの技術が開発される。また、キーデバイス/コンポーネントとして、光変調器、トランスポンダ、各種イコライザ、高出力なポンプLD(Laser Diode)などが開発される。

次に、メトロ系ネットワークでは、特にメトロ・コアネットワークのノードシステムとして、波長パススイッチング、光バーストスイッチングと開発されていくであろう。各ノードは、光スイッチ部と波長変換部とから構成され、特に波長変換部に関しては、波長パススイッチングではE/O変換型が、光バーストスイッチングでは光処理を用いた波長変換素子が用いられる。伝送系では、10Gbpsをベースにして、2002年に128波、2005年以降に250波、2008年以降に500波を多重するシステムが開発される。そのほか、光監視制御技術、波長パスシグナリング技術、光バーストルーティング技術なども開発される。また、キーデバイス/コンポーネントとして、光スイッチ、波長ロッカー付きLDモジュール、波長可変LDなどが開発される。

最後に、アクセス系ネットワークでは、事業所向けであるFTTBシステムとして2003年には1~10GbpsベースのIP over ATMやEthernetが、2005年以降に10GbpsベースのIP over ATMやEthernetが開発される。また、家庭向けであるFTTHシステムでは、初期導入コストの有利なポイント-ポイントのMC(Media Converter)方式、ファイバリソースを有効活用する100MbpsベースのPON方式の

E-PONシステムやGbE-PONシステムが開発される。また、キーデバイス/コンポーネントとして、アンクルド直接変調DFB-LD(Distributed Feedback-LD)、10Gbps Ethernetモジュール/トランスポンダなどが開発される。

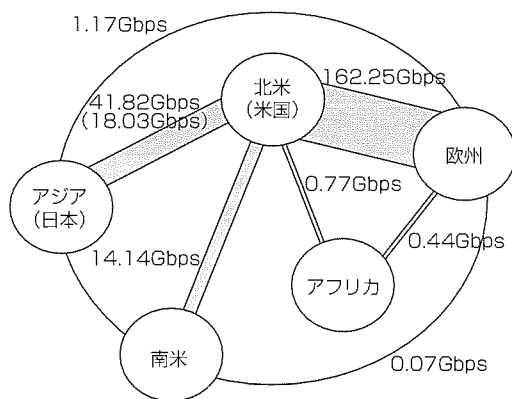
#### 4. 将来展望

##### 4.1 市場動向

海底幹線系では、図4に示すように、世界の通信トラフィック量は、圧倒的に北米-欧州間で多く、北米-アジア間の約4倍、アジア-欧州間の実に約140倍とアンバランスである<sup>(45)</sup>。これに対し、世界の貿易流通は、北米、欧州、アジアの3極間でほぼ均衡している。今後、情報流通の観点から、我が国がアジア諸国と連携して世界の情報拠点(ハブ)を目指す政策<sup>(46)</sup>の推進や、中国を始めとするアジア諸国のブロードバンド化援助の強化などにより、今後大きく市場が伸びるものと考えられる。一方、陸上幹線系では、米国において、1990年代後半ブロードバンド化の急展開を見込んで光ファイバへの投資ブームが起こり、設備過剰に陥った。しかし、我が国においては、米国ほどの過剰投資はなく、またe-Japan戦略に沿って最近ADSLなどアクセス系ネットワークのブロードバンド化が急激に進展するのに対応して、陸上系IPバックボーンネットワークの増強需要が増加しつつある。この流れは、FTTB/FTTHの本格的な導入と魅力ある動画コンテンツ等の流通が増加するのに伴い、ますます加速されるものと考えられる。

##### 4.2 技術動向

光通信システム関連では、伝送路の大容量化に向けて分散マネジメントをベースとする光伝送路技術、光増幅中継



( )の数値は日米間のトラフィック量

図4. 世界の通信トラフィック

技術、偏波分散補償や遅延等化技術、周波数の利用効率を高める光変復調技術と誤り訂正技術などのキーとなる要素技術にますます磨きがかかると考える。さらに、ノードにおける処理速度の高速化に向けて、光パーストスイッチングや光パケットスイッチング技術、波長変換技術など中長期的な観点での開発が進展すると考える。

一方、デバイス／コンポーネント関連では、幹線系においては、40Gbps及びそれを超える超高速な光変調器やパルス光源、分散や遅延イコライザ、高出力なポンプLDなどが、またメトロ系においては、中規模なマトリックス光スイッチ、波長可変LD、波長変換モジュールなどが次々と実用化されると考える。また、電子デバイスにおいては、10Gbps以上の動作が可能なSOI(Silicon On Insulator)技術を用いたCMOS-ICが実用化され、従来のGaAs(ガリウムヒ素)などの化合物半導体やバイポーラ素子で製品化された場合に比べて、大幅な低消費電力化・高機能化が実現される。これらの光・電子デバイス群により、10Gbps以上の光インタフェース回路の小型化・高機能化が図られ、ト

ータルシステムの低コスト化が実現できる。今後、次世代の光集積回路デバイスを実現するブレイクスルー技術として、フォトニック結晶デバイスやフォトニックファイバなどの研究開発が進展するものとする。

## 5. むすび

通信インフラ市場においては、まさしく冬の時代を迎え、これを乗り越える苦しみを味わっている。しかし、今後、ネットワークに動画ストリームの流通可能な大容量モバイル端末等が多数接続され、ネットワークが隅々まで行き渡ったユビキタスネットワーキング環境の実現の要求がますます強くなり、トラフィック需要は指数関数的に増加すると考える。このような社会的要求にこたえるために、この特集で述べる三菱電機のフォトニックネットワークに関するシステム技術及びデバイス／コンポーネント技術の研究開発の成果が、次世代システム構築にブレイクスルーをもたらすことになると確信する。

## 参考文献

- (1) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：e-Japan 戦略 (2001-1)
- (2) 総務省：全国ブロードバンド構想—世界最先端のIT国家の実現に向けて— (2001-10)
- (3) 光産業技術振興協会：光テクノロジーロードマップ—情報通信分野—(2002年改定版) (2002-3)
- (4) 超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会：フォトニックネットワーク革命 (2002-1)
- (5) Telegeography社：Packet Geography (2002)
- (6) 第11回IT戦略本部会合資料：世界の情報拠点(ハブ)を目指して—国際的な取組みの強化— (2002-4)



# 光海底ケーブルシステム技術

中川潤一\* 浅川栄道\*  
尾崎陽二郎\* 加藤雅敏\*  
仲川栄一\*

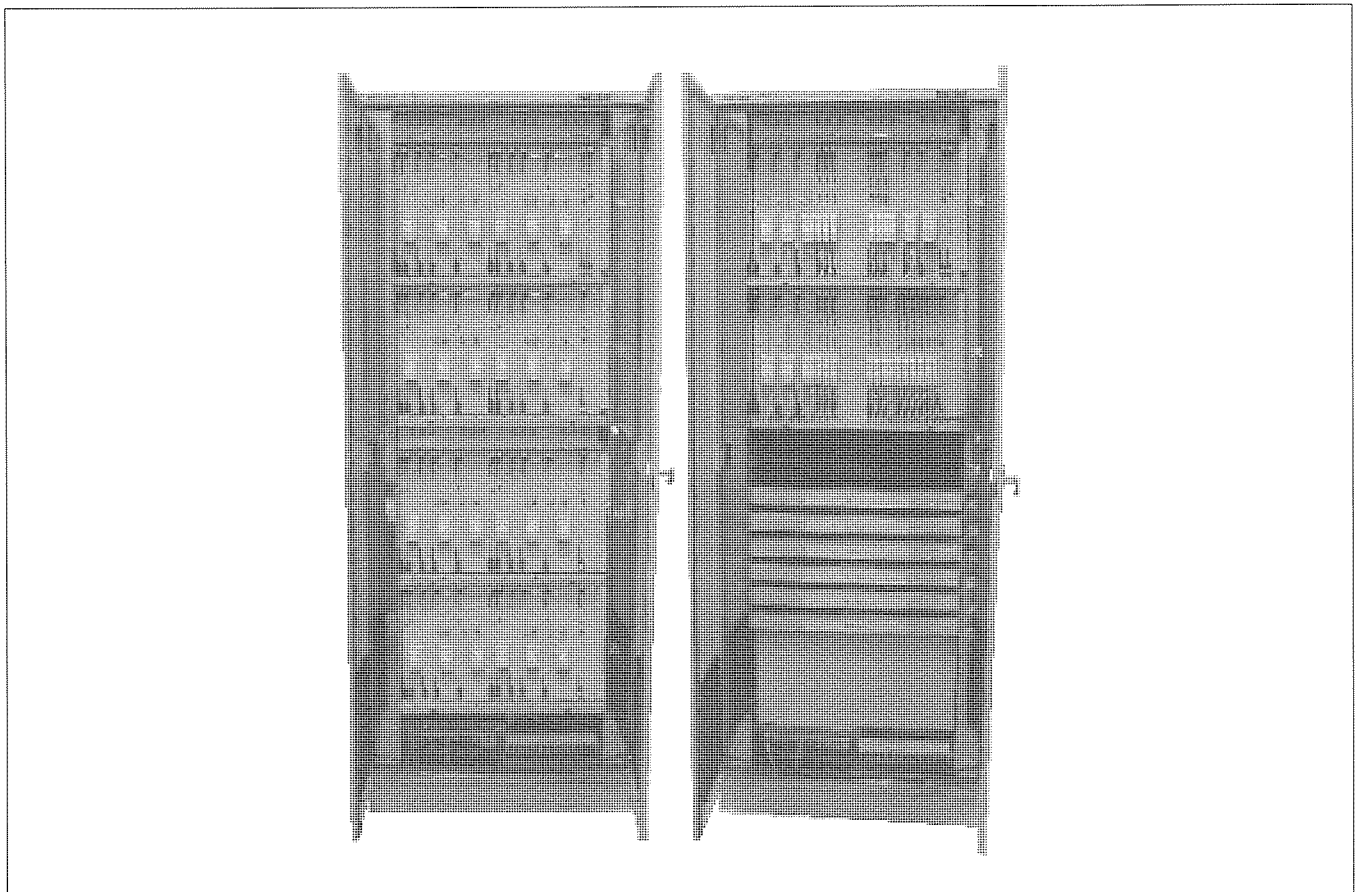
## 要 旨

インターネットの急速な普及による国際間通信の容量増大に対応するため、近年、波長多重伝送方式の適用による経済的な大容量化が進められ、光海底ケーブルシステムにおいても、伝送速度10Gbpsをベースとした波長多重伝送方式の適用による大容量化が進んでいる。

三菱電機では、1ファイバ当たりの伝送容量960Gbps、1システム当たりの最大伝送容量11.52Tbpsに対応した

10Gbps波長多重光海底ケーブルシステム用光海底中継器と10Gbps陸上端局装置を開発した。

本稿では、製品の構成、特長について述べるとともに、大容量化・小型化・低コスト化を図るために適用した光インタフェース技術、誤り訂正技術、保守運用性を高めるためのインテリジェント化技術について述べる。



## 10Gbps波長多重光海底ケーブルシステム用陸上端局装置

波長多重端局装置は、陸上装置クライアントとのインタフェース、誤り訂正、一波長ごとの光送受信を実現するLTU (Line Terminating Unit) と、分散補償と波長多重/分離を実現するWTU (Wavelength Terminating Unit) で構成される。LTUは一架当たり8波長の高密度実装を実現した。

1. ま え が き

国際電話需要の増大に加えインターネットの急速な普及による国際間通信の容量増大に対応するため、10Gbps波長多重光海底ケーブルシステム用海底中継器と10Gbps陸上端局装置の開発を行った。図1に10Gbps波長多重光海底ケーブルシステムのシステム構成を示す。システムは、10Gbps陸上端局装置と光海底中継器から構成され、陸上端局装置において波長の異なる複数の10Gbps光信号を波長多重する。波長多重された光信号は、高信頼性を持つ光海底中継器で一括増幅され、9,000km以上の伝送距離を実現する。今回新たに開発を行った光海底中継器では、将来の容量増大を見込み、高出力980nm励起レーザーダイオードの適用によって10Gbpsの光信号を最大96波まで波長多重可能な広帯域特性と、最大12サブシステムが実装可能な大型筐体(きょうたい)の開発を行った。また、陸上端局装置は、誤り訂正能力を大幅に向上させた第二世代FEC(Forward Error Correction)技術による伝送品質の向上と、1架当たり8波長が実装可能となる高密度実装技術によって省スペース化を実現した。

2. 広帯域光海底中継器

2.1 装置構成

図2に今回開発を行った8FP(Fiber Pair)実装構成時の光海底中継器の外観を示す<sup>(1)(2)</sup>。圧力筐体の大型化により、従来は4FPであった実装構成を最大12FP構成まで実装可能とし、一中継器での最大伝送容量11.52Tbps(1FP当たり0.96Tbps=10Gbps×96波)を実現した。

図3に光海底中継器のサブシステム構成を示す。光海底中継器は、最大12のサブシステムが収容可能で、一つのサブシステムは上り/下り一対のファイバペアの光信号を増幅する構成となっている。光海底中継器は、EDF(Erbium Doped Fiber)、励起LD(Laser Diode)モジュール、励

起LD駆動回路、波長多重カプラ、光アイソレータ、光カプラ、利得等化器、監視制御回路で構成される。光海底中継器への給電は、陸上局から直流給電され、光海底中継器内の電源回路を通じて各サブシステムに供給される。今回開発を行った光海底中継器では、10Gbps超長距離伝送を実現するに当たって、励起LDモジュールは1480nm励起LDモジュールに比べて低雑音化を図ることができる980nm励起LD4台を適用した。また、4台の980nm励起LDモジュールは、その光出力を合分波して冗長化を図っており、4台中2台の励起LD出力が停止した場合でも、システムの伝送特性に影響を与えない高信頼度設計となっている。

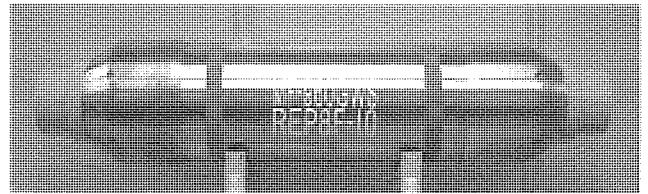


図2. 光海底中継器の外観

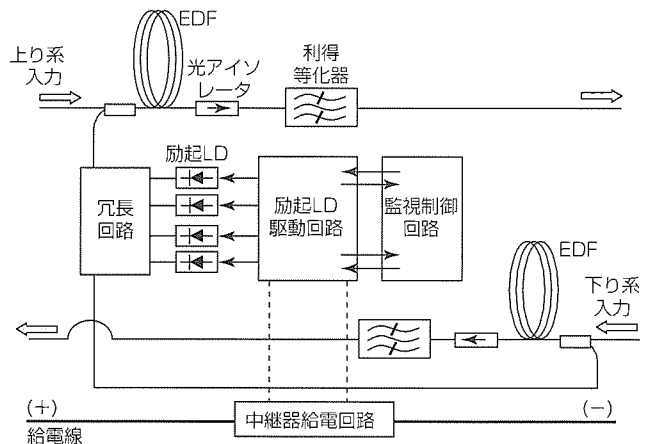


図3. 光海底中継器のサブシステム構成

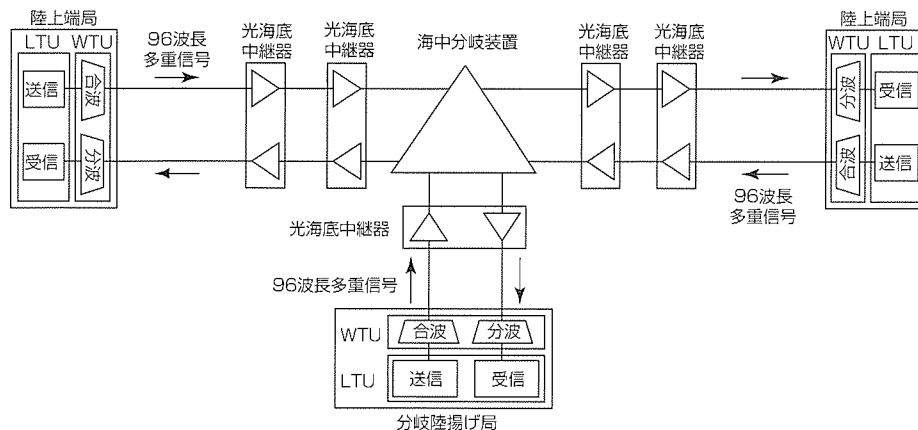


図1. 10Gbps波長多重光海底ケーブルシステム構成

また、監視制御回路として、システム運用下での中継器状態をリアルタイムでモニタ可能な監視制御機能(Supervisory functions: SV)を具備した。この監視制御機能により、中継器入出力光パワー、励起LDモジュール電流、励起LDモジュール光出力がモニタ可能である。

一方で、伝送容量拡大のために中継器の高出力化を行うと、給電電力が線形に増加してしまう。この給電電力の増加はWDM(Wavelength Division Multiplexing)伝送方式の一つの制限要因であり、特にTbps級の伝送システムにおいてはその問題がより顕著となる。この海底中継器では、980nm励起LDにおける高効率化と温度調整素子が不要となる励起LD安定化技術によって低消費電力化を図っている。また、LD駆動回路及びSV回路における主要機能ブロックのIC化と回路方式の工夫により、高信頼性と低消費電力を両立している。これらにより、サブシステム当たりの消費電力を9.8W以下と低消費電力化を達成している。

## 2.2 波長多重増幅特性

96波長もの光多重伝送システムを実現するためには、光海底中継器の広帯域化・高出力化・低雑音化が不可欠である。今回開発を行った光海底中継器では、新たに開発を行った高出力980nm励起LDモジュールの適用と利得等化素子(Gain Equalizer: GEQ)としてエタロンフィルタを使用することで、30nm(1540~1570nm)以上の広帯域特性を実現した。併せて、光出力+15dBm以上、雑音指数5.0dB以下を達成している。図4に10Gbps信号を96波長多重した信号光の中継器に入力した場合の中継器光出力スペクトルを示す。広帯域にわたって利得波長特性が平坦(へいたん)化された良好な増幅特性が得られた。

また、更なる大容量化に対応するための次世代向け超広帯域光海底中継器の開発も行っている。従来の光海底中継器では、長周期ファイバグレーティングやエタロンフィルタを利得等化素子として使用していたが、EDFの複雑な利得波長依存性を完全に打ち消すことは困難であり、これらの光デバイスによる利得等化帯域は30nm程度にとどまっていた。更なる伝送帯域の拡大にはより高精度の利

得等化素子が不可欠であり、新たにスラント型短周期ファイバグレーティング(Slanted Fiber Bragg Grating: SFBG)<sup>3)</sup>を適用した。スラント型短周期ファイバグレーティングは、短周期型ファイバグレーティングの持つ高精度損失波長特性の利点と低反射減衰量(-27dB以下)を両立した次世代デバイスであり、海底ケーブルシステムに適用可能な長期信頼性も確認されている。図5にSFBGを利得等化器として適用した次世代光海底中継器の試作評価結果を示す。36nm(1531~1567nm)にわたって利得偏差0.1dB以下の高精度利得等化を達成している。同時に、出力+16.3dBm以上、雑音指数5.0dB以下と良好な増幅器特性を確認した。

## 2.3 実装技術

最大水深8,000mの海底に敷設される光海底中継器の耐圧筐体は、耐海水腐食性に優れたベリリウム銅材料製の耐圧シリンダ、端面板及び海底ケーブルジョイントと接続するためのジョイントリングで構成されている。光ファイバ及び給電線は、端面板に設けたフィードスルーによって気密性を確保して耐圧筐体内に導入している。また、耐圧シリンダ内には放熱・緩衝構造を介して中継器回路を実装している。

今回新たに最大12サブシステムが実装可能な耐圧筐体を開発するに当たって、従来の4サブシステム型に対して大幅な実装設計の変更を実施した。耐圧シリンダ外径は、今後のサブシステム増加と敷設船などの敷設設備を考慮し、φ320(従来φ216)とした。また、水深8,000mの水圧(78.5MPa)が負荷された場合に発生する応力がベリリウム銅材料の弾性限度内応力(588MPa)以下となるよう、各部の寸法を決定した。特に端面板については、高密度実装24心光ファイバフィードスルーの開発、三次元FEM解析によるフィードスルー位置の最適化による薄肉化など、内部実装容積の拡大と中継器の軽量化を図った(図6)。

また、サブシステムの形状に関しても、従来の角形から円筒形に変更し、光ファイバの曲げ径を確保する必要がある光学部品の収納に最適な形状とした。中継器回路ユニッ

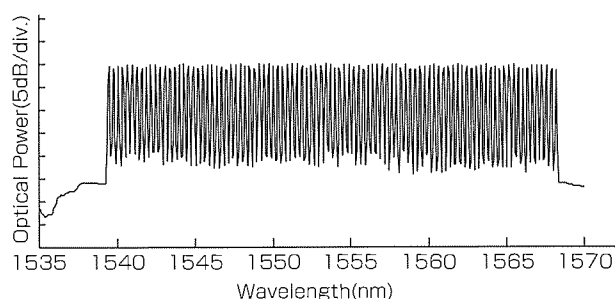


図4. 96波長多重信号一括増幅時の光海底中継器出力

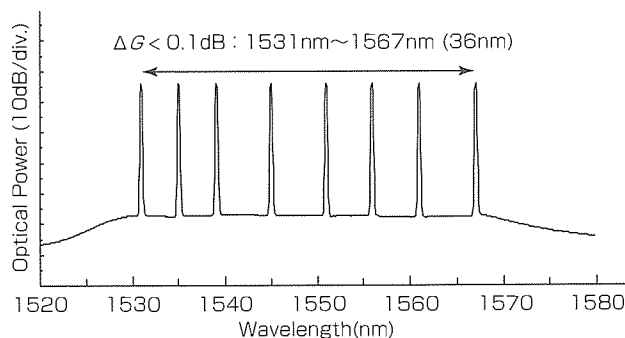


図5. 次世代光海底中継器出力

トは円筒形状サブシステムを互いにボルトで連結することで得られ、システム構成の自由度を高めた。さらに実装面では、電気部品と光学部品を物理的に分離して実装することにより、組立て・試験時間の短縮、製造途上での光学部品の保護強化による品質の向上を図った。消費電力の増加によって課題となった放熱特性については、試作結果をシミュレーションへフィードバックすることにより、部品の配置、フレーム構造を最適化し、従来と同等の内部温度を実現した。

### 3. 高密度実装光端局装置

#### 3.1 装置構成

陸上端局装置は、クライアントインタフェースである陸上ネットワークと光海底ケーブルシステムとを接続する装

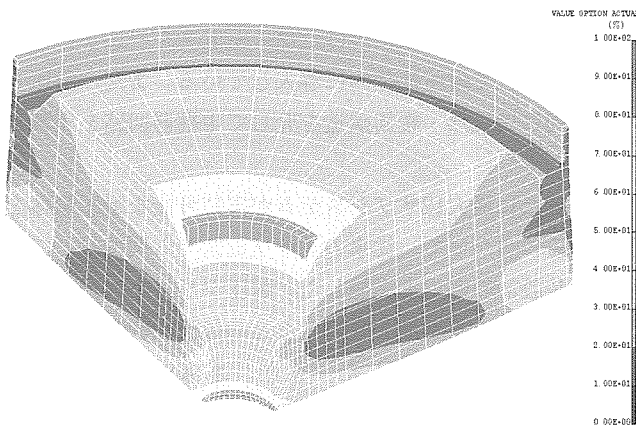


図 6. 端面板三次元FEM解析結果

置であり、電気信号を各波長に対応した光信号に変換するLTU、複数の光信号を合分波して海底ケーブルへの送受信を行うWTU、伝送路障害・伝送路品質・設備障害の監視を行うMC(Maintenance Controller)から構成される。また、光端局装置は、伝送品質状態・装置状態を監視する保守端末を接続することが可能であり、設備の保守運用性を向上させることができる。図7に端局装置のシステム構成例を示す。

#### 3.2 10G光伝送端局装置(LTU)

LTUは、クライアントインタフェースを収容するSTM IF部、誤り訂正符号の付加と受信信号の誤り訂正を行うFEC部、波長多重するために波長変換を行い、また、超長距離伝送を実現するためRZ(Return to Zero)変換機能、位相変調機能を持つLINE OS/OR部から構成される。LINE OS/OR部では10Gbpsの超長距離伝送を実現するために電界吸収型外部変調器を用いたRZ変調方式を採用し、FEC部では誤り訂正能力を向上させた第二世代FECを採用することで伝送品質を大幅に向上させた。これに加えて、デバイスの集積化・低消費電力化を図り、従来の2倍の1架8波長(80Gbps)実装を実現している。また、保守性・操作性の向上として、クライアント信号受信部にビットエラーモニター機能を付加し、障害時の切り分け作業の軽減、複数波長の選択可能なチューナブルLDの採用による保守部品の低減、光コネクタなどのオール前面アクセスを採用した。

#### 3.3 波長多重分離装置(WTU)

WTUは、波長多重分離を行う合分波機能部、波長多重光を一括して増幅する光増幅部、長距離伝送によって累積

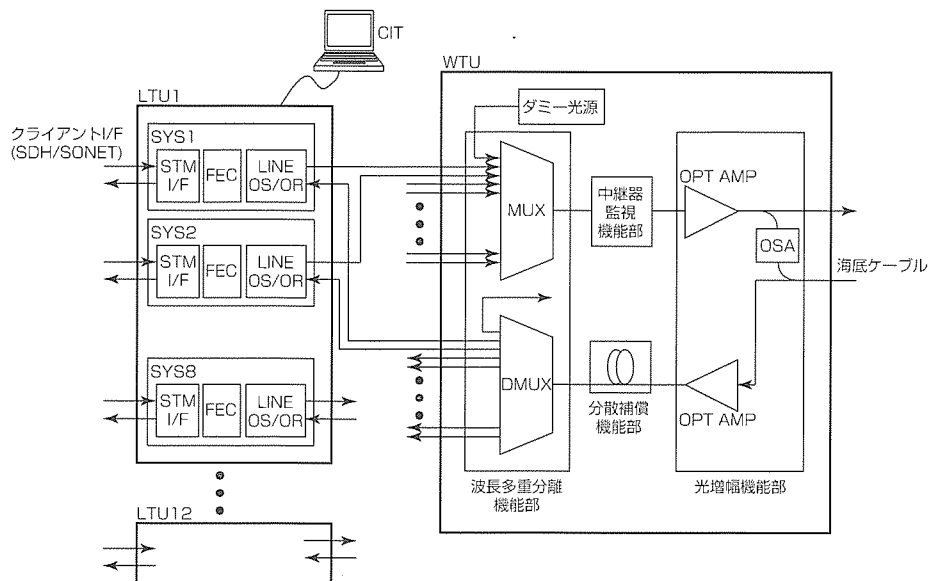


図 7. 光海底ケーブルシステム端局装置のシステム構成例

された分散を補償する分散補償部、波長多重光のスペクトル形状を安定化させるダミー光出力部、中継器の監視を行うLME(Line Monitoring Equipment)とのインタフェース部である中継器監視機能部から構成される。96波もの光信号を限られた帯域に詰め込むためには、光増幅器の広帯域化と隣接チャンネル間クロストークの低減が不可欠である。光増幅器は、利得等化器によってEDF特有の波長利得依存性を平坦化した広帯域光増幅器を採用して30nmの広帯域化を実現し、また、チャンネル間クロストークの抑圧が不可欠であり、低挿入損失AWG(Arrayed Waveguide)と光フィルタをカスケード接続することによって隣接クロストークを抑制し、波長間隔0.3nmを実現した。

### 3.4 監視制御機能

#### (1) 保守端末(CIT)

CIT(Craft Interface Terminal)は、装置の状態モニタ、制御を行うパソコンベースの監視制御端末であり、各装置とLANで接続される。CITでは、運用上重要である伝送路障害、伝送路品質、設備障害の監視を行う一方、波長、出力光パワーなどの伝送パラメータを制御することを可能とし、局舎における保守運用性の向上を図った。

CITは、MCが利用できない場合(現地調整、障害時)の補助的な監視端末という位置付けだけでなく、カード交換、アップグレード作業時の調整支援端末として使用することによって、作業時間を大幅に短縮することを可能とした。

#### (2) MCインタフェース

LTU/WTUとMCとはLANインタフェースで接続され、OSIプロトコルスタックに準拠したQ3インタフェースで通信を行う。装置構成、警報情報などの監視制御情報は、MO(Managed Object)によって表現されており、オープン化に対応している。

#### (3) 局内監視装置インタフェース

LTU/WTUは、地気接点をインタフェースとして、装置や伝送路の状態を局内監視装置に出力する機能を持っている。局内監視装置では、LTU/WTUからの地気接点出力を受けて、ブザー鳴動や警報ランプ点灯を行う。

### 3.5 主要技術

今回開発を行った陸上端局装置に適用した主要技術について述べる。

#### (1) 光インタフェース

10Gbps超長距離光伝送を実現するには、光送受信部(OS/OR部)の高性能化が不可欠である。今回の開発では、小型化・低消費電力化も併せて実現するため、2.5Gbpsで実績のある電界吸収型外部変調器を使用した。図8にRZ光送信波形を示す。OS/OR対向のQ値として22.5dB以上の良好なQ値を達成した。また、波長多重数が96波長級のシステムでは、波長間クロストーク低減のために、送信光波長の高い安定度と、波長依存部品カード点数の削減が求め

られる。この光送信部には、5波長分をカバーできる波長ロッカー内蔵LDモジュールを適用することで、波長ドリフト $\pm 25\text{pm}$ 以下の高い安定度と、波長依存カード数の大幅な削減を同時に実現した。

#### (2) 誤り訂正技術

従来の海底ケーブルシステムでは、ITU-T G.975で規定されるリードソロモン符号RS(255, 239)を用いた誤り訂正符号が用いられてきた。しかしながら、近年の大容量化・長距離化によるQ値バジェット不足は逼迫(ひっばく)しており、FECの訂正能力の向上による伝送マージンの確保が不可欠であった。この装置では、リードソロモン符号RS(239, 223)及びRS(255, 239)を接続し、冗長度14%の誤り訂正符号を適用した第二世代FEC LSIを新たに開発した<sup>(4)</sup>。図9に第二世代FEC LSIの外観を、図10に誤り訂正能力を示す。G.975 FECに比べ訂正能力が約2 dB向上する良好な特性が得られており、1ファイバ当たり960Gbpsの超長距離伝送を可能とした。

#### (3) 小型化・低消費電力化技術

クライアント光インタフェースとしてMUX/DMUX内蔵のトランスポンダの採用、第二世代FEC LSIの開発、MUX機能内蔵NRZ/RZ変換モジュールの採用によって小型化・低消費電力化を図り、1架に8波長の高密度実装を実現した。

#### (4) インテリジェント化技術

波長数の増加に伴い、初期インストール時の調整作業(C&A作業)や波長増設時の再調整作業の長時間化・複雑化が懸念されており、これらの短縮化・簡易化が急務であった。これまでの装置では波長、各波長の光出力パワー、位相変調、受信しきい値などの伝送特性を左右するパラメータをLTU、WTU内でメカニカルに調整を行っていたが、これら調整箇所の電子制御化を進めることで、外部コンピュータからの遠隔自動制御を可能とした。この機能を活用することで、受信端で各波長の光SNRを一定にするプリエンファシス調整機能(図11)、受信波形に応じた最適な受信しきい値を設定する受信しきい値調整機能などの

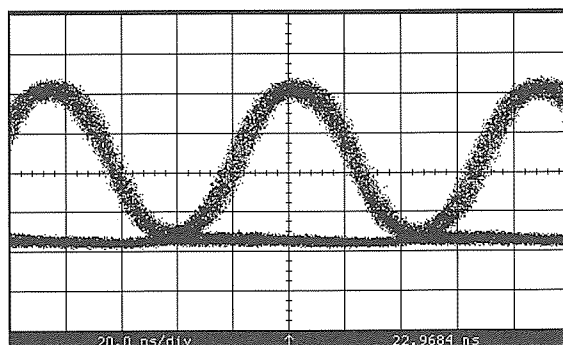


図8. 光送信波形



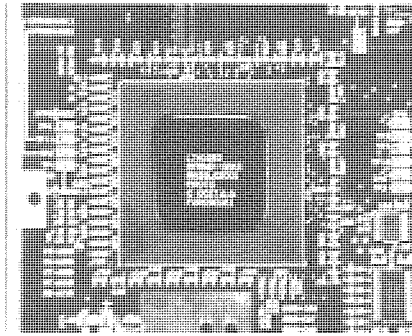


図9. 第二世代FEC LSI

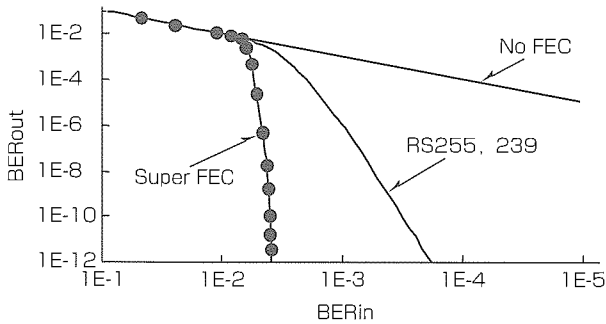


図10. 第二世代FEC誤り訂正能力

伝送品質調整を自動化し、C&A作業の省力化が可能となった。

#### 4. むすび

本稿では、今回開発を行った10Gbps波長多重光海底ケーブルシステム用光海底中継器と陸上端局装置の装置構成と主要技術について述べた。今後は、この開発で蓄積された要素技術をベースに、更なる波長多重数の増加に対応する光海底中継器、陸上端局装置を開発する予定である。

なお、この開発に際して多大なご指導を賜ったKDDI海

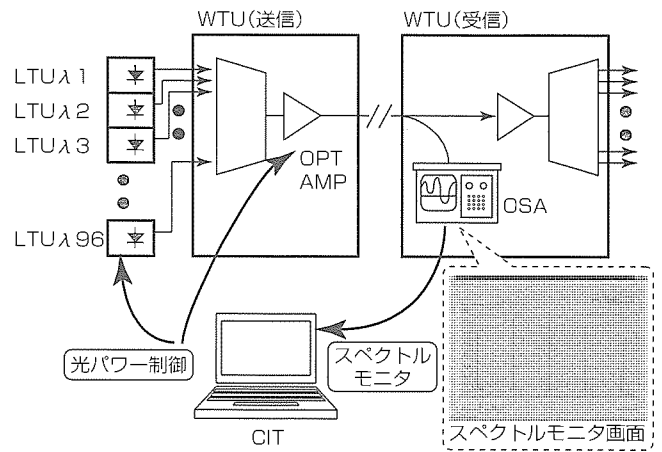


図11. オートプリエンファシス調整機能

底ケーブルシステム(株)の関係各位に感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- (1) Asakawa, T., et al.: 8 Fiber-pair Submarine Repeater, SubOptics2001, P4.1.4 (2001)
- (2) Kurosawa, Y., et al.: OSW-IV Repeater for DWDM Submarine Cable System, SubOptics2001, T4.2.1 (2001)
- (3) Nihonyanagi, A., et al.: Wide Band and Highly Reliable Gain Flattening Filter using Slanted Fiber Bragg Grating, OECC2002, 12D1-2 (2002)
- (4) Mizuochi, T., et al.: Transparent Multiplexer Featuring Super FEC for Optical Transport Networking, SubOptics2001, P4.2.3 (2001)

# 陸上幹線・メトロ伝送システム技術

下笠 清\* 上村有朋\*  
 森田俊哉\* 大田 聡\*  
 西尾 猛\* 加治屋 哲\*\*

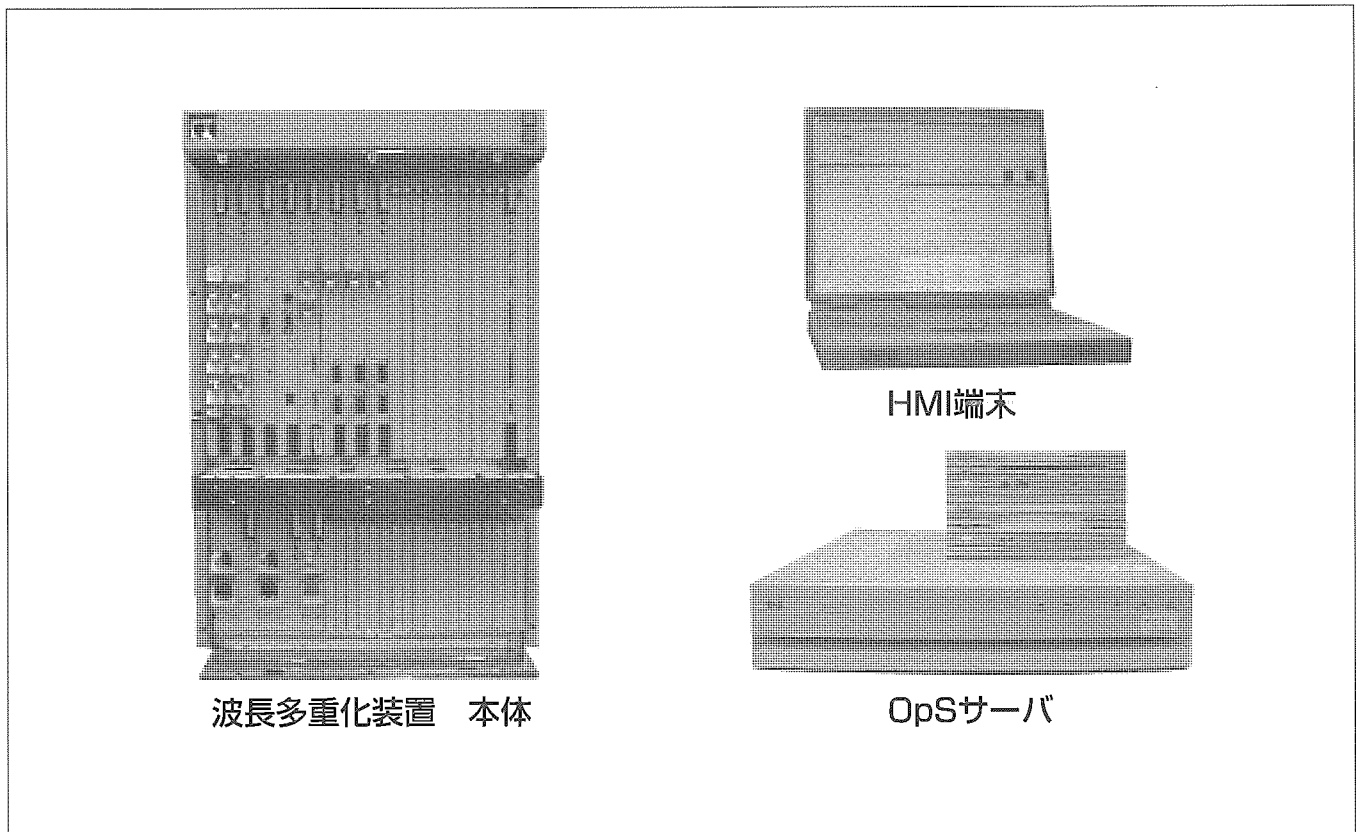
## 要 旨

インターネットの急激な普及と映像コンテンツサービスの立ち上がりとともに、アクセス系ネットワークのブロードバンド化が進み、国内外のIP(Internet Protocol)データトラフィックが急伸している。これらのトラフィック急伸の需要に対応するバックボーンネットワークには、経済性に優れ長距離・大容量伝送を実現する波長多重化伝送技術(Wavelength Division Multiplexing: WDM)が普及している。また、近年は、ブロードバンド化されたアクセス系ネットワークと大容量化されたバックボーンネットワークを接続するメトロポリタンエリアネットワーク(MAN)がボトルネックとなり、国内外キャリアはこのMANの大容量化を実現するためにWDM装置へ投資の機運にある。

三菱電機では、キャリアネットワーク用として最大伝送

容量400Gbpsに対応した波長多重化装置を開発した。400Gbpsの伝送容量は、光ファイバ伝送路に10Gbpsの伝送容量を持つ光伝送チャネルを異なる波長を最大40波長まで多重することで実現している。この装置は、様々なインタフェースを効率良く収容する必要があるMANに適用するキャリアレベル品質の装置であるとともに、この装置をベースに安価に長距離・大容量伝送が要求される幹線バックボーンネットワークに適用できるように設計されている。

本稿では、製品の構成と特長について述べるとともに、小型化・コスト低減・信頼性向上を図るために適用した光通信技術、プラグ&プレイを目指し保守運用性を高めるためのOA&M(Operation Administration and Maintenance)技術について述べる。



## 波長多重化装置“MF-80GWL”

波長多重化装置MF-80GWLは、ルータ、SDH(Synchronous Digital Hierarchy)などのインタフェースを波長多重し伝送する波長多重化装置と伝送距離を延伸するためのアンプ装置、及びネットワーク管理を実現するNE-OpS(Operation Systems)から構成される。波長多重化装置は、19インチ標準ラック搭載型で、1架に32波まで実装可能である。プロテクション機能はUPSR(Uni-directional Path Switched Ring)をサポートしている。

## 1. ま え が き

近年のインターネットデータトラフィックの急増に伴い、MANやバックボーンネットワークに適用する伝送装置には、大容量化、低コスト化、様々なインタフェース種別への対応、及び保守運用性の向上が強く求められている。特に伝送路を複数チャンネルで共用するWDM技術は、ダークファイバなどの伝送路資産を有効に活用し経済的なネットワーク構築を行う上で、欠かせない主要技術となっている。

当社は、陸上幹線及びメトロ伝送用に、SDH信号及びイーサネット信号を最大40波長まで多重する波長多重化装置を開発した。この装置は、多様なインタフェースを効率良く収容するとともに、各種自動調整機能によってネットワークの保守運用性を高めたキャリアレベルの品質を備えた装置である。

本稿では、この波長多重化装置について製品の構成と特長を紹介し、低コスト化と高信頼化のために適用した光技術と、保守運用性の向上のためのOA & M技術について述べる。

## 2. システムの構成・特長

### 2.1 システムの構成

このシステムは、波長多重伝送装置(WDM装置)、線形中継装置(1R-REP(Reshaping-Repeater))及びネットワーク管理装置で構成される伝送容量2.5Gbps/10Gbps×40波の波長多重伝送システムであり、Point to Point及びRingトポロジーネットワークを提供する(図1)。

### 2.2 システムの特長

#### 2.2.1 長距離伝送

このシステムはC帯とL帯の両方に対応しているため、SMF(Single-Mode optical Fiber)、DSF(Dispersion-Shifted single-mode optical Fiber)及び混在の伝送路に適用でき、SMF伝送路では720km、DSF伝送路では480kmの再生中継区間長伝送の性能を持っている。また、3R再

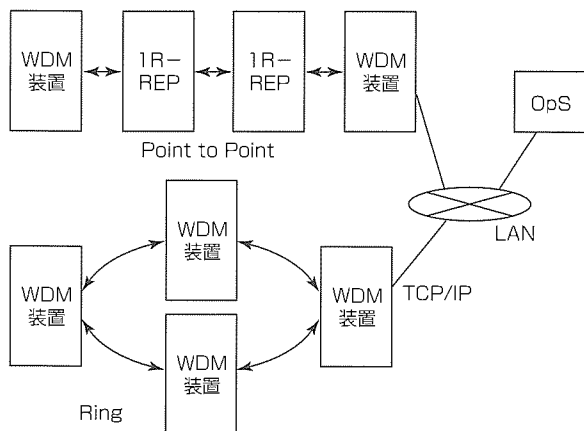


図1. 波長多重伝送装置のネットワークトポロジー

生(等化増幅、識別再生、リタイミング)中継の併用により、更に伝送距離を長距離化することができる。このシステムの開発に際して長距離伝送実現のために採用した主な技術を下記に記す。

#### (1) プリエンファシス機能

光増幅器の多段中継において非線形ペナルティとS/N劣化の影響を抑制するため、各波長の光送信器の出力レベルを自動調整する。

#### (2) 受信閾(しきい)値最適化調整機能

光増幅器で発生する雑音状態に応じて、各波長の光受信閾値を最適値に自動調整する。

### 2.2.2 ネットワーク構築

このシステムは、キャリアの要求に対して柔軟に対応できるように、自由度の高い回線設計を提供する。主な特長を次に記す。

#### (1) 第二世代FEC(Forward Error Correction)

10Gbps伝送時はITU G.975に準拠したRS(255, 239) FECより強力な誤り補正機能を具備することで、2.5Gbps伝送時と同等の回線設計を可能とし、2.5Gbps/10Gbpsの混在収容を実現した。

#### (2) プロテクション機能

波長単位での冗長/非冗長混在が可能で、冗長構成時はUPSR方式のプロテクション機能によってネットワークの信頼性を向上した。

### 2.2.3 保守運用

このシステムでは、保守運用における作業負荷や人為的障害を抑制するため、下記の機能を具備する。

#### (1) OpS性能

OpSはサーバ+HMI(Human Machine Interface)端末で構成され、サーバ1台で128システム(256装置)の監視制御が可能である。また、上位インタフェースとしてSNMP(Simple Network Management Protocol)をサポートしている。

#### (2) プラグ&プレイ

建設時や増減設時に際して、前述のプリエンファシス機能・受信閾値調整機能をOpSからの一括遠隔制御で実現し、増設基板を実装するだけで、光レベルの調整作業、不要局舎への入局作業が不要である。

#### (3) 伝送路損失調整機能

ノード増減設に伴う伝送路損失変動や季節的又は瞬時的な伝送路損失変動を光増幅器内のVOA(Variable Optical Attenuator)が自動的に吸収し、光増幅器への入力レベルを安定化することで伝送品質を確保する。

#### (4) プロビジョニングツール

回線設計作業や保守作業における専門知識を不要とする回線設計ツール、シミュレーションツール、工事支援ツールを提供する。

### 2.2.4 機器・運用コスト低減

#### (1) 一心双方向伝送

1心の光ファイバで双方向の伝送を可能とし、ダークファイバ借用コストを1/2に低減した。

#### (2) 直接変調方式

各波長の光伝送には、外部変調方式に対して大幅なコスト低減が可能な直接変調方式を採用した。

#### (3) チューナブルLD(Laser Diode)の採用

波長に依存するトランスポンダ用品の予備用品に4波まで波長可変なチューナブルLDを採用し、予備用品を最大1/4に削減した。

### 2.3 システムの諸元

このシステムの諸元を表1に示す。このシステムは、従来基幹網で利用されてきたSONET(Synchronous Optical Network)・SDH信号に加えて、GbEや10GbEといったイーサネット信号を収容することで、データトラフィックの増加に対応している。

## 3. 光通信技術

### 3.1 適用技術

光伝送システムの伝送距離はより高度な技術を適用するほど長距離化が可能となるが、システムコストを低減するためには適用技術を必要最小限に抑えなければならない。このシステムは光送信器のコストを最小限に抑えるため、2.5Gbps伝送には直接光変調方式、10Gbps伝送には外部変調方式を適用した。低コストで高い伝送特性を実現するため、伝送ペナルティを低減するプリエンファシス技術、受信閾値調整技術、高ゲインFEC技術を適用した。これらの技術により、3R再生中継伝送なしに、SMF伝送路に対して8中継9スパン(720km)、DSF伝送路に対して5中継6スパン(480km)の伝送を実現する(いずれも区間損失25dBが相当として算出)。

### 3.2 使用波長帯域

このシステムは、光伝送路のファイバ種別やトラフィック量に柔軟に対応するため、C帯又はL帯の100GHzグリッドに配置された40波長を用いる。また、伝送路ファイバの敷

設と運用コストを低減するため、送受信に20波ずつを割り当てることで1本のファイバで双方の伝送(一心双方向伝送機能)を行える構成とした。

### 3.3 プリエンファシス

線形多段中継伝送では、光増幅器の波長偏差や光部品の波長特性が累積して波長間でレベル偏差が生じるため、条件の悪いチャンネルでは非線形ペナルティやS/N劣化の影響を受けて伝送距離が制約される。今回のシステムはすべての波長チャンネルの伝送特性を確保し非線形ペナルティとS/N劣化を抑えるため、各波長それぞれの光送信レベルを最適化するプリエンファシス技術を適用した。光プリエンファシスでは、システム構成データ、伝送線路損失データ、中継装置やWDM装置内に保持している波長特性データなどの条件データを基に、ソフトウェア処置によって光送信レベルの最適値を自動的に計算して各光送信部へ設定する(図2)。この技術で、伝送マージンを拡大することで、SMF伝送路に対して8中継9スパン(720km)という長距離伝送を実現することができた。

### 3.4 受信閾値調整技術

多中継伝送システムでは、受信光SNR(Signal to Noise Ratio)が劣化するに従ってASE(Amplified Spontaneous Emission)-信号光ビート雑音によって波形のマーク側が徐々に広がり、最適な受信閾値がスペース側へシフトする傾向がある(図3)。今回のシステムは、光信号の雑音状態に応じて受信閾値を最適化して受信品質を最適に保ち、受

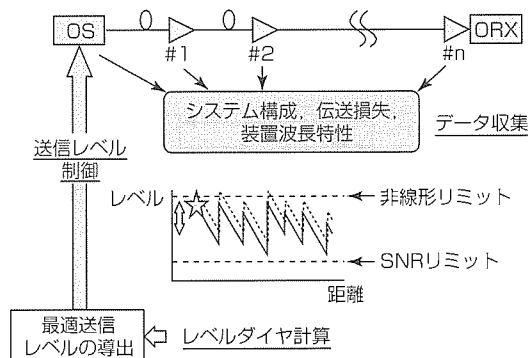


図2. プリエンファシス動作

表1. システムの諸元

項目	内容	備考
伝送容量	2.5Gbps/10Gbps×40波	FEC付加
使用波長帯	DSF: 1570.42~1607.47nm	L帯
	SMF: 1529.55~1564.68nm	C帯
波長間隔	100GHz	ITU-Tグリッド
局内IF	OC-3/STM-1(4ch/波収容)	ITU-T準拠
	OC-12/STM-4(4ch/波収容)	
	OC-48/STM-16(1ch/波収容)	
	OC-192/STM-64(1ch/波収容)	
	GbE(2ch/波収容)	IEEE準拠
10GbE(1ch/波収容)		
動作環境	DC-48V, 0~50℃	

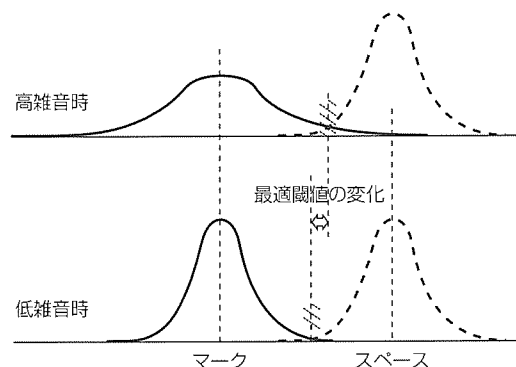


図3. 受信波形のアイヒストグラム

信関値の最適化は誤り訂正LSI(FEC)で受信誤りビット数をモニタしながら受信閾値を変化させることで実現する。ネットワーク建設時やノード増減設時には、伝送路状態に合わせた最適化をこの装置が自動的に行うため、簡易な保守作業によって高い伝送品質を実現することができる。

### 3.5 FEC技術

線形中継装置を用いて長距離伝送するこのシステムは、SMF伝送路で720km、DSF伝送路で480kmに達する伝送距離を実現するため、誤り訂正符号(FEC)を適用した。

このシステムは、多種多様なインタフェースを柔軟に提供し将来的な拡張性を確保するため、2.5Gbpsチャンネルと10Gbpsチャンネルを混在させて合計40波長まで収容する。速度が混在したシステム設計を自由に行うためには、2.5Gbpsチャンネルと10Gbpsチャンネルの線形中継間隔及び最大伝送距離などの回線設計条件を一致させることが望ましい。このシステムは、10GbpsチャンネルのFECとして2.5GbpsチャンネルのFECより符号化利得が約2dB高い高利得FECを適用し、各波長チャンネルの伝送速度に依存することなくシステム設計が可能な柔軟性の高い波長多重伝送システムを実現した。

### 3.6 プロテクション機能

このシステムは、波長単位でUPSR方式のプロテクション切換え機能を持ち、受信端で正常な経路の信号を選択する(図4)。波長チャンネルごとに冗長/非冗長設定することが可能であり、提供するサービスレベルに合わせた信頼性の高いネットワークを構築することができる。

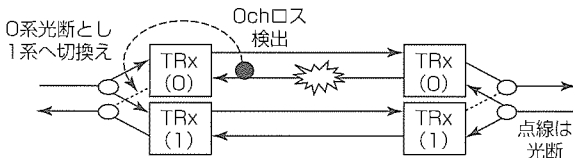


図4. プロテクション切換え機能

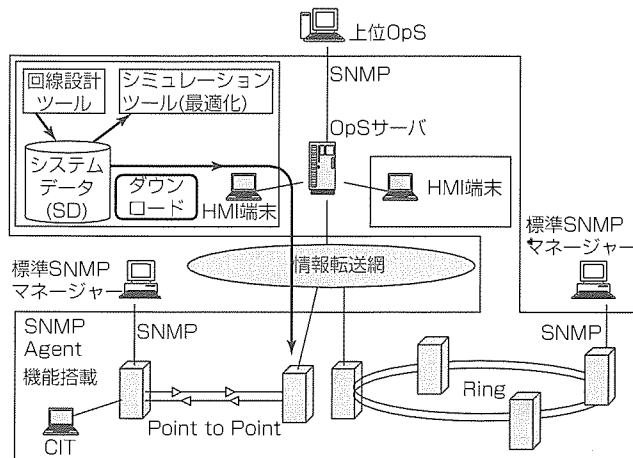


図5. 管理ネットワーク構成

## 4. 保守運用性技術

### 4.1 管理ネットワーク構成

保守運用のための管理ネットワーク構成を図5に示す。OpSは、サーバとHMI端末で構成し、最大256装置までであれば複数のネットワークを監視することができる。HMI端末は可搬形パソコンでも動作し、1台のサーバ当たり最大20台まで接続可能で、ネットワークの分散管理に対応している。サーバは冗長構成として最大4台まで並列稼働することが可能で、高い信頼性を実現する。

#### 4.1.1 監視制御インタフェース

この装置は、きめ細かな性能監視を提供する独自インタフェースでOpSサーバに接続する機能と、簡易な監視機能を提供する標準的なSNMPインタフェースでユーザーの標準SNMPマネージャーと接続する機能を備える。上位OpSとOpSサーバ間の接続には、SNMPインタフェースで提供する。

#### 4.1.2 OSC光による監視制御情報の伝送

この装置は、監視制御用のOSC(Optical Supervisory Channel)光を送受する機能を持ち、装置間で監視制御情報の伝送を行う。このため、1システムで1台のWDM装置が情報転送経路でOpSに接続されていれば、OpSからシステムすべての装置を監視制御することが可能で、情報転送網にかかるコストを低減できる。

### 4.2 建設時・増減設時の保守作業概要

建設時や増減設時の作業概要を表2に示す。装置設計は、自動化ソフトウェア技術の適用で、特別な技量を持たない保守作業でもミスなく作業できるように考慮した。

### 4.3 伝送路損失調整機能

一般に、線形多段中継伝送システムは中継利得の波長依存性が大きいと一部の波長チャンネルの品質が劣化し伝送距離が制約されるため、線形中継装置の波長依存性は利得等価器でできる限り抑圧している。また、光増幅器の利得や1波長当たりの入力レベルが変化すると利得の波長依存性が大きく変動するため、光増幅器の入力レベルを一定に保ったまま利得一定制御する必要がある。しかし、従来のシステム運用では、ノードの増減設や伝送路特性の経時変化

表2. 建設時、増減設時の保守作業の簡素化

ネットワーク建設・増減設時	
①装置設置・ファイバ接続	現地作業
②システムデータダウンロード	NE-OpS/CIT
③伝送路損失に応じたレベル調整	自動
④中継アンプゲイン自動調整	自動
⑤プリエンファシス・受信閾値調整	NE-OpS/CIT
⑥伝送品質確認	NE-OpS/CIT
⑦局内側機器との接続試験	現地作業
メンテナンス作業時	
①伝送路損失の経時変動に伴う調整作業	自動
②支障移転時の伝送路損失変化に伴う調整作業	自動



によって波長数や伝送路損失が変化するため、各線形中継装置の入力レベルを光アッテネータで個別に調整する必要があり、保守運用性が悪かった。

今回の装置は、線形中継装置内の可変光アッテネータを制御して自動的に伝送路損失の変化を補償し、1波長当たりの光増幅器入力レベルを一定に保つ機能を持っており、ノードの増減設やメンテナンス時の保守コストを削減する(図6)。また、伝送路ファイバへの応力などによる急激な伝送路損失変動に対しても、可変光アッテネータの高速制御によって光レベルを一定に保ち、安定した伝送品質を確保している(図7)。

#### 4.4 プロビジョニングツール

このシステムは、柔軟なネットワーク設計を迅速に行うため、伝送距離等のネットワーク情報を基に最適な回線設計を行う回線設計ツールとシミュレーションツールを提供した。

##### 4.4.1 回線設計ツール

回線設計ツールは、システム建設時や増減設時に必要となるトポロジ構成情報、回線構成情報、カード構成を示す構成情報、各種設定情報などのシステムデータをGUI(Graphical User Interface)で簡単に作成するためのツールである。このツールで作成されたシステムデータを装置にダウンロードすることで、構成の変更を容易に実現する。

##### 4.4.2 シミュレーションツール

シミュレーションツールは、回線設計ツールで作成したシステムデータを基に光伝送特性をシミュレーションし、適切なアンプ実装ノード位置や中継装置1R/3Rの必要性を検証する。このツールでのシミュレーション結果を回線設計にフィードバックすることで、最適な回線設計を容易に実現することができる。

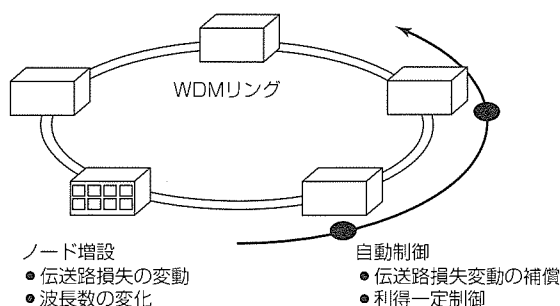


図6. ノード増設時の伝送路損失調整

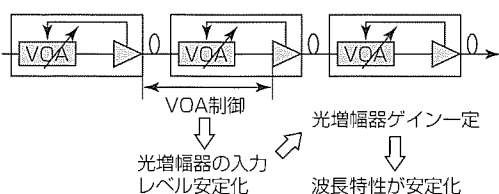


図7. 伝送路損失調整機能

## 5. 伝送試験結果

このシステムは、SMF伝送路に対して8中継9スパン(720km)、DSF伝送路に対して5中継6スパン(480km)の再生中継区間長伝送できる性能を持っている。伝送速度2.5Gbpsの伝送特性試験における伝送特性試験評価結果について示す。

### 5.1 SMF伝送試験結果

SMFでは、中継器を8台接続し、720km(80km/スパン)の再生中継伝送試験を行い、所望の特性を満足することを確認した。図8に試験構成を示す。

図9にプリエンファシスなしの受信スペクトル測定結果を示す。同様に、図10にプリエンファシス後の受信スペクトル測定結果を示す。このように、プリエンファシス機能により、光アンプの持つ波長特性を補正することで、受信レベルのチャネルばらつきを吸収し、非線形ペナルティ及びSNR劣化の影響を抑制する。

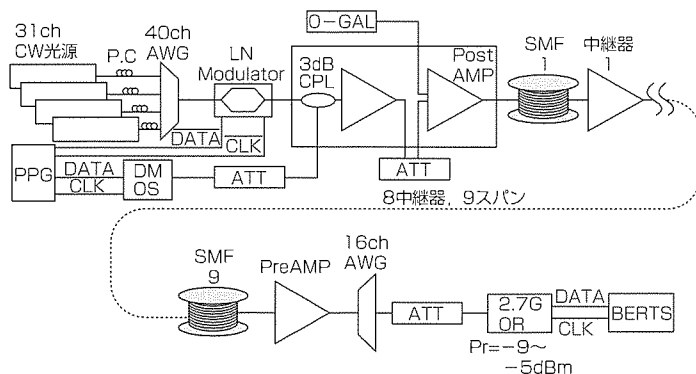


図8. SMF伝送試験構成

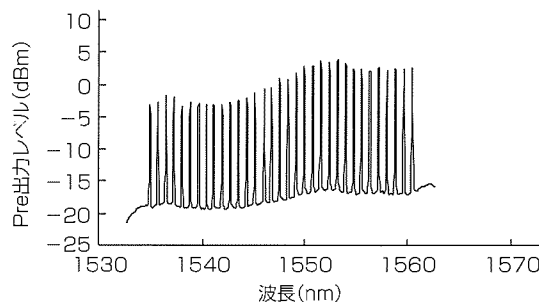


図9. 受信スペクトル(プリエンファシスなし)

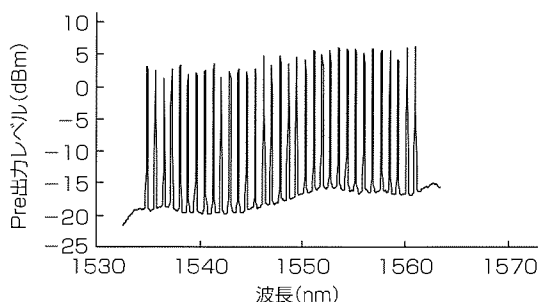


図10. 受信スペクトル(プリエンファシスあり)

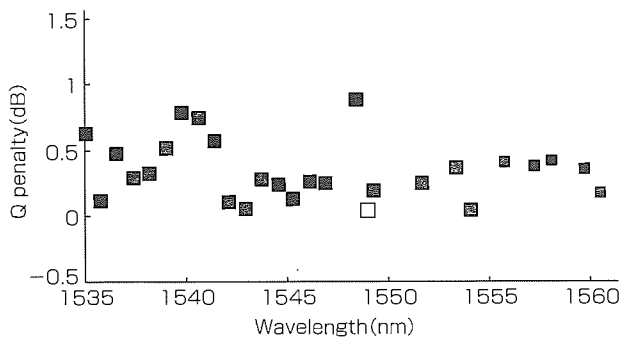


図11. Q値ペナルティ(SMF伝送)

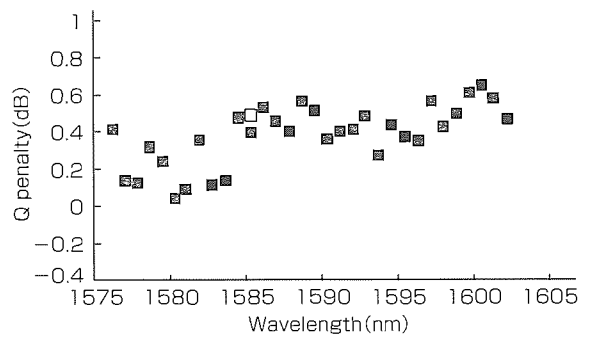


図13. Q値ペナルティ(DSF伝送)

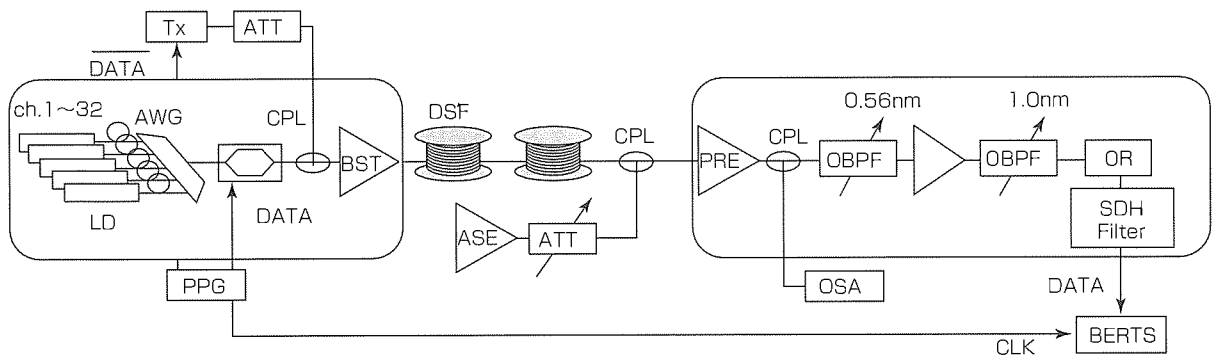


図12. DSF伝送試験構成

図11にQ値ペナルティの測定結果を示す。これは、設計仕様の受信SNRから求まる換算Q値と測定されたQ値を比較し、4光波混合などのペナルティを測定したものである。設計仕様である2.0dBに対し、1.0dB以内のペナルティであり、良好な特性が得られた。また、図中□データは、直接変調を用いた場合のペナルティである。変調方式によるペナルティの差は見られない。

## 5.2 DSF伝送試験結果

DSF伝送時においては、伝送路の零分散波長と使用波長帯域が近接するため、4光波混合に代表される非線形効果によるペナルティが発生しやすい。このシステムでは、L帯波長を用いることで、4光波混合によるペナルティを2.0dB以下となるよう抑圧している。

この試験では、最悪条件下での4光波混合によるペナルティを確認し、所望の特性を満足することを確認した。

図12に試験構成を示す。図に示すように、外部からASE雑音を付加することで、回線設計上の最悪SNRに設定している。また、4光波混合によるペナルティを最悪条件とするため、送信出力レベルを+4dBm/chに設定した。

図13にQ値ペナルティの測定結果を示す。設計仕様である2.0dBに対し、0.8dB以内のペナルティであり、良好な特性が得られた。また、図中□データは、直接変調を用いた

場合のペナルティである。変調方式によるペナルティの差は見られない。

## 6. む す び

本稿では、陸上基幹網及びMAN向けに当社が開発した波長多重伝送装置MF-80GWLについて製品の構成と特長を紹介し、この製品に適用した光技術、OA&M技術について述べた。また、この装置の伝送距離であるSMF伝送路720km、及びDSF伝送路480kmの伝送品質を確認するため実施した伝送実験結果について紹介した。

この製品は、SDH信号及びイーサネット信号を最大40波長まで収容することでデータトラヒックの急激な需要増加に対応でき、各種自動調整機能によってネットワークの保守運用性を高めたキャリアレベルの装置である。

今後は、この開発で蓄積された要素技術をベースに、更に経済的に大容量化、長距離伝送化、クライアントインタフェースの充実化を行っていく予定である。開発においては、装置の高密度化と低消費電力化はもとより、経済的に性能向上を図ることに伴い、光伝送技術をソフトウェア制御で実現する技術、システム管理技術の充実も重要な開発課題になるであろう。40GbpsWDMについては、市場動向を見極め、早期製品投入できるよう開発を進めたい。

# 光アクセスシステム技術

牧野真也\* 横谷哲也\*\*  
 羽根稔尚\* 浅芝慶弘\*\*\*  
 上田広之\*

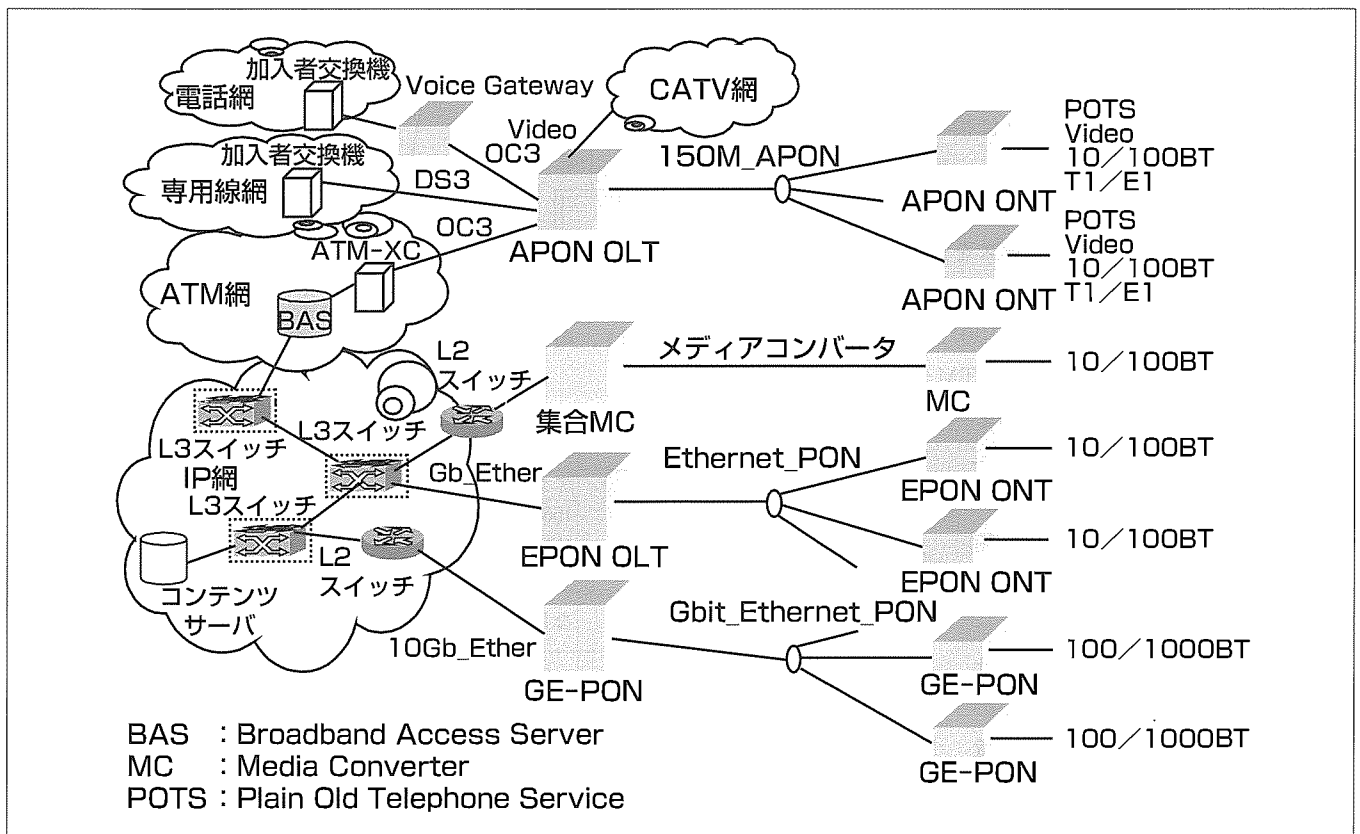
## 要旨

インターネットの爆発的な普及とIP(Internet Protocol)サービスの多様化に伴って、アクセスシステムの高速度・高機能化が急務となっている。アクセス系では、経済性、エリア展開が有利なADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)技術による高速化が先行してきたが、伝送帯域及び伝送距離の限界から、今後は、光アクセス技術を適用したFTTX(Fiber To The X)が本命と目されている。現在の普及率はADSLの数%にとどまるが、各キャリアの期待も大きく、今後、低価格化、新サービスの登場等によって大きく伸びる可能性が大きい。

三菱電機では、これまで、NTT社及び北米のSBC(SBC Communications)社の指導を得てATM(Asynchronous Transfer Mode)ベースのPON伝送技術を適用した

光アクセスシステム(ATM Passive Optical Network:APON)を開発してきた。APONは、ATMをバックボーンとするマルチサービスプラットフォームとして位置付けられる。また、国内のFTTH(Fiber to the Home)に向けて、PON伝送技術とイーサネット技術を組み合わせた経済性及びIPサービスとの親和性に優れた100M Fast EtherベースのEthernet-PON(EPON)光アクセスシステムを開発した。現在、IEEE802.3ah EFM(Ethernet in the First Mile)では、伝送速度1.25GbpsのGigabit Ethernet-PON(GbE-PON)が標準化中であるが、当社では、EPONの上位機種としてGbE-PONの開発にも着手している。

本稿では、APON光アクセスシステム及びEPON光アクセスシステムの概要を紹介する。



## 光アクセスシステムの構成

主な光アクセスシステムをアクセス形態別に示す。サービス種別、加入者の分布、バックボーンネットワーク等によって指向するシステム形態が異なる。

1. ま え が き

当社では、1990年代半ばからNTT社の指導を得てPDS (Passive Double Star) 光アクセスシステムの開発に取り組んできた<sup>(1)</sup>。1990年代後半からは、FSAN(Full Service Access Networks)活動への積極的な参画を行っている。2000年からは、北米のSBC社向けFSAN準拠のAPON光伝送システムの開発を行い、商用機として認定を受けている。2001年以降、日本国内ではIPサービスに特化した低コストな光アクセスシステムへの要求が高まり、当社では、これに対応してPON伝送技術とイーサネット技術を組み合わせることにより、経済性、IPサービスとの親和性に優れた100M FAST EtherベースのEPON光アクセスシステムを開発した<sup>(2)</sup>。現在、IEEE802.3ah EFMでは、伝送速度1.25GbpsのGbE-PONの標準化が進められているが、当社では、EPONの上位機種としてGbE-PONの開発にも着手している。

本稿では、APON光アクセスシステム及びEPON光アクセスシステムの概要及び特長的な機能について述べる。

2. APON光アクセスシステム

2.1 全体構成

図1に示すように、APONシステムは、局舎に設置され複数の加入者を収容しバックボーンネットワークに接続するOLT(Optical Line Terminal) (ADS2000)と、加入者宅に設置され各種のユーザー・網インタフェースを提供するONT(Optical Network Terminal) (AONT-B200, AONT-R100), DSU(Digital Subscriber Unit) (ATM-DSU), OLTとONTの監視制御を行う監視制御装置(Network Element Operations System : NE-Ops) から構成される。ATM技術とWDM(Wavelength Division Multiplexing)技術の組合せによってPOTS, 専用線サービス, IPサービス, アナログ映像など種々のデータを一本のファイバ上に多重化することでアクセス網におけるマルチサービスプラットフォームを提供する。

2.2 機能概要

(1) ATM Distribution Switch (ADS2000)

1ユニット/1システムの構成で、北米仕様584mmラックに3ユニット搭載可能である。インタフェース部及び二重化された電源部, ATMスイッチ部, 監視制御部, クロック部から構成される。北米規格 NEBS(Network Equipment Building System)Level 3に適合している。表1に主要諸元, 図2に外観を示す。

(2) ATM-ONT (AONT-B200/R100)

ユーザー・網インタフェースとしてDS1-CE(Digital Signal level1-Circuit Emulation) (1.5Mbps)及び10/100Base-Tを備えたビジネスユース向けのAONT-B200と, POTS, 10/100Base-T及びアナログビデオインタフェースを備えたホームユース向けのAONT-R100の2品種をサポートしている。北米規格 NEBS Level 3及びUL 1950に適合している。表2に主要諸元, 図3に外観を示す。

(3) 監視制御装置(NE-Ops, LCT)

NE-Opsは、NE-Opsサーバ及びオペレータインタフェ

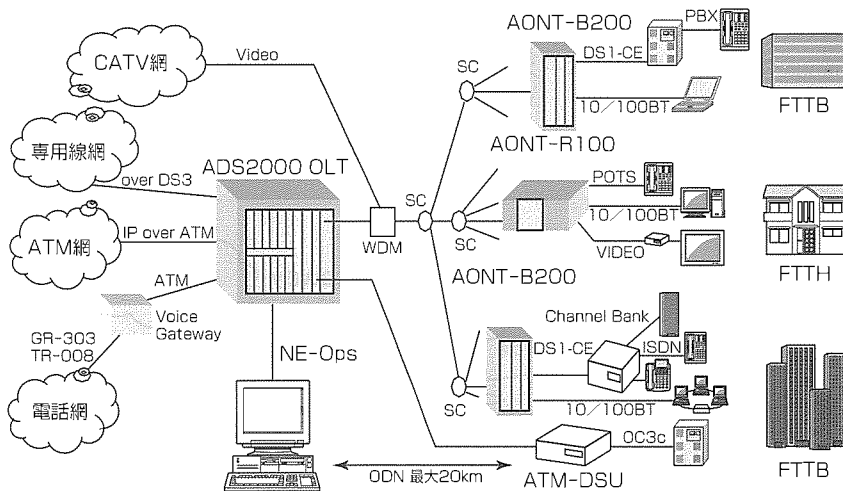


図1. APON光アクセスシステムの構成

表1. ATM Distribution Switch(ADS2000)の主要諸元

項目	仕様	
インタフェース部	種別	アクセスライン 156Mbps ATM-PON (ITU-T G983シリーズ準拠) OC-3C(156Mbps)
	冗長化	DS3 : n : 1冗長構成 OC-3C : 1 + 1冗長構成
	収容I/F数	DS3 : 最大16 OC-3C : 最大32 上記合計で最大32
ATMスイッチ部	スイッチング規模	20Gbps
	トラフィック制御	PVC単位にCBR, UBR, 最低帯域保証型UBRのQos制御
監視制御部	OAM機能	各種警報発出/転送, 品質モニタ, ループバック
	EMSインタフェース	CMIP over TCP/IP
動作条件	動作温度, 湿度	0~50℃, 5~90%
	冷却方式	FANによる強制空冷
電源条件	電源	DC -40.5~-57.0V
	消費電力	607W(Typ.), 1,024W(Max.)
寸法(mm)	(H)445×(W)544×(D)305 (584mmラック搭載可)	

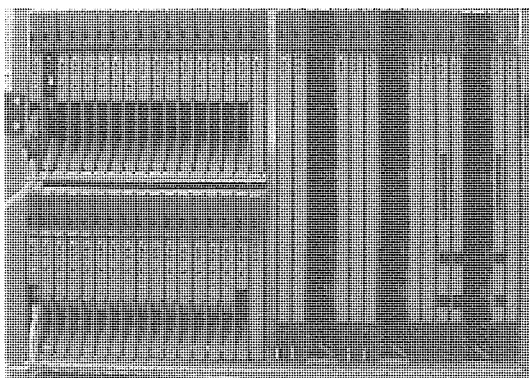
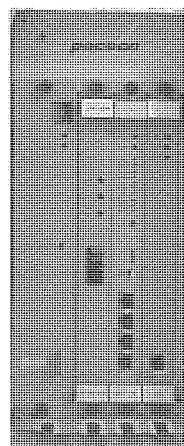
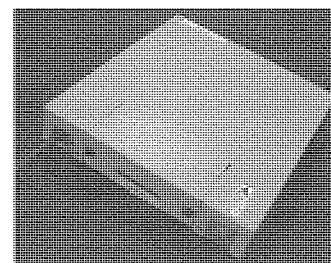


図 2. ADS2000の外観



AONT-B200



AONT-R100

図 3. ONTの外観

表 2. ONT(AONT-B200/R100)の主要諸元

項目		仕様	
ユーザー・網 インタフェース	インタフェース種別 (ポート数/カード)	AONT-B200 DS1-CE(4 port/pkg) 10/100BT(1 port/pkg)	AONT-R100 POTS(4 port) 10/100BT(1 port) ビデオRF出力(1 port)
	インタフェースカード数	2枚/1 ONT	1枚一体型
	アクセスライン インタフェース	インタフェース種別 ポート数	156Mbps ATM-PON(ITU-T G983シリーズ準拠) 1
電源条件	電源電圧	AC120V(60Hz) バッテリーバックアップ	AC120V(60Hz)
	消費電力	41W以下	20W以下
動作条件	動作温度	0~50℃	
	冷却方式	自然空冷(ファンなし)	
寸法(mm)		(H)312×(W)130×(D)320	(H)58×(W)290×(D)330

ースを提供するHMI(Human Machine Interface)端末からなり、イーサネット網を介して遠隔に設置された複数のOLT及びこれに収容されているONTを監視・制御する。通常の保守はNE-Opsで運用するが、インストール等の保守用途で保守員が携帯し、必要に応じて保守作業を行うためのLCT(Local Craft Terminal)も適用可能である。NE-Opsの主要機能を表3に示す。

### 3. EPON光アクセスシステム

#### 3.1 全体構成

EPONシステムは、図4に示すように局舎に設置され複数の加入者を収容し、IPネットワークに接続するOLT(AS-100EL, AS-100ELG)と加入者宅に設置され10/100Base-Tインタフェースでユーザー・網インタフェースを提供するONT(AS-100EN), OLTとONTの監視制御を行う監視制御装置(NE-Ops)から構成される。

#### 3.2 機能概要

##### (1) OLT(AS-100EL, AS-100ELG)

標準483mmラックに最大4個搭載可能な小型ユニットに、アクセスラインインタフェースカードを最大8枚、監

視部/スイッチ部カードを1枚、冗長化された電源カード2枚が搭載可能である。転送系インタフェースとして、100BaseFXに対応したAS-100ELと10/100/1000Base-TX, 1000BaseSX/LXの各種インタフェースが選択可能なAS-100ELGの2機種あり、伝送系インタフェースカード当たり2ポート収容している。EPONインタフェースは、当社独自の可変長メディアアクセス制御方式<sup>(2)</sup>を採用し、ONTを最大32台分岐接続し、帯域制御、スループット、遅延特性等で優れた特性を実現している。レイヤ2(L2)スイッチング機能は、VLAN(Virtual Local Area Network)機能、リンクアグリゲーション機能やスパンニングツリー機能による接続制御機能をサポートしている。スイッチング機能は、監視部/スイッチ部カードのほかに各インタフェースカードに分散配置し、インタフェース規模に応じた増設によって初期投資コストの抑制を可能にしている。IEEE802.1pベースのタグ精査による高優先/低優先のQos制御を行い、VoIP(Voice over Internet Protocol), ストリーミングデータなどの品質保証にも対応している。表4に主要諸元を示す。

##### (2) ONT(AS-100EN)



表 3. APON光アクセスシステム用NE-Opsの主要機能

機能区分		機能項目
状態監視機能	状態監視・検索	(1) パッケージ状態(実装状態, 運用状態, 障害状態)監視・読み出し (2) ATMコネクション検索・状態監視 (3) 切換え状態監視・読み出し (4) 状態変化通知表示
	警報監視	(1) 装置警報通知表示, 警報状態検索 (2) 通信警報通知表示, 警報状態検索
運用遠隔制御機能	登録・削除	(1) 装置登録・削除 (2) パッケージ登録・削除 (3) ATM終端点生成・削除, ATMコネクション(VP/VC)設定・解除
	切換制御	(1) セクション切換制御 (2) 装置二重化部(監視制御部, クロック部, スイッチ部)切換制御
	動作パラメータ設定	(1) トラヒック制御パラメータ設定 (2) その他動作パラメータ設定
試験機能	試験制御	(1) ATMループバック試験制御・結果表示
履歴情報管理		(1) 警報ログ収集, 検索・表示 (2) 通知ログ収集, 検索・表示
システム管理		(1) 時刻設定 (2) 遠隔リセット

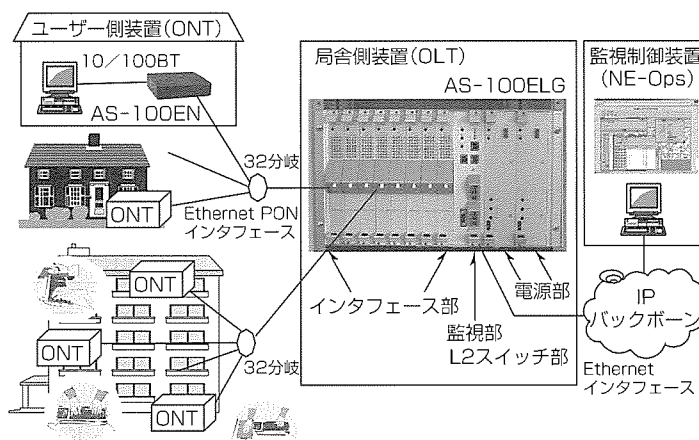


図 4. EPON光アクセスシステムの全体構成

表 4. OLT(AS-100EL, AS-100ELG)の主要諸元

項目		仕様
アクセスラインインタフェース	通信方式	EPONインタフェース(125Mbps:可変長メディアアクセス方式)
	収容加入者数	1~256加入/ユニット
	光ファイバ心数	1(G.652準拠 シングルモード光ファイバケーブル)
	伝送距離	最大20km(G983.1クラスB相当)
	光波長	上り1.3μm, 下り1.5μm
	ポート数	最大8(最大8インタフェースパッケージ/ユニット)
転送ラインインタフェース	通信方式	AS-100EL:100Base FX AS-100ELG:10/100/1000Base TX, 1000BaseSX/LX選択
	ポート数	2
加入者用装置監視制御	監視項目	ユーザーインタフェースLINK状態, 装置故障, 電源断通知等
	制御項目	ループバック試験制御, 状態通知要求
接統制御機能		VLAN機能, Link Aggrigation機能, Spanning Tree機能
SNMPエージェント機能		あり(MIB I, II, 拡張)
電源二重化		あり
寸法(mm)		(H)266×(W)483×(D)181 (19インチラック搭載可)
動作条件	動作温度	0~40℃
	冷却方式	ファンによる強制空冷
電源条件	電源	DC -40.5~-57.0V
	消費電力	200W以下

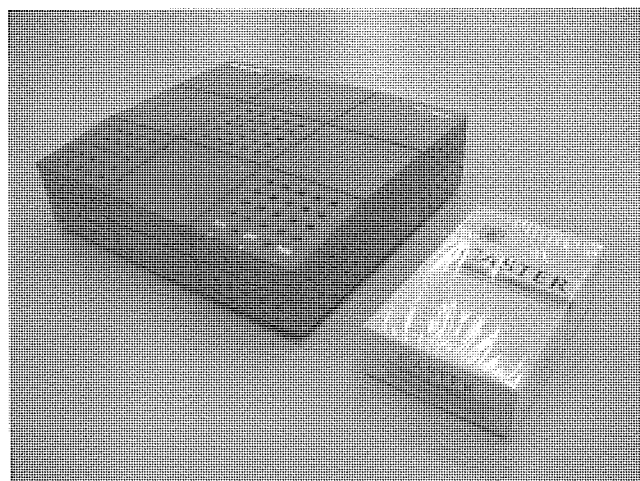


図 5. ONT(AS-100EN)の外観

表 5. ONT(AS-100EN)の主要諸元

項目	仕様	
アクセスラインインタフェース	通信方式	EPONインタフェース(125Mbps：可変長メディアアクセス方式)
	ポート数	1
	光ファイバ心数	1 (G.652準拠 シングルモード光ファイバケーブル)
ユーザー・網インタフェース	通信方式	10/100BaseT(全二重/半二重, 自動認識/固定設定)
	ポート数	1
接続制御機能	ブリッジ機能	
寸法 (mm)	(H)40×(W)150×(D)135	
動作条件	動作温度	0～40℃
	冷却方式	自然空冷(ファンなし)
電源条件	電源電圧	AC100V±10V(50Hz及び60Hz), ACアダプタ使用
	消費電力	6W以下

表 6. EPON光アクセスシステム用NE-Opsの主要機能

機能区分	機能内容	
監視機能	ソフトウェア異常	OLTに実装されたソフトウェアの異常を検出
	OLT故障検出	OLTの電源ユニット, FAN, 各パッケージの故障, 電源ヒューズ断を検出
	リンク断	転送ライン, アクセスライン, ユーザーラインのリンクアップ/断を検出
	ONT故障検出	ONTの電源断, 故障を検出
	ONT送信時間超過	送信許可バイト以上連続送信したとき発生
	MACテーブルオーバーフロー	OLT内のMACテーブルのオーバーフローを検出
制御機能	ONT登録/削除	ONT固有のシリアル番号の設定
	送信許可バイト設定	上り連続送信許可バイト数の設定
	ONTサービス開始/停止	ONTへのデータ送信停止・監視停止
	ループバック制御	ループバック設定とループバックフレームを用いたループバック試験
	パッケージ・リセット	パッケージ単位の遠隔リセット
	活線挿抜許可	パッケージ単位の活線挿抜許可
	EROMセーブ	設定データのセーブ
	統計情報の収集	統計情報(ICMP, UDP, SNMP, 送信パケット数, 受信パケット数)の収集
ソフトウェアダウンロード	ftpによってインサービスでソフトウェアの遠隔ダウンロード	

アクセスラインインタフェース機能, ブリッジ機能, ユーザー・網インタフェース機能, 監視制御機能及び電源を小型プラスチック筐体(きょうたい)に装備し, 業界でもトップクラスの小型化を実現している。IEEE802.1pベースのタグ精査によるQos制御も可能である。イーサネットをベースとしたシンプルな信号処理によってプロセッサなしで機能実現し, 低コスト化した。装置の外観を図5に, 主

要諸元を表5に示す。

(3) 監視制御装置(NE-Ops)

IP網を介してSNMP(Simple Network Management Protocol)によってOLT及びONUの監視制御を行う。管理データベースは, 標準MIB(Management Information Base)及び拡張MIBをサポートしている。監視・制御機能の一覧を表6に示す。

## 4. む す び

当社では、経済性、保守性、エリア展開に優れたAPON光アクセスシステム及びEPON光アクセスシステムを開発した。APON光アクセスシステムはマルチサービスプラットフォームの実現に適しており、EPON光アクセスシステムはIPサービスとの親和性の良い経済的なシステムである。現在、サービス速度の高速化に向けてIEEE802.3ah EFMで標準化されている1.25Gbps Gigabit Ethernet-PON

(GbE-PON)光アクセスシステムを開発中である。

## 参 考 文 献

- (1) 上田広之, ほか: ATMアクセスシステム, 三菱電機技報, 74, No.8, 522~526 (2000)
- (2) 武元理矢, ほか: Ethernet PONにおけるアクセス制御方式, 2002年電子情報通信学会ソサイエティ大会投稿予定 (2002)



# 通信用光半導体デバイス技術

三井康郎\*

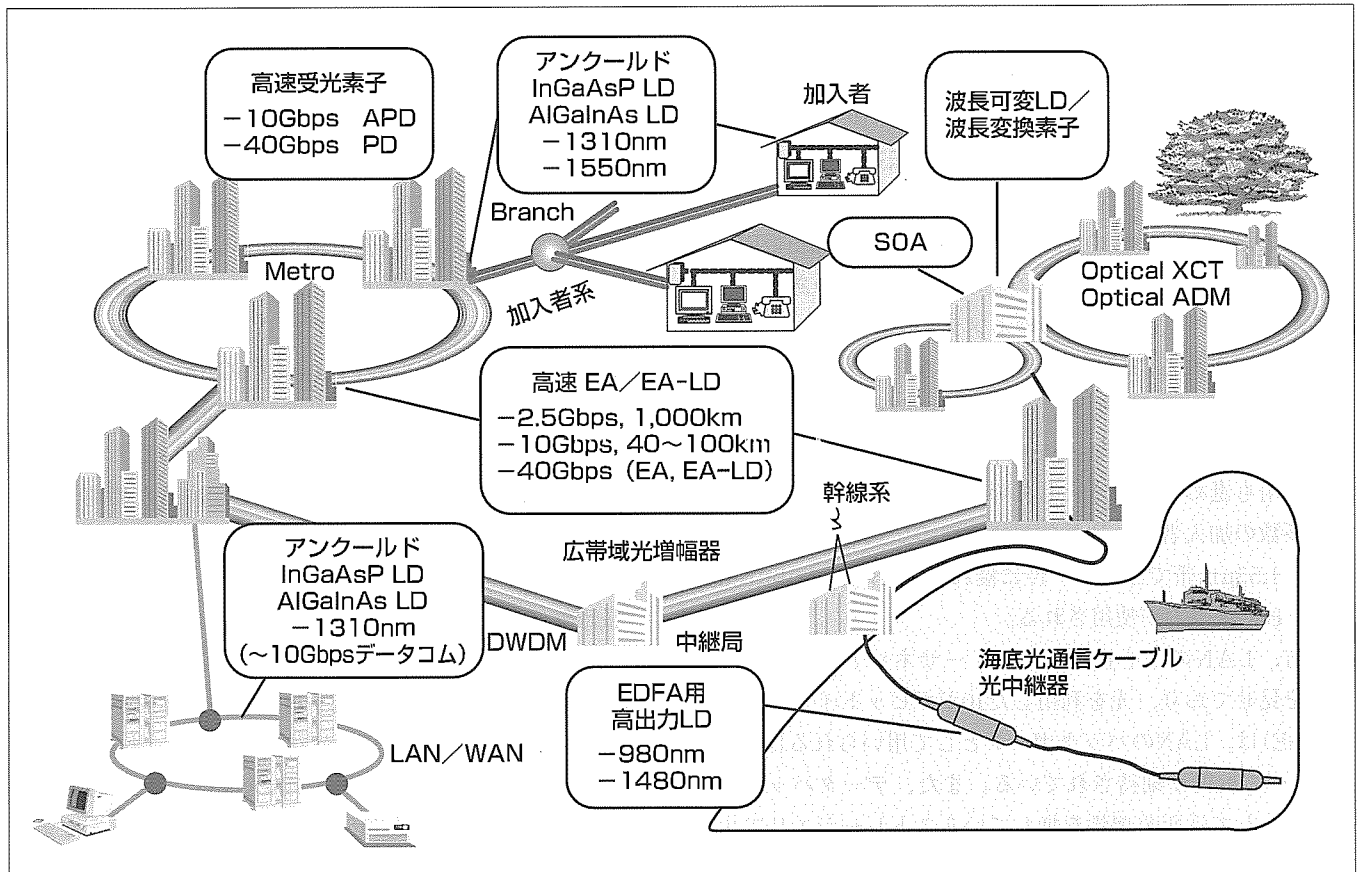
## 要旨

ネットバブルの後遺症は光半導体デバイス市場をも巻き込んで未だ癒(い)えることはないが、その一方で、アクセス系ではFTTH(Fiber to the Home)が現実のものとして一部地域でサービス開始となり、データコムの分野でもローカルエリアネットワーク(LAN)で10Gbps光イーサネット規格の標準化が完了するなど、ここに至り新たな胎動を見せ始めた。メトロポリタン エリア ネットワーク(MAN)における低密度波長多重(Coarse Wavelength Division Multiplexing : CWDM)市場も見逃せない分野となりつつある。幹線系を中心とした通信ネットワークの高速・大容量化の流れの中で光半導体デバイスの果たしてきた役割には極めて大きなものがあつたが、これら次期光通信市場立ち上がりを見(にら)んで、関連光モジュール・機器メーカーからの光デバイスに対する更なる小型化・高性能化・低価格化

への期待は以前にも増して大きくなってきている。

このような状況下で、三菱光半導体デバイスでは、低速から10Gbpsまでを含めた新製品ラインアップを強化するとともに、40Gbps市場などに向けた次世代技術開発を積極的に推し進めている。

本稿では、今後期待されるアクセス、データコム市場対応を中心に当社における光半導体デバイスの先端製品ラインアップ状況を述べるとともに、次期幹線用として40Gbps対応光変調器/フォトダイオード、980nmポンプLD(Laser Diode)、またMAN/LAN用としてAlGaInAs系10GbpsアンクルドLD、10Gbpsアバランシェフォトダイオード(APD)などの光半導体デバイスに焦点を当て、当社における開発状況の一端について述べる。



## 海底から家庭まで、21世紀の光ネットワークを支える三菱光半導体デバイス

光通信ネットワークは、インターネットトラフィックの着実な進展を背景に、幹線系からメトロアクセス系への新たな展開を見せつつある。これらシステムの要(かなめ)となる光半導体デバイスに対しても、多波長/狭チャネル化、高機能化などの面から、超高速低チャープ光デバイス、アンクルドLD、励起用高安定LDなどに加えて、来るべきフォトリックネットワーク構築に向けた波長可変LD/波長変換素子や半導体光増幅器などの早期実用化への期待が高まっている。当社では、海底から家庭・端末まで、21世紀の光ネットワーク社会を支える光半導体デバイスで支えていく。

\*高周波光素子事業統括部(工博)

## 1. ま え が き

通信用光半導体デバイスの市場は、昨今の情報通信関連投資の一時的な冷え込みの影響を受けつつも、FTTHが現実のものとして一部地域でサービス開始となり、LAN分野でも10Gbps光イーサネット規格の標準化が制定されるなど、新たな胎動を見せ始めた。MANにおけるCWDM市場も見逃せない分野となりつつある。これら次期光通信市場立ち上がりの予兆を受けて、関連光モジュール・機器メーカーからの光デバイスに対する小型化・高性能化・低価格化の要求は以前にも増して強くなってきている。

このような環境下で、三菱光半導体デバイスでは、低速から10Gbpsまでを含めた新製品ラインアップを強化するとともに、40Gbps市場などに向けた次世代技術開発を積極的に推し進めている。

本稿では、当社における光半導体デバイスの先端製品ラインアップ及び次世代光デバイスの開発状況の一端について述べる。

## 2. 市場動向と光半導体先端製品群

家庭／加入者に最も近い部分を光ファイバでつなぐ動きは、ここに来てADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)などによるブロードバンド化に並んで着実な進展を見せ始めた。FTTH市場では、155Mbpsクラスの比較的低速のファブリーペローレーザーダイオード(FP-LD)への要求が根強い。加入者から局への“上り”の伝送に使用される1.3μm帯FP-LD(ML7XX8, ML7XX35)のほか、従来余り動きのなかった局からの“下り”に使用される1.55μm帯FP-LD(ML9XX6, ML9XX35)への要求が増加しつつある。

これらのFP-LDは、いわゆるメディアコンバータに搭載して使用されるが、局-加入者につき1対1で必要なメディアコンバータに対して、ファイバの分岐によって1対多で使用されるPON(Passive Optical Network)のFTTHへの適用も進められようとしている。PONにおける“下り”は、多数の加入者と、比較的長い距離の伝送を要求されており、1.55μm帯で波長単一性に優れたDFB(Distributed Feed-Back)-LDが使用される。

一方、LANの中心技術であるイーサネットの高速化が進展を見せており、光を利用した10ギガビットイーサネット(GbE)は、LANのバックボーンとして用いられるほか、MANへの展開が期待されている。また、データバックアップ用として近年重要性を増しているストレージエリアネットワーク(Storage Area Network: SAN)に用いられるファイバチャネル(Fibre Channel)では、1Gbps又は2Gbpsでの高速情報伝送が行われる。これらの用途をカバーする高速FP-LDとして、経済的かつ2.5Gbpsまでの高速性能が確保されたシリーズ製品(ML7XX19)を市場

投入している。

MANでは、2.5~10Gbpsの高速伝送用光素子が用いられるが、従来、高速・長距離伝送の主力であった変調器とDFB-LDとの集積デバイス構成に代わって、コストメリットのあるDFB-LDの直接変調による10Gbps伝送の実現に大きな期待が掛けられている。LD性能におけるキープポイントは高温での伝送特性であるが、当社では、この用途にML7XX32を提供予定している。

10GbE用には、このほか、受信用フォトダイオード(PD)、及びAPDとともに、トランシーバ物理層を構成するIC(CMOS SOI)やLDドライバ、トランスインピーダンスアンプ(Trans-Impedance Amplifier: TIA)などのICの要求も強い。

また、MANは、距離に関して、アクセス系の1km未満の部分(メトロアクセス)からかなりの長距離(~100km:メトロコア)までを包含しており、2.5Gbpsの速度で100kmの伝送に用いるCWDM対応DFB-LDが求められている。

当社では、従来、高密度波長多重(Dense-WDM)用のDFB-LDの波長をCWDM対応に拡張して、1470~1610nm間で20nm間隔の8波長を用意している(ML9XX11/9XX16/9XX22)が、これらは1.25Gbps×8波多重、又は622Mbps×8波多重の形で使用され、それぞれ10Gbps、5Gbpsの伝送容量に対応できる。また、1.3μm帯においても、4波多重で10Gbpsトランシーバ(IEEE802.3ae準拠)を実現する約25nm間隔の4波長も用意している(ML7XX11)。

これまで述べたDFB-LDは、10Gbps用を除いて、均一回折格子型と呼ばれる構造であるが、より安定なシングルモード動作の実現を目指して、回折格子の一部に4分の1波長の位相シフト領域を設けた構造のDFB-LDを開発し、既にシングルチャネルの1.3μm(2.5Gbps:ML7XX16, 10Gbps:ML7XX28/ML7XX32)及び1.55μm(2.5Gbps:ML9XX19)DFB-LDに適用し製品化している。同様の構造をCWDM-2.5Gbps用8波長にも適用するため開発を進めており、中央の4波長(1510, 1530, 1550, 1570nm)に関しては既に開発を完了している。

長距離伝送ではファイバの損失を補うためファイバアンプが一般的に用いられるが、受信段やファイバアンプで増幅できない1.3μm帯では、素子自身で増幅作用を持ち、かつ小型・低コストのAPDが有効となる。当社では、622Mbps、2.5Gbps及び10Gbps用のAPD、並びにPDラインアップ(PD7XXX及びPD8XXXシリーズ)をそろえている。

表1に、以上述べた市場動向に対応した当社における現行先端製品ラインアップを示す。156Mbpsから10Gbpsにわたる広い範囲と機能をカバーしており、用途に応じた品ぞろえを幅広く展開している。

表 1. 光半導体デバイスの主要製品ラインアップ

応用分野	主な用途	波長帯	構造	シリーズ型名(特長)
光通信 (送信)	~10Gbps	1550nm	変調器集積DFB-LD	ML9XX18
				ML9XX31★ (DWDM用)
		1310nm	直接変調DFB-LD	ML7XX28★
				ML0XX15 (D-FF付きEAM/LD用)
		GaAsドライバIC		ML0XX16 (EAM/LD用)
	~2.5Gbps	1550nm	変調器集積DFB-LD	ML9XX17
				ML9XX19★ (広温度範囲動作)
			DFB-LD	ML9XX12
		1310nm	FP-LD	ML7XX16 (広温度範囲動作)
				ML7XX19★ (広温度範囲動作)
		GaAsドライバIC		ML0XX1 (LD用)
	~622Mbps	1550nm	DFB-LD	ML9XX11 (広温度範囲動作)
		1310nm		ML7XX11 (広温度範囲動作)
	~156Mbps	1550nm	FP-LD	ML9XX6
				ML9XX35★ (FTTH向け)
ML7XX8				
1310nm		DFB-LD	ML7XX4	
CATV	DFB-LD	ML7XX14 (広温度範囲動作)		
光通信 (増幅・計測)	光ファイバ増幅	1480nm	高出力FP-LD	ML9XX8 (Po=150mW)
		980nm		ML8XX2★ (Po=200mW, Rf≤1% Cooled時350mW)
				ML8XX4★ (Po=200mW, Rf~4%)
	OTDR	1550nm	パルス高出力FP-LD	ML9XX10 (Po(p)=200mW)
		1310nm		ML7XX10 (Po(p)=300mW)
応用分野	主な用途	構造	受光径	シリーズ型名(特長)
光通信 (受信)	~10Gbps	InGaAs-PIN	φ 20μm	PD7XX26★
		InGaAs-APD		PD8XX6★
		ML0CP17 (GaAs-TIA IC)		
	~2.5Gbps	InGaAs-PIN	φ 40μm	PD7XX7
		InGaAs-APD	φ 35μm	PD8XX3 (低容量)
		APD-Amp		PD8XX4 (GaAs-TIA IC内蔵)
		PIN-Amp	φ 20μm	PD7XX13 (GaAs-TIA IC内蔵)
		ML0CP6 (GaAs-TIA IC)		
	~622Mbps	InGaAs-APD	φ 50μm	PD8XX2
		InGaAs-PIN	φ 80μm	PD7XX8

OTDR : Optical Time Domain Reflectometer, CATV : Cable Television ★ : 新製品

### 3. 開発動向

#### 3.1 幹線用光半導体デバイス

幹線用光通信システムにおいては、波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) と時分割多重 (Time Division Multiplexing : TDM) の両方式を併用することにより、その大容量化を目覚ましい勢いで進めてきた。TDMの観点からは、現在主流の2.5~10Gbpsから40Gbps又はそれ以上へと移行しつつあり、既に実用化試験の報告がなされているが、40Gbps幹線システムでは、送信側では半導体変調器が、受信側ではPIN-PDがシステムの伝送特性を決定付けるキーデバイスとなっている。

一方、WDM伝送方式においては、EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) を用いて光信号を光のまま直接増

幅する光直接増幅方式が採用されるが、チャネル数の増加に伴い、EDFAの高出力動作が不可欠となる。このEDFA出力の向上には、励起光源である980nm半導体レーザの出力向上と信頼性の確保がポイントとなる。

##### 3.1.1 40Gbps電界吸収型変調器<sup>(1)(2)</sup>

40Gbps電界吸収型 (Electro-Absorption : EA) 光変調器によって良好な伝送特性を実現するためには良好なアイパターンと低チャープ化の両立が重要であるが、単純な量子井戸構造やバルクInGaAsPを吸収層に用いた場合、良好なアイパターンのために弱電界時の吸収変化を小さくしたときには、電圧印加時の吸収層の吸収損失変化に対して相対的に屈折率変化が大きくなりチャープが増大する傾向がある。当社では、電子やホール波の波動関数を制御する目的で非対称量子井戸構造を吸収層に用いてEA変調器のチャ

ープ低減と消光特性改善の両立を図り、単純量子井戸構造と比較して消光特性を悪化させずにチャープを低減できることを確認した。図1にこのEA変調器の構造を示す。半絶縁性(SI)InP基板上に導波層とInGaAsP/InGaAsP多重量子井戸吸収層をMOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)法で形成するとともに、SI基板を用いて浮遊容量の低減を図っている。図2に吸収層非対称量子井戸のバンド図を示す。ウェル層のn側に低いバリア層を挿入して電圧印加時に正孔と電子の波動関数の重畳積分を小さくすることによって励起子吸収ピークをつぶせることと、電圧印加時のStark Shift増大によってチャープを低減させることをねらっている。図3にこのEA変調器(吸収領域長 100 $\mu$ m)の消光特性測定結果を通常量子井戸構造変調器と比較して示す。非対称量子井戸構造を導入することによって $\alpha$ パラメータも改善されることから、消光特性を悪化させずにチャープ低減が可能であることが確認でき、この構造が40Gbpsの超高速用途に対し有望であることが分かった。

3.1.2 40Gbps PD<sup>(3)</sup>

40Gbps以上の広帯域PDプリアンプでは、PDとプリアンプを結ぶワイヤのインダクタンスが受信波形劣化をもたらす要因となる。このPDとプリアンプ間のインダクタンスを抑えるために、図4に示すようなフリップチップ実装に対応し得る導波路型PDを開発した。素子構造としては、

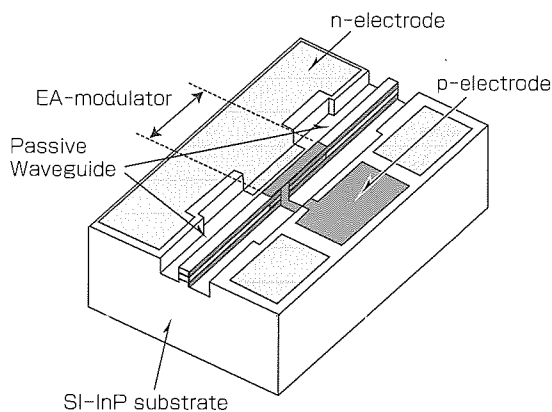


図1. EA変調器の構造

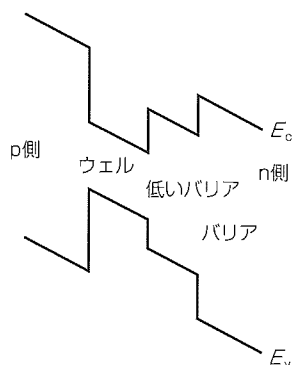


図2. 非対称量子井戸のバンド図

n-InP/n-InGaAsP/i-InGaAs/p-InGaAsP/p-InPからなる導波路型吸収層構造を半絶縁性InP基板上に形成している。導波路は、半絶縁性InPで埋め込み平坦(へいたん)化してフリップチップが容易に行えるようにアノード-カソード電極間の高さをほぼ同じにしている。素子特性としては、感度@1.55 $\mu$ m : 0.8A/Wなどの良好な特性が得られている。また、偏波依存性は0.3dB、容量は約40fFであり、高周波プローブで測定したPDのみの遮断周波数としても45GHz以上が得られている。

3.1.3 980nmポンプLD<sup>(4)</sup>

図5に当社980nmポンプLDの外観模式図を示す。一般にLDのアスペクト比を低減するには結晶成長方向の光閉じ込めを小さくする方法が採られるが、この方法では、結晶成長方向に対して垂直方向の屈折率差が大きくなり、キンクレベル低減を引き起こす高次モードが発生しやすくなる。当社では、上記アスペクト比低減とキンクレベル向上といった一見相容れない要求を満足させるため、図に示すリッジ型半導体レーザにおいて、基板側クラッド層の屈折

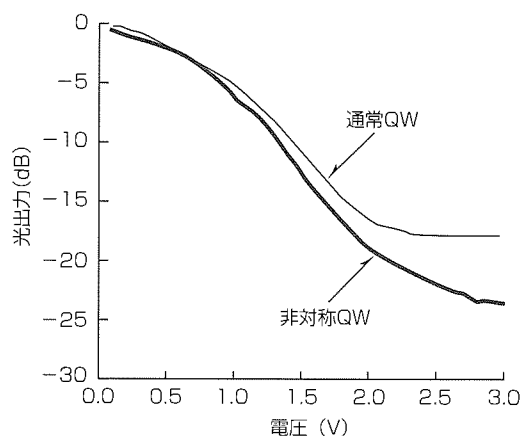
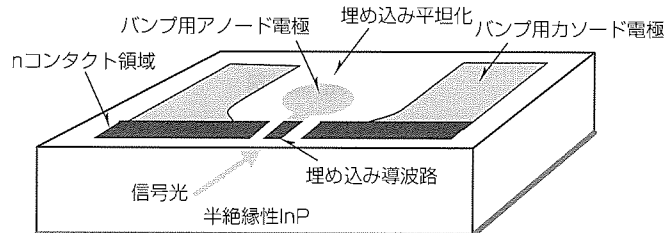
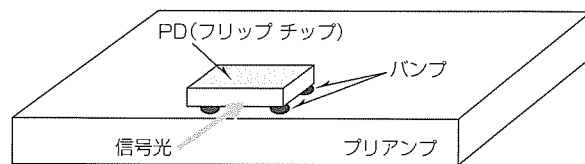


図3. 消光特性測定結果



(a)チップ構造図



(b)フリップチップ実装例

図4. フリップチップ実装用40Gbps導波路型PD



率をリッジ側クラッド層よりも高くした構造としている。共振器長を1,500 $\mu\text{m}$ と長くした素子の代表特性を図6に示す。キンクレベル650mW以上、アスペクト比2.5以下の良好な特性を実現できた。また、端面近傍をシリコン注入による窓構造としているため、端面劣化(Catastrophic Optical Damage: COD)がなく、信頼性の高い動作が可能である。

### 3.2 アクセス用光半導体デバイス

前章で述べたように、伝送速度が2.5~10Gbpsクラスのアンクルド半導体レーザは既に実用化されているが、これらInGaAsP系半導体レーザでは、材料の物性面から決まる温度上限に近づきつつあるのが現状である。一方、光モジュールなどの光部品も小型化や高部品密度化が求められ、ひいては半導体レーザにもあくなき高速・高温動作(10Gbps@ $\geq 85^\circ\text{C}$ )の要求が強まっている。当社では、これらの要求を実現するため、材料的に温度特性改善や高速化に適したAlGaInAs系新材料を活性層に用いたFP(Fabry Perot)型半導体レーザを開発し、10Gbpsの高速伝送が可能であることを確認した。

また、メトロアクセス系では、受光素子としても、高価な光増幅器を必要としない10Gbps APDの採用がシステムコスト上有利であり、今後広く使用されることが期待されている。

#### 3.2.1 AlGaInAs系リッジ導波路型FP-LD<sup>(5)</sup>

図7にAlGaInAs系リッジ導波路型FP-LDの構造を示す。従来材料のInGaAsP-MQW(Multi-Quantum Well)と比較して、AlGaInAs系材料の方が伝導体のバンド不連続量

$\Delta E_c$ が大きいため、電子のオーバーフローが起きにくく温度特性が良いこと、微分利得が大きいため、緩和振動周波数が大きくなり、高速特性に優れることが期待される。

図8にこのレーザの光出力-電流特性を示す。85 $^\circ\text{C}$ でも10mW以上の出力、最高発振温度165 $^\circ\text{C}$ 、特性温度 $T_0=93\text{K}$ と優れた温度特性を実現している。85 $^\circ\text{C}$ での10Gbps変調波形としてもクリアなアイ開口が得られており、消光比は8.1dBであった。また、10Gbpsでシングルモードファイバ3kmを伝送後のパワーペナルティは、25 $^\circ\text{C}$ で0.15dB、85 $^\circ\text{C}$ で1.4dBと良好な伝送特性を実現した。85 $^\circ\text{C}$ 、10mWの高温通電試験を行い、MTTF(Mean Time to Failure)として38万時間以上の長寿命を確認しており、このレーザは比較的短距離(2km以内)における高速データ通信用レーザとして有望である。

#### 3.2.2 10Gbps APD<sup>(6)</sup>

APDを広帯域化するには、増倍層と光吸収層を薄膜化してキャリアの増倍時間と走行時間を低減する必要があるが、光吸収層を薄膜化した場合には、吸収されず透過する光が増加して効率が低下する。当社では、この光吸収層の薄膜化による感度の低下を補償するために、図9に示すように吸収層の下部に多重反射層(Distributed Bragg Reflector: DBR)を導入した。これにより、高い効率(感度=0.88A/W)と高い利得帯域幅積(100GHz)が両立して達成でき、このAPDが高感度の10Gbps光受信器用として有効であることを確認した。

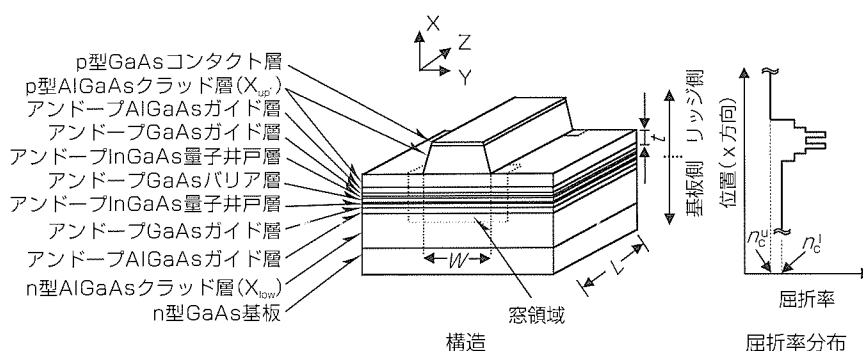


図5. 非対称屈折率構造を持つ980nm LD

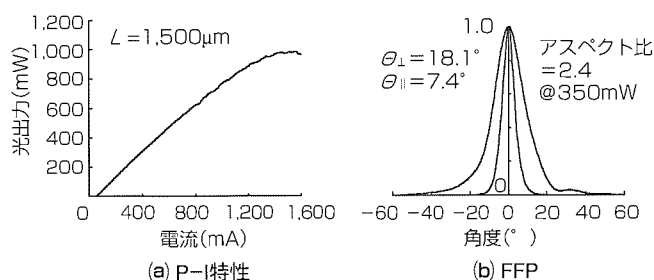


図6. 非対称屈折率構造を持つ980nm LDの特性 (共振器長:  $L=1,500\mu\text{m}$ )

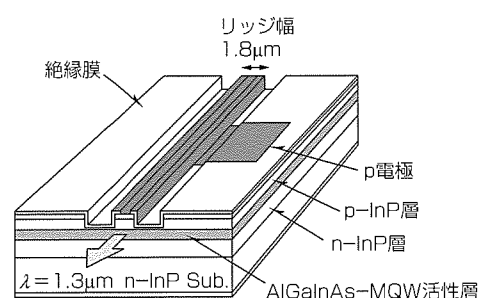


図7. AlGaInAs系リッジ導波路型FP-LDの構造

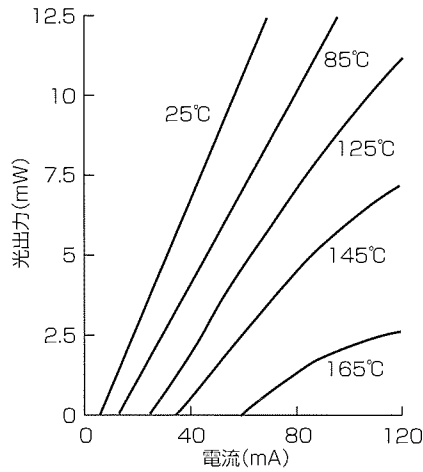


図 8. 光出力-電流特性

#### 4. 通信用光デバイスの将来

インターネットトラフィックの着実な進展を背景に、光通信システムは今後もますます高速化・多重化が進むと考えられる。その場合は伝送容量の増大に対してネットワーク間の交換が電子回路による律速となることから、各地域を大容量トラフィックで結び、オフィスから家庭又はモバイル端末へとつなぐ地域バックボーン網を形成するネットワークの全光化への期待が高まりつつある。この次世代フォトニックネットワークを実現するには、波長可変/波長変換レーザ、光スイッチ、光合波器、フィルタ、ADMなどを駆使した光のルーティング技術と1,000波長級の波長多重技術が、ここ数年の間に実現されると考えられ、通信用光デバイスとしても、超高速化への対応に加えて、全光化に向けた小型で高機能の光デバイスが求められる。Si基板上に形成した導波路に受動・能動素子を高精度で配置した光波回路、さらには量子ドット、フォトニック結晶などの先進技術を用い、これらの機能を更に高効率・小型集積化するなど、国を挙げた産業競争力の源泉として、この分野の開発はますます拡大・深化していくものと考えられる。

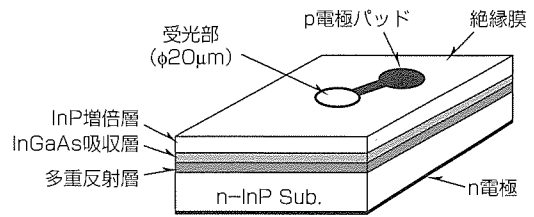


図 9. 10Gbpsアバランシェフォトダイオードの構造

#### 5. むすび

当社光半導体デバイスの先端製品群、及び次世代デバイス開発現況について概観した。今後とも、高性能化・低コスト化の追求はもとより、ブレイクスルーを必要とする新規光半導体デバイスに対しても積極果敢にチャレンジし、21世紀の光ネットワークの創造に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- (1) 高木和久, ほか: 半絶縁性InP基板を用いた40Gbps電界吸収型光変調器, 三菱電機技報, 76, No.2, 121~124 (2002)
- (2) 宮崎泰典, ほか: 非対称量子井戸吸収層を用いた低チャープEA変調器, 2002年春電子情報通信学会予稿, C-3-46 (2002)
- (3) 石村栄太郎, ほか: フリップチップ実装用40Gbps導波路型PD, 第49回応用物理学関係連合講演会予稿 (2002)
- (4) 鳴原君男, ほか: Er添加光ファイバアンプ励起用980nm半導体レーザ, 三菱電機技報, 76, No.2, 129~132 (2002)
- (5) Takiguchi, T., et al.: 1.3μm AlGaInAs LD with High Relaxation Oscillation Frequency at High Temperature Suitable for Gigabit Ethernet System, OECC2000, 540~541 (2000)
- (6) 石村栄太郎, ほか: 多層反射膜付高感度10Gbps InP-APD, 第48回応用物理学関係連合講演会予稿 (2001)

# 光通信システムLSI技術

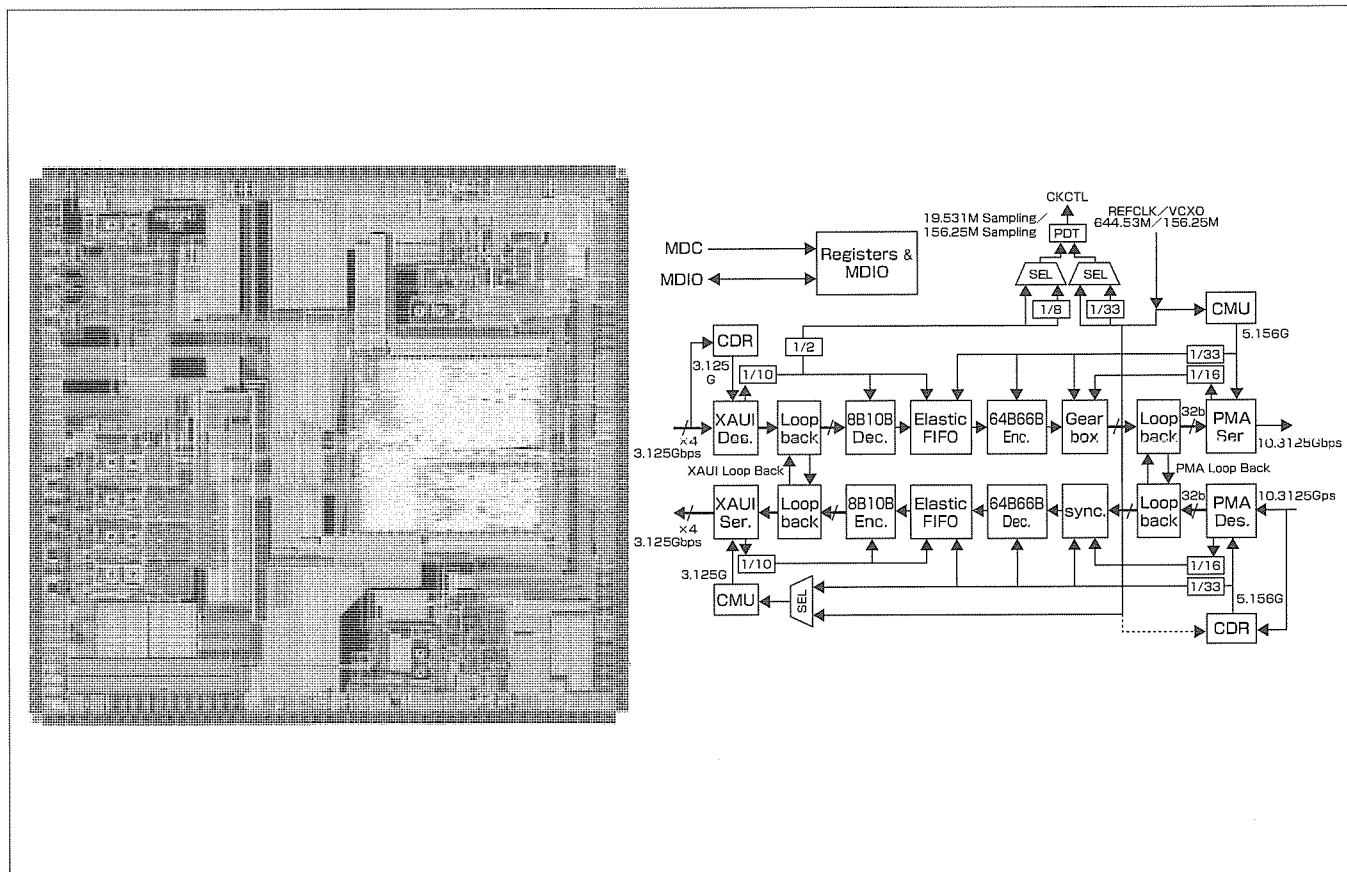
近藤晴房\* 久保和夫+  
吉村 勉\*\* 高相 純++  
前川繁登\*\*\*

## 要 旨

近年のインターネットアクセス網のブロードバンド化に伴い、通信ネットワークに対する高速化・大容量化の要求は急速に高まっている。IEEEにおいても、本年、802.3ae規格として10Gbps(ギガビット/秒)イーサネットが標準化された。この最新規格を実現するためのキーデバイスである10GbpsトランシーバLSIを、SOI(Silicon-On-Insulator)基板を用いたCMOSプロセスを用いて開発した。このLSIは、10Gbps光インタフェースを3.125Gbps 4並列インタフェースに変換する機能を持ち、PLL(Phase-Locked Loop)、CDR(Clock Data Recovery)、SERDES(Serializer Deserializer)、及び、伝送路符号として8B10B符号、64B66B符

号のエンコーダ/デコーダ機能を搭載している。10Gbps動作をCMOSで実現したことにより、従来のGaAs(ガリウムヒ素)などの化合物半導体やバイポーラ素子で製品化された場合に比べて、同等の電気性能と低消費電力化・高機能化を実現した。これにより、10Gbps光モジュールの小型化・高機能化が図られ、トータルシステムの低コスト化が実現できる。

この技術はファイバチャネルやSONET(Synchronous Optical Network)等の他のアプリケーションへの拡張やASICのインタフェースコアIP(Intellectual Property)としての利用法が考えられ、将来、広範な展開が期待される。



SOI/CMOSを用いた10GbpsイーサネットトランシーバLSI(チッププロットとブロック図)

通信ネットワーク高度化の要求により、微細化CMOS技術を駆使した超高速通信用ICの開発が急務となっている。今回、IEEE802.3ae規格準拠10Gbpsイーサネットトランシーバを、0.18μm SOI/CMOSプロセスを適用し製品化した。今後、他の10Gbps規格への対応及び更なる高速化を図っていく予定である。

\*システムLSI事業化推進センター(工博) \*\*同センター \*\*\*ULSI技術開発センター(学術博)  
+情報技術総合研究所 ++コミュニケーション・ネットワーク製作所

### 1. ま え が き

インターネットサービスの高速化の進展によって、光ファイバ網などの高速通信ネットワークは、回線規模拡大に加え高速化及び高機能化を続けている。これを実現するデバイス技術の微細化の進展によって、従来では不可能と考えられていた高周波領域まで、CMOS技術によるアナログ回路と大規模ロジック回路の集積化が可能になりつつある。

三菱電機はSOI基板を用いたCMOSプロセス技術開発によるCMOSデバイスの性能向上を図ってきたが、このたび、0.18 $\mu$ m-SOI/CMOS技術を用いてIEEE802.3ae規格対応の10GbpsイーサネットトランシーバLSIを製品化した。今後、このLSIで用いた技術を核にして、各種IPの集積化及び高速化を図っていく予定である。

### 2. 通信用LSIの動向

日本、米国における、いわゆる、IT不況により、通信機器市場は2001年から2002年にかけて厳しい状況であり、通信産業の多くの分野で疲弊が見られる。しかしながら、テレコムサービス市場ではデータサービス、VoIP (Voice over Internet Protocol)等の音声パケット通信、モバイルサービスなど力強い成長を見せている領域も多くあり、全体を見ると有望な分野であることに変わりはない。このような中、米国を中心に新しい規格が次々と生み出されている。2002年6月にIEEEが10Gbpsイーサネットの規格802.3aeを完了したのに続いて、OIF (Optical Internet Forum)においてSDH (Synchronous Digital Hierarchy) / SONET用のSFI4.2が、ANSIにおいて10GFC (Fibre Channel)が相次いで規格化された。

図1にSDH/SONET, LAN (Local Area Network), SAN (Storage Area Network)の伝送速度の変遷を示す。SDH/SONETは、64kbpsを基準とする電話回線の階層で、世代ごとに4倍の速度進化を遂げる。これに対して、LANは世代ごとに3~4年ごとに10倍されていき、SANは133Mbps, 531Mbps, 1Gbps, 2Gbps, 4Gbpsとその

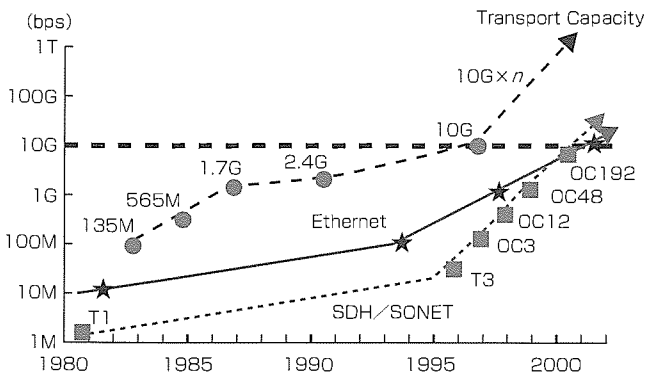


図1. 通信規格の動向

時代に得られる最速の技術を利用していく。10Gbpsは、これら三つのアプリケーションの速度がクロスオーバーする歴史的にも重要な速度であるということが出来る。

### 3. 高速動作SOIデバイスの概要

#### 3.1 SOIデバイスとは

この通信用LSIにはCMOSデバイス構造として新規なSOIデバイスを用いたが、その概要を図2を用いて説明する。SOI基板は、600 $\mu$ m程度の厚さの支持用シリコン基板上に、0.4 $\mu$ m程度の埋め込みシリコン酸化膜と0.1 $\mu$ m程度の薄膜シリコン層を持っている。SOIデバイスはこの最上層の薄膜層に作製されるため、次に述べる優位な特長がある。近年、CMOSの微細化に加えて、このような新規構造や材料を用いて性能向上を達成する技術が注目されている。

#### 3.2 SOIデバイスの特長

##### (1) 高速・高周波動作

薄膜シリコン層にトランジスタを形成するため、回路動作の負荷となるソース・ドレイン部の接合容量を低減でき、高速動作、低消費電力動作が可能である。0.18 $\mu$ mデバイスでの高速化効果としては、インバータチェーン回路で約20%、NAND回路パストランジスタ回路で約25%の高速化が得られている<sup>(1)</sup>。10Gbps級の高周波動作においては、トランジスタの接合容量を介して電力が支持基板に失われ、高周波動作が制限されるが、SOI化によってこの電力損失を抑制でき、トランジスタの最大発振周波数を向上できる。また、SOI構造では薄膜シリコン層と支持基板とが電氣的に分離されており、通常のCMOSデバイスでは採用が困難な高抵抗シリコン基板を支持基板として用いることが可能であるため、基板での電力損失を更に低減することができる。さらに、高周波回路で重要なインダクタなどの受動素子においても、電力損失の低減によってインダクタのQ値を大幅に向上できた(図3)。SOIでは、インダクタの高周波磁界によって下方の基板中に発生する渦電流と、インダクタと支持基板との容量結合を介してインダクタから支持基板に漏洩(ろうえい)する高周波電流損失を抑制でき

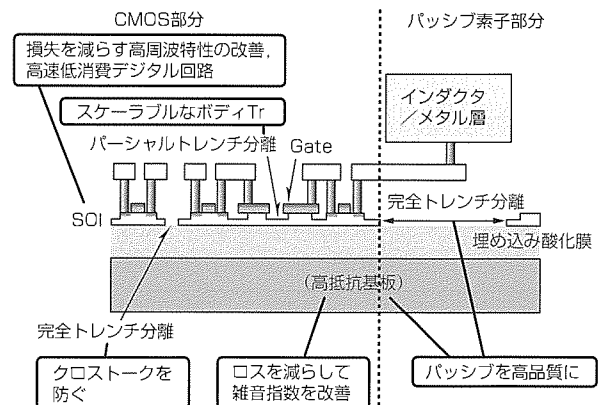


図2. SOIデバイスの特長

るためである。

(2) 回路間干渉ノイズ低減

このLSIは、高速アナログ回路とロジック回路が混載されており、典型的な高性能SOC(System On a Chip)である。しかし、このような混載回路においては、回路間のノイズ干渉が課題の一つである。SOIデバイスでは、回路下に存在する埋め込み酸化膜と高抵抗支持基板によってこのノイズを大幅に低減できる。実測では約20dB干渉ノイズが抑制できることが確認できた(図3)。この特長は、この光通信用LSIだけでなく、無線通信用LSIなどアナ/デジ混載回路においても効果的と考えられる。

(3) 高信頼性

通信用システムは常時動作しており、それに用いるLSIボードにおいては活線挿抜が不可欠であるため、LSIにはラッチアップというデバイス誤動作に対する耐性が強く求められる。SOIデバイスでは、ウェル間をシリコン酸化膜で完全に分離したため、このラッチアップを完全に抑制できた。また、ソフトエラー現象がCMOS回路の課題の一つであるが、微細化が進み低電圧化されると原理的に発生率が増加するため、メモリ回路だけでなく論理回路においても懸念され始めた。SOI構造では、埋め込み酸化膜によって接合部がないため発生を2けた以上抑制できる<sup>(1)</sup>。これらの誤動作抑制により、極めて高い信頼性が要求される高度通信ネットワークシステムにおいて、SOIデバイスの高信頼性が効果を発揮できる。以上のように、SOIデバイスは高性能通信用LSIに最適の構造である。

4. 10GbpsトランシーバLSI(M69850)の概要

4.1 システムの概要

図4にこのLSIを用いた光モジュールの概要図を示す。このLSIの送信パスは、MAC(Media Access Control)から最大50cm程度のバックプレーンを介して光モジュールまで接続される3.125Gbps 4並列のXAUI(10Gbps Attachment Unit I/F)の信号を10Gbps高速シリアル信号に変換し、PMA(Physical Media Attachment)インタフェースに出力する。レーザダイオードでは、その電気信号を光信号に変換し、光ファイバに出力する。逆に受信パスは、フォ

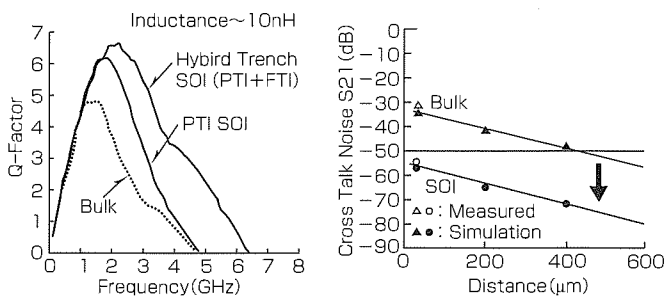


図3. インダクタのQ値向上と回路間干渉ノイズの低減効果

トダイオードからの高速シリアル電気信号を受け、XAUIに変換して、MACに送る。

4.2 トランシーバLSIの概要

扉ページに掲げたこのLSIのブロック図について述べる。XAUI側には、入力データからクロックを再生しデータを適切なタイミングでキャプチャするCDR回路、3.125Gbps信号を1:10変換するDeserializer, 内部クロックから3.125GHzクロックを生成するCMU(Clock Multiplication Unit), 10:1 Serializerなどの高速動作部を備えている。高速動作部の入出力は、テストなどで用いられるLoop Back経路を介して、8B10Bエンコーダ/デコーダ部に接続される。

PMA側は、XAUI同様、CDR, CMU, SERDES回路に加えて、64B66B符号化復号化を行う64B66Bエンコーダ/デコーダ, 同符号化の結果生じるデータレートの偏差を吸収するGear Box回路を備えている。XAUI側とPMA側はそれぞれ±100ppmのクロック偏差を許容するため両者で動作周波数が厳密には異なるのでElastic FIFO(First-In First-Out)を配置している。このFIFOにはアイドルデータの挿抜を行うことで速度差調整を行う機能が具備されている。

また、LSIの制御のためにIEEE802.3ae規格準拠のMDIO(Management Data Input Output)インタフェース, 及び制御用レジスタを備えている。

高速入出力IO回路は、AC結合の100Ω内部終端の差動インタフェースとなっている。このLSIは0.18μm SOI/CMOSプロセス<sup>(2)(3)</sup>を使用して設計した。表1にトランシーバLSIの諸元を示す。

4.3 XAUI部の詳細

図5にXAUI部のブロック図を示す。XAUIの4並列データの各入出力をレーンと呼ぶが、受信側はレーンごとにCDRを備え、レーン間のタイミングスキューにかかわらず正しくデータをキャプチャできる。リタイムされたデータは1:10にシリアル・パラレル変換され、いったんレーン0のクロック系に載せ換えられて8B10Bデコーダに送られる。

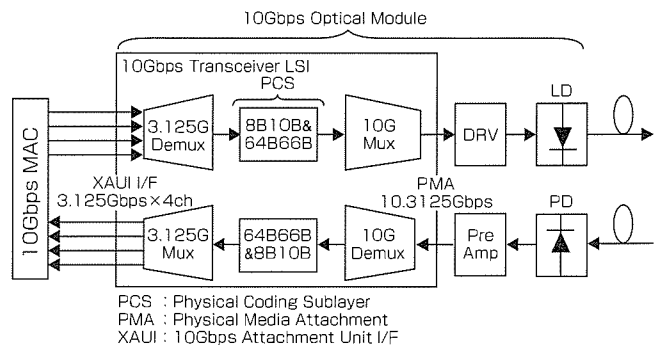


図4. 10Gbps光モジュールの概要図

この時点では、各レーンのデータは任意の位置でパラレル変換されているためバイト先頭がそろっていない。8B10B符号のコンマパターンの特質を利用してSynchronizeブロックでバイト先頭を見つけ、パレルシフトでバイト整合をとる。次に、最短でも16シンボル間隔でしか存在しないアライメントパターンを用いてレーン間のdeskewingを行う。最後に、8B10Bデコーダで、8B10Bの10ビットパターンをXGMII(10Gbps Media Independent Interface)形式にマッピングする。以上のように、8B10B符号の性質を利用して4レーンシリアルインタフェースを実現している。

以下に、8B10B符号の特長を示す。

- (1) 1と0の出現確率を等しく制御し信号のDCバランスを保つことで、伝達特性を向上させる。また、AC結合の入出力バッファが利用可能となる。
- (2) 1又は0の連続長を制限しデータ遷移頻度を保つことで、受信側回路におけるクロック再生を容易にする。最長同符号連続数は、後述のコンマパターンで現れる5である。
- (3) 8ビット空間を10ビット空間にマッピングするため、

表 1. 10Gbps イーサネット トランシーバ LSIの諸元

Process	0.18μm SOI/CMOS
Voltage Supply	1.8V
Power Dissipation	2.9W@1.8Vsupply
Data Rate	3.125Gbps (XAUI) 10.3125Gbps (PMA)
Logic Gates	150k Gate
Package	12mm×12mm 196-BGA

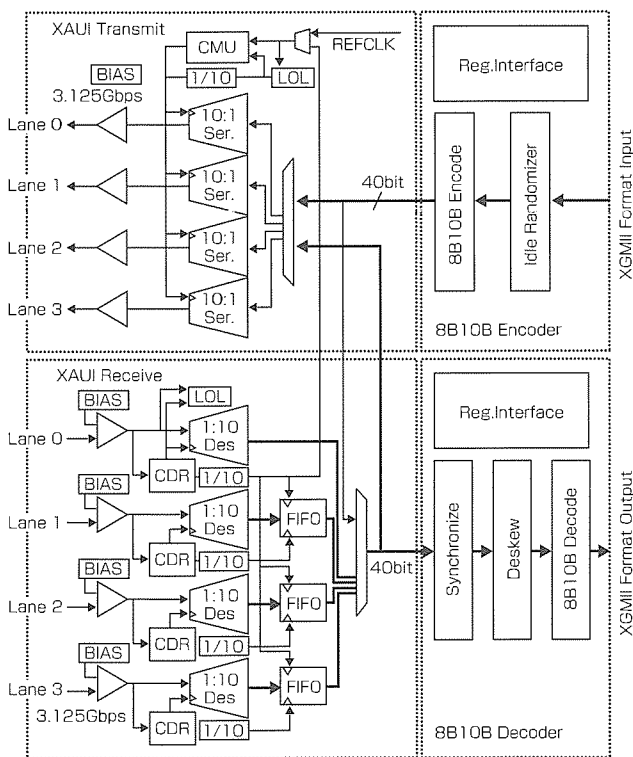


図 5. XAUI部のブロック図

出現し得ないビットの組合せが生じる。これを利用してビットエラー検出を可能にする。

(4) 上記の出現し得ない組合せを利用して制御コマンドを送るためのSpecial Characterを定義できる。これを用いてアイドル区間、パケット先頭などを示す。

(5) 特定のSpecial Character(K28.5, K28.1, K28.7)に含まれるコンマパターンを用いることで、10ビットの区切りが検知でき、バイトアライメントを可能にする。

次に、XAUI送信側では、Idle randomizerによって、受信側で利用するコンマパターンやアライメントパターンがアイドル期間中適切に、しかも特定周波数のスプリアス発生を抑圧するためランダムに配置されるように、アイドルデータの生成を行う。その後、8B10B符号でXGMII形式データを10ビットデータ列に変換し、10:1のSerializerを通して出力する。出力データのDCバランスを保つため、既出力の1と0の数の差から計算されるRunning Disparity (RD)を導入し、RDが0に近づくように10ビットの組合せを選ぶ。図6にXAUIの3.125Gbps出力波形を示す。

#### 4.4 PCS/PMA部

図7にPCS部及びPMA高速動作部のブロック図を示す。XAUI受信部からFIFOを介して渡されたXGMII形式データは、まず、64B66Bエンコーダで64ビット単位のブロックにマッピングされる。続いて、 $X^{58}+X^{39}+1$ なる生成多項式でスクランブル処理がなされ、ブロック同期用Sync. Headerの2ビットを付加してGear Boxに送られる。Gear Boxでは、64ビット時間内に66ビットを伝送するための速度変換を行い、5GHz DDR(Double Data Rate)動作のSerializerによって10Gbpsシリアルデータに変換し、出力バッファから出力する。

送信側ブロックはこの逆で、10Gbpsシリアルデータを受信し、CDRでクロックとデータを回復し、パレル展開の後、データは64B66Bデコード部に送られる。ここでは、Sync. Headerを発見することで66ビットブロックの同期をとり、スクランブル解除後にXGMII形式に再マップする。受信側では、モニタブロックでSync. Headerの誤りや、

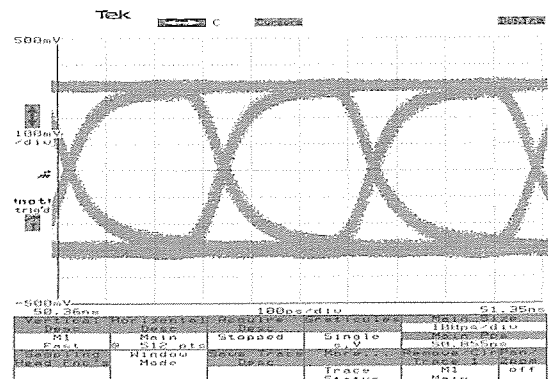


図 6. XAUIの出力波形

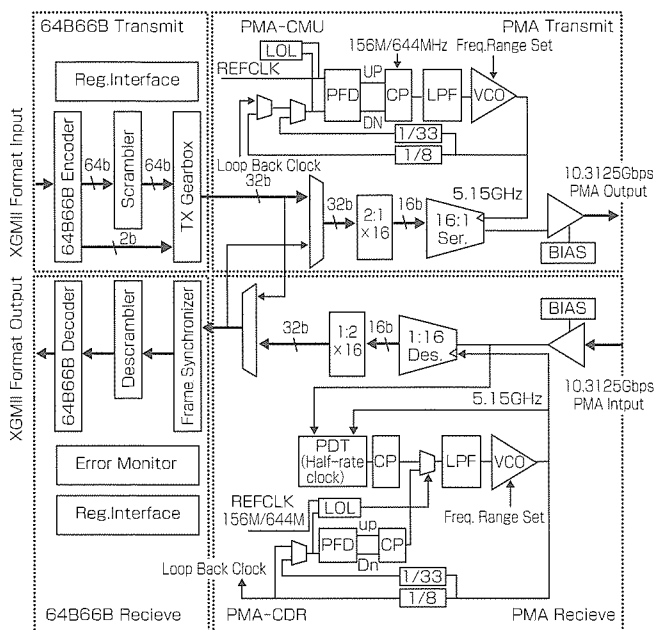


図7. PCS/PMA部のブロック図

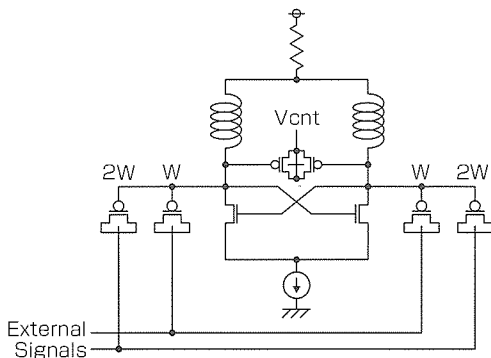


図8. インダクタを用いたVCO回路

あり得ないブロックをチェックし、回線状態の監視を行う。

図8にインダクタを利用したLCタンクVCO (Voltage Controlled Oscillator)回路を示す。上位配線を用いたLと蓄積モードのMOSキャパシタを用いており、キャパシタ数をデジタル的に制御することで4.6~5.5GHzの幅広いロックレンジを確保している。

### 5. ユーザー評価用ボード

高速デバイスをユーザーが測定評価する負荷を軽減するため、M69850を搭載したデータ転送評価用ボードを開発した。このボードは、MDIOをパソコンから制御することで様々なテストを実施することができる。評価ボードの外観を図9に、同ボードを用いて測定した10Gbps波形を図10に示す。

### 6. むすび

当社の光通信システムLSI技術として、IEEE802.3aeとして標準化された10Gbpsイーサネットのキーデバイス

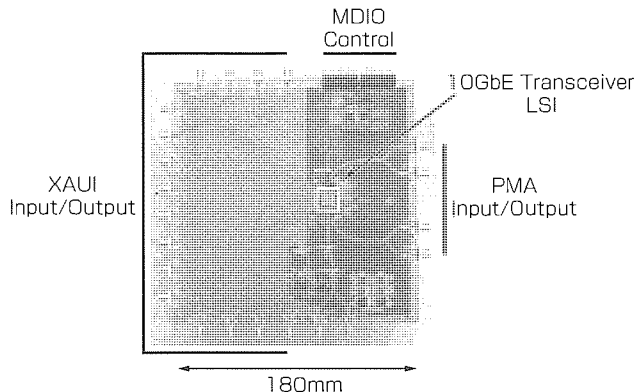


図9. M69850評価ボード

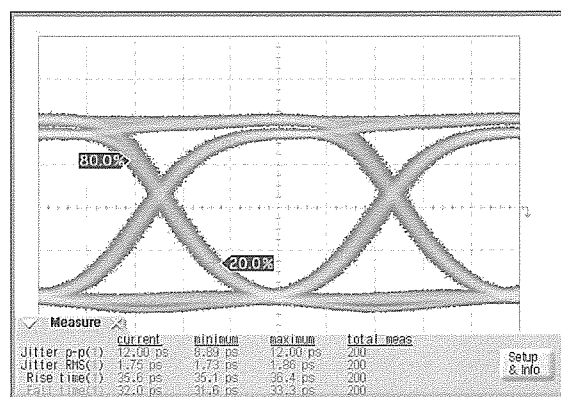


図10. 10Gbps出力波形

であるトランシーバLSIの開発状況を示した。部分空乏型0.18 $\mu$ m-SOIを用い、10Gbpsの動作速度をCMOSで実現した。消費電力は2.9W (typ.)で、従来の化合物やSiバイポーラ技術によって低消費電力で、かつ複雑なロジックをオンチップ化できた。

今後、コアのIP化も含め、10GFC、SONET等への展開も視野に更なる高性能化・多機能化の製品開発を進め、情報化社会のキーデバイス開発を発展させていく所存である。

### 参考文献

- (1) Hirano, Y., et al.: Impact of 0.10 $\mu$ m SOI CMOS with Body-Tied Hybrid Trench Isolation Structure to Break Through the Scaling Crisis of Silicon Technology, Technical Digest of Int. Electron Devices Meet. '00, 467~470 (2000)
- (2) Yoshimura, T., et al.: A 10Gbase Ethernet Transceiver (LAN PHY) in a 1.8V, 0.18 $\mu$ m SOI/CMOS Technology, IEEE Custom Integrated Circuits Conference, Proceedings 20.1 (2002)
- (3) Nakura, T., et al.: A 3.6-Gb/s 340-mW 16:1 Pipe-Lined Multiplexer using 0.18 $\mu$ m SOI-CMOS Technology, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 35, No. 5, 751 (2000)



# 光コンポーネント技術

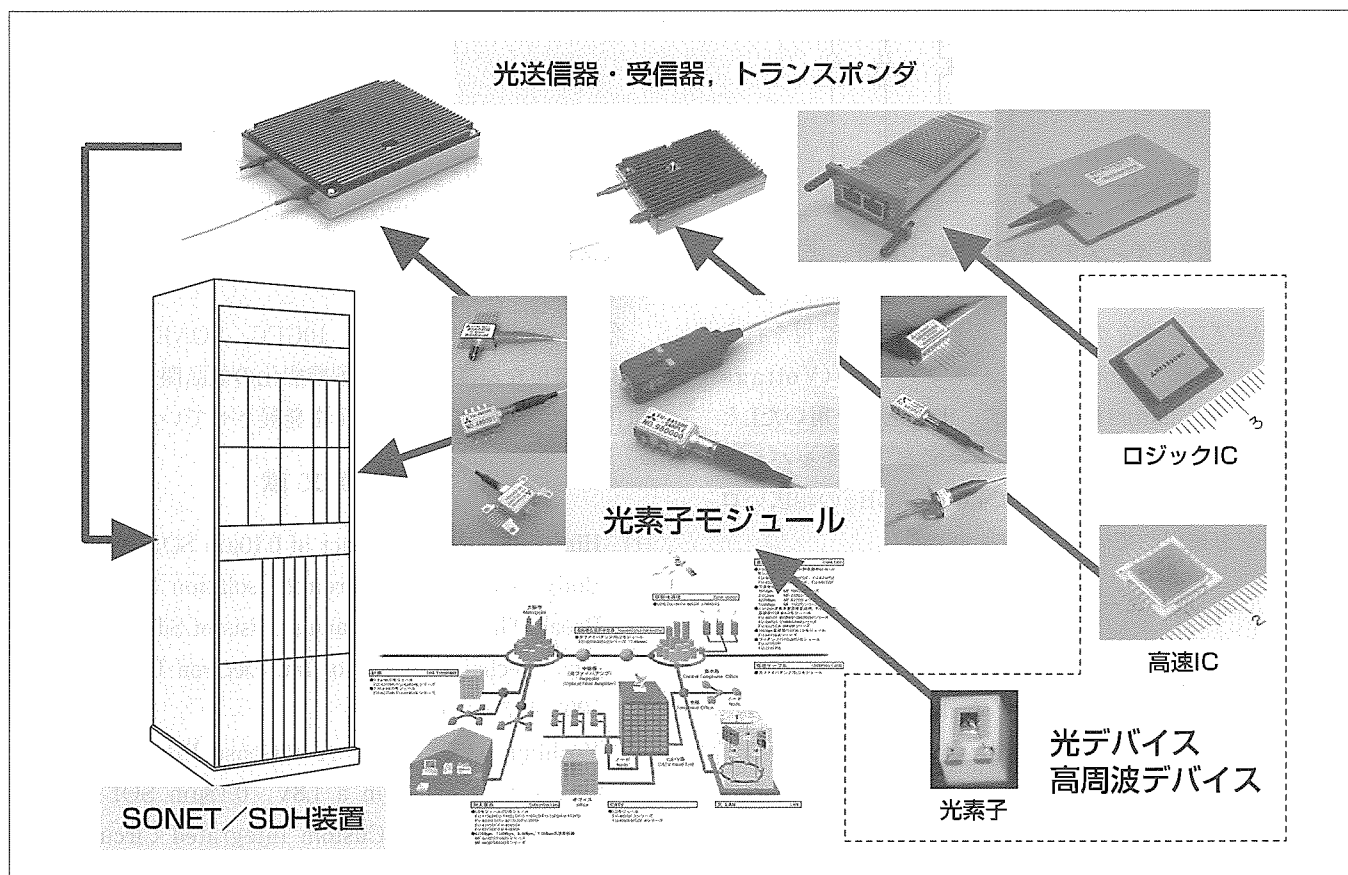
平井俊之\*

## 要旨

光ファイバ通信には、光信号と電気信号の変換及び光信号の分岐や多重化、ファイバ伝送によるひずみ補償のように光波領域での信号処理など光通信特有の機能を果たす部品が必要である。三菱電機では、これらの部品を光電子機器と称し、社内の優れた光デバイス・高周波デバイスを基本として製品化を行い、事業展開してきた。光素子モジュール化技術、光送受信器構築技術により、光ファイバ通信の高速化・長距離化に対応できる光素子モジュールと光送受信器製品群を世に送り出している。

2000年の光通信バブルの崩壊を経て、現在、当社では、2.5Gbpsクラス以上の製品開発に注力し、光電子機器の長距離化・高速化を目指した開発を進めている。これに加えて、光電子機器の小型化・低消費電力化・低価格化へ向けた開発にも注力している。

本稿では、LDモジュールから光送受信器、分散補償器等広い製品ラインアップを持つ光コンポーネント事業の概要と製品紹介を行う。



## 光ファイバ通信システムを支える光電子機器

当社では、社内の優れた光デバイス・高周波デバイスを基本として、光素子モジュール化技術、光送受信器構築技術により、光ファイバ通信の高速化・長距離化に対応できる光素子モジュールと光送受信器製品群を世に送り出している。

## 1. ま え が き

光ファイバ通信システムは、インターネットの普及によるデータトラフィックの急速な増加に伴って開発が加速され、1995年ごろから著しい進展を見せた。光ファイバ通信には、光信号と電気信号の変換及び光信号の分岐や多重化、ファイバ伝送によるひずみの補償などの光波領域での信号処理などの光通信特有の機能を果たす部品が必要である。

当社では、これらの部品を光電子機器と称して製品化を行ってきた。現在、当社の光電子機器は、光送受信器、光素子モジュール及び可変分散補償器等の高機能部品までを含み、国内外の通信システムのキーパーツとして世界各国に提供している。

本稿では、当社における光電子機器の開発状況について概観し、光通信システムに使われる光送受信器及びその構成コンポーネント等の製品群について説明する。

## 2. 当社における光電子機器の開発状況

当社は、1970年における光ファイバの低損失化の成功と半導体レーザーの室温連続発信を契機に、1972年に光電子機器の研究開発への本格的取り組みを開始した。

当初、光ファイバ通信システムはマルチモードファイバを用いた方式が主流であり、当社も、1981年までに、32Mbpsまでの各種マルチモード光ファイバ用に、発光ダイオード(LED)モジュール、LDモジュール、PDモジュール、及び光分配器、光合分波器、光スイッチ、光スターカプラなど一連の光素子モジュール並びに光受動部品の開発を完了した。その後、光ファイバの主役がマルチモードファイバからシングルモードへ移ったのに伴い、いち早くシングルモード光ファイバ用LDモジュールの製品化を行った(1984年)。これを契機に、広く国内外のユーザーに当社の

光電子機器が使用されるようになった。また、光通信の分野では、そのIC化に戦略的に取り組み、6.3Mbpsクラス、200Mbpsクラス、600MbpsクラスのIC化光送受信器の開発製品化を次々と行った。また、携帯電話用簡易光基地局の製品化など、光通信の新しい応用分野へも積極的に新製品を提案してきた。光素子モジュールの分野では、レセプタクル形のシングルモードLDモジュールやRFサブキャリアによるアナログ多重伝送を可能としたCATV用DFB-LDモジュールなどをいち早く製品化するなど、この分野でのパイオニアとしての役割を果たしてきた。

その後、当社では、海底ケーブル網、公衆通信幹線/支線網、加入者網、CATV網、携帯電話網、LAN/コンピュータリンク網及び計測器用等の幅広い応用分野に対し、光伝送の長距離化・高速化・多重化・高密度化に対応できる光電子機器の開発を進めた。1995年からのインターネットトラフィックの急増により、事業の主体は公衆通信幹線/支線網のいわゆるテレコム向け光電子機器が中心となった。

2000年の光通信バブルの崩壊を経て、現在、当社では、2.5Gbpsクラス以上の製品開発に注力し、光電子機器の長距離化・高速化に加えて、小型化・低消費電力化・低価格化・高機能化を目指した開発を進めている。また、データコムとテレコムとの融合の可能性を秘めた10Gbpsイーサネット用トランシーバの開発も積極的に進めている。図1に、光通信の伝送速度と通信距離に対応する当社の光電子機器の対応領域を示す。

## 3. 当社の光電子機器製品の概要

この章では、光通信の応用分野ごとに、当社の主な光電子機器を紹介する。図2に、光通信の伝送容量と通信距離を座標とした、当社のLDモジュールの対応マップを示す。また、表1に、ITU標準一覧と当社の光送受信器の対応状

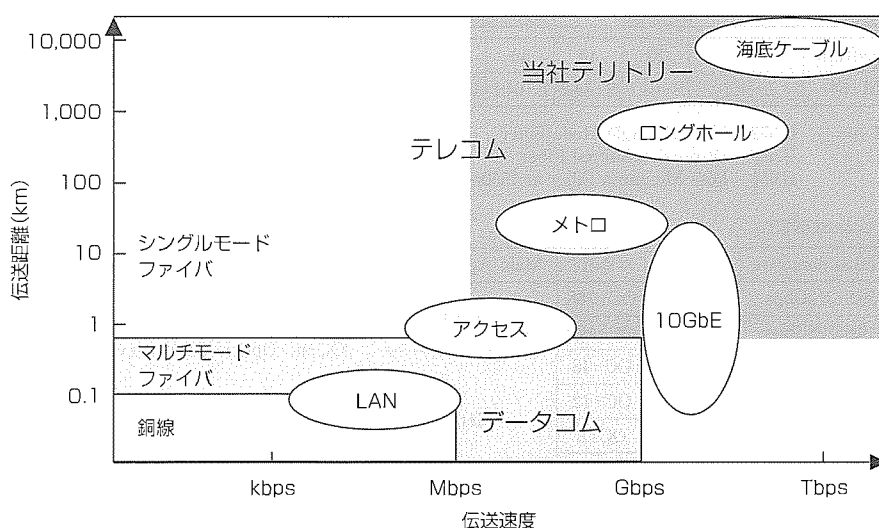


図1. 通信領域マップ

況を示す。

3.1 2.5Gbps (STM-16, OC-48)

公衆通信幹線網及び支線網では、国際的に統一された新同期網の建設が各国において急ピッチで進められ、現在、ビジネスの主体は2.5Gbps (STM-16, OC-48) となっている。

当社のこれらの標準に対応する光送受信器を表2に示す。

また、図3に、この光送受信器の外観の一例を示す。

表3には、当社の2.5Gbps光素子モジュールを示す。ショートホール用には当社の1.3μm非冷却直接変調DFB-LD、アイソレータ、バイアス回路を内蔵したmini-DILタイプを推奨している。また、メトロ用には1.55μm非冷却直接変調DFB-LDを用いたmini-DILタイプを、ロングホール用にはアイソレータ、バイアス回路及び冷却素子を内蔵し

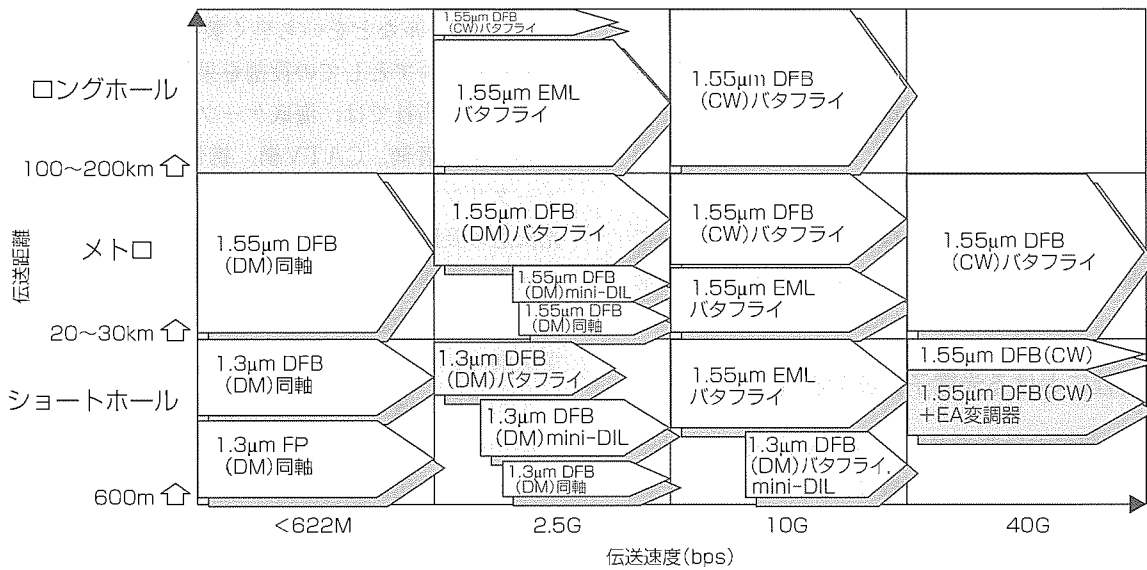


図2. LDモジュールの対応マップ

表1. ITU標準と当社の対応

ITU standard		Intra Office			Short Haul			Long Haul			Very & Ultra Long Haul							
Application		1310			1550			1310			1550							
Wavelength (nm)		1310			1550			1310			1550							
Optical Fiber type		G.652	G.652	G.652	G.652	G.652	G.652	G.652	G.653	G.652	G.652	G.653	G.652	G.653				
Distance (km)		2			15			40			60			80		120		160
STM Level	STM-1	I-1	S-1.1	S-1.2	L-1.1	L-1.2	L-1.3	-										
	STM-4	I-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	L-4.3	V-4.1	V-4.2	V-4.3	U-4.2	U-4.3	-					
	STM-16	I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3	V-16.1	V-16.2	V-16.3	U-16.2	U-16.3	-					
STM Level	Distance (km)	-			20			40			80			120		-	-	
	STM-64	I-64.1	S-64.1	S-64.2	L-64.1	L-64.2	L-64.3	V-64.1	V-64.2	V-64.3	-		-	-				

Optical Fiber Type G.652 Normal Single Mode Fiber  
 G.653 Dispersion Shifted Fiber  
 G.654 Loss Minimum Fiber at 1550nm

□ : 当社の光送受信器 対応領域

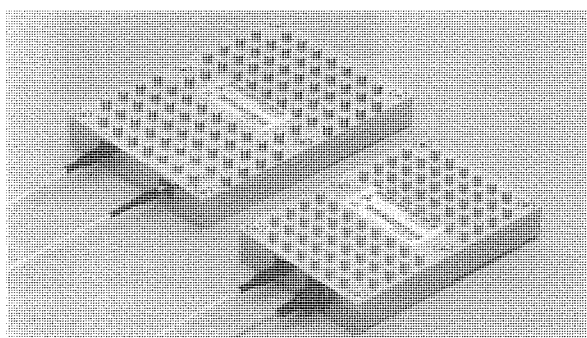
Hierarchy of ITU & SONET

Hierarchy	Actual data rate	ITU	SONET	Main Application
40G	39.81312Gbps	STM-256	OC-768	Trunk
10G	9.95328Gbps	STM-64	OC-192	
2.5G	2.48832Gbps	STM-16	OC-48	
622M	622.08Mbps	STM-4	OC-12	Metro
156M	155.52Mbps	STM-1	OC-3	
52M	51.84Mbps	STM-0	OC-1	
Group2	6.312Mbps			Access
Group1	1.544Mbps			
Group0	64kbps			

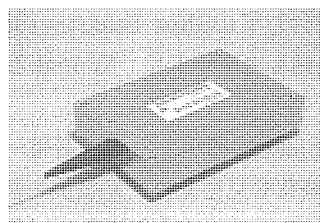
ITU : International Telecommunication Union  
 STM-n : Synchronous Transfer Module level-n (ITU)  
 SONET : Synchronous Optical Network  
 OC-n : Optical Carrier level-n (SONET)

表 2. 2.5Gbps 光送受信器

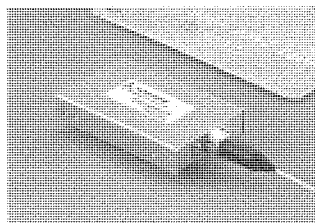
型名	伝送距離	特長
MF-2500STA-002VA	15km	S-16.1 送信器
MF-2500STA-002WA		
MF-2500STA-003VA	40km	L-16.1 送信器
MF-2500STA-003WA		
MF-2500STA-004VA	80km	L-16.2 送信器
MF-2500STA-004WA		
MF-2500SRA-002VA	15km	S-16.1 受信器
MF-2500SRA-002WA		
MF-2500SRB-002VA	40km	L-16.1 受信器
MF-2500SRB-002WA		
MF-2500SRB-003VA	80km	L-16.2 受信器
MF-2500SRB-003WA		
MF-2500MXB-003××	40km	L-16.1 トランスポンダ
MF-2500MXB-004××	80km	L-16.2 トランスポンダ
MF-27WTA-*****	80km	L-16.2 WDM送信器
MF-2700FRA-*****	15km	S-16.1 2R 受信器
MF-2700FRB-*****	80km	L-16.2 2R 受信器



(a) 2.5Gbps トランスポンダ



(b) 2.5Gbps 送信器



(c) 2.5Gbps 受信器

図 3. 2.5Gbps 光送受信器の外観

700km伝送が可能なEA-LDモジュールを推奨している。図 4 に主な製品の外観を示す。

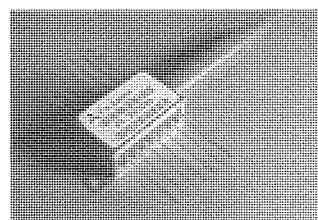
### 3.2 10Gbps (STM-64, OC-192)

1998年ごろから、データトラフィックの急増を受けて更に高速な10Gbps(STM-64, OC-192)への期待が高まり、開発競争の激化をもたらした。その後の光通信不況によって事業の拡大は小休止状態であるが、開発競争は休みなく続いており、機能・性能の向上に加えて、量産性に優れ低価格であること、小型で高密度実装可能なこと、低消費電力であること等が求められる。

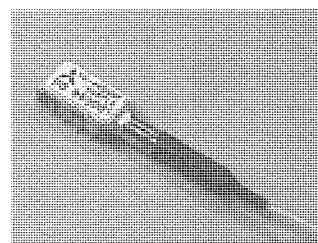
当社では、10Gbps(STM-64, OC-192)用光電子機器と

表 3. 2.5Gbps 光素子モジュール

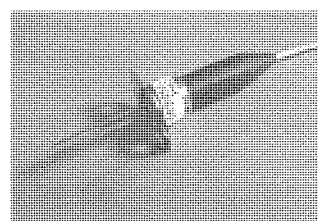
アプリケーション	型名	波長	特長	
直接変調	シングルチャンネル	FU-436SDF-F5M1	1.3μm	非冷却, 同軸
		FU-636SDF-F5M1	1.55μm	非冷却, 同軸
		FU-445SDF-W1M1C	1.3μm	非冷却, mini-DIL
		FU-645SDF-W1M1B	1.55μm	非冷却, mini-DIL
	CWDM	FU-636SDF-F×6M1×	1.55μm	非冷却, 同軸
		FU-645SDF-×2M1×		非冷却, mini-DIL
	WDM	FU-68SDF-V810M××B	1.55μm	10mW <sub>peak</sub> , 1,800ps/nm
		FU-68SDF-V902M××B		2mW <sub>peak</sub> , 3,000ps/nm
	WDM EA-LD	FU-632SEA-3M××	1.55μm	6,400ps/nm
		FU-632SEA-6M××		12,800ps/nm
外部変調器用 (~10Gbps)	FU-68PDF-V510M××B	1.55μm	10mW, C&L, PM-Fiber	
	FU-68PDF-V520M××B		20mW, C&L, PM-Fiber	
PD	FU-319SPP-6M20	1.3/1.55 μm	単一電源+3.3V, 同軸	
APD	FU-319SPA-6M20			



(a) FU-68PDF



(b) FU-445SDF



(c) FU-319SPP

図 4. 2.5Gbps 光素子モジュールの外観

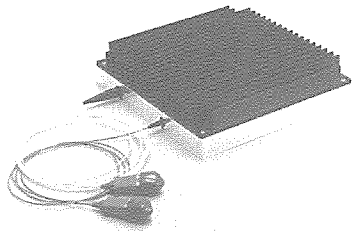
して、多重化・多重分離機能を内蔵し、小型・低消費電力を実現した10Gbpsトランスポンダを製品化している。製品マップを図 5 に、外観を図 6 に示す。表 4 には、当社の10Gbps光素子モジュールを示す。ショートホール用には1.3μm非冷却直接変調DFB-LD、アイソレータ、バイアス回路を内蔵したmini-DILタイプを、また、中距離用にはEA-LDモジュールを推奨している。図 7 に主な製品の外観を示す。

### 3.3 10Gbps Ethernet

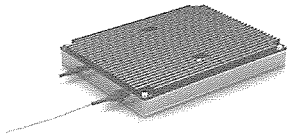
EthernetはLAN標準として広く普及しており、1990年

WDM	—			
LR-2	80km		10K-MXH 35×45×0.53	10K-DXA 35×45×0.53
IR-2	40km	10K-MXA 50×50×1.1	10K-MXG 35×45×0.53	10K-MXV 22×30×0.53
10GBASE-ER	40km		11K-MXB 35×45×0.53	
IR-1	20km			
10GBASE-LR	>10km		10K-MXF 35×45×0.53	10K-MXW 22×30×0.53
SR-1	2km		11K-MXA 35×45×0.53	10K-MXM 22×30×0.53
VSR-1	600m			
生産中		ジッタフィルタ内蔵	ジッタフィルタ非内蔵	ジッタフィルタ内蔵
サンプル提供中		シングルビットレート	マルチレート	
開発中		SONET/10GbE(9.95/10.3/10.7/11.1Gbps)		

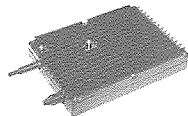
図5. 10Gbps トランスポンダの製品マップ



(a) 10K-MXA



(b) 10K-MXG

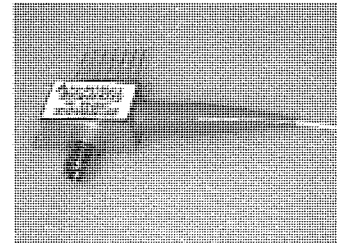


(c) 10K-MXM

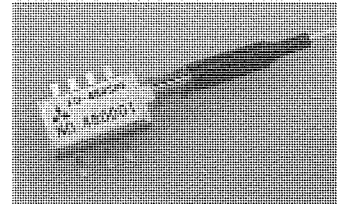
図6. 10Gbps トランスポンダの外観

表4. 10Gbps 光素子モジュール

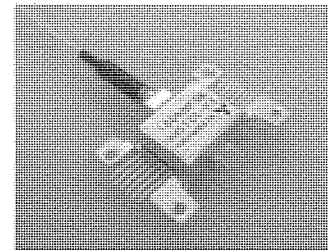
アプリケーション		型名	波長	特長
直接変調	シングルチャネル	FU-480SDF-W1M1	1.3μm	非冷却 mini-flat
		FU-484SDF-W*M1		Semi-cooled
		FU-481SDF-W1M1		非冷却 mini-flat
EA / LD	シングルチャネル	FU-641/653SEA-1M3	1.55μm	36ps/nm(2km)
		FU-641/653SEA-1M1		130ps/nm(7km)
		FU-641/653SEA-1M4		400ps/nm(20km)
		FU-641/653SEA-1M2		800ps/nm(40km)
		FU-641/653SEA-1M5		1,200ps/nm(60km)
		FU-641/653SEA-1M6		1,600ps/nm(80km)
	DWDM	FU-641/653SEA-2M*		800ps/nm(40km)
PD		FU-312SPP	1.3/1.55 μm	バタフライ
APD		FU-321SPA		



(a) FU-641SEA



(b) FU-480SDF



(c) FU-321SPP

図7. 10Gbps 光素子モジュールの外観

の10BASE-Tの標準化を契機に高速化が進み、1998年には1 Gbpsの規格化まで進んだ。1999年には早くも10Gbps規格の検討がスタートし、2002年7月IEEE802.3aeとして制定された。表5に10Gbps Ethernetの規格を示す。2000年にはIEEEの標準化作業と並行して10Gbps Ethernet用トランシーバのMSA標準化活動もスタートし、Xenpakとして制定されている。

当社は、いち早くこのXenpak用トランシーバの開発・製品化を行った。将来の低価格化も見据えて、Xenpak専用の低価格化LDモジュールやPDモジュールを開発し、各種性能の10Gbps Ethernet製品を提供する予定である。表6にEthernet用トランシーバの仕様を、図8に製品の外観を示す。

### 3.4 DWDMアプリケーション

当社では、DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)アプリケーション向けに、高性能なCW光源やEA-LDモジュールを提供してきた。DWDM用光源はDWDMの各波長に対応して多くの品種をそろえる必要があり、利用者にも製造者にとっても多品種の維持はできるだけ避けたいところである。近年、品種削減の手段としてチューナブル光源の開発が進んでいる。また、従来外部にあった波長モニタ機能を内蔵したCW光源の開発も盛んである。

当社では、これらの要求に対処するため、温度チューナブルLDモジュール及び波長モニタ内蔵光LDモジュールを

表 5. 10Gbps Ethernetの規格

IEEE802.3ae		ファイバ伝送距離		
LAN-PHY	WAN-PHY	光トランシーバ	マルチモード	シングルモード
10G BASE-ER	10G BASE-EW	1.55 $\mu$ m シリアル	—	40km
10G BASE-LR	10G BASE-LW	1.3 $\mu$ m シリアル	—	10km
10G BASE-LX4	10G BASE-LW4	1.3 $\mu$ m WDM	300m	10km
10G BASE-SR	10G BASE-SW	0.85 $\mu$ m シリアル	65m	—

表 6. 10GbE XENPAKトランシーバの仕様

型名	MF-11KCXB	MF-11KCXC
ファイバ伝送距離	≤10km 10GbE (10GBASE-LR)	≤40km 10GbE (10GBASE-ER)
発光素子/受光素子	1.3 $\mu$ m 非冷却 DFB/PIN-PD	1.55 $\mu$ m ILM/PIN-PD
消光比 (dB)	6.0(Typ.)	8.2(Typ.)
消費電力	5.2W (Typ.)	6.0W (Typ.)
電気インタフェース	XAUI&MDIO	XAUI&MDIO
寸法	115.2×36×17.4 (mm)	115.2×36×17.4 (mm)

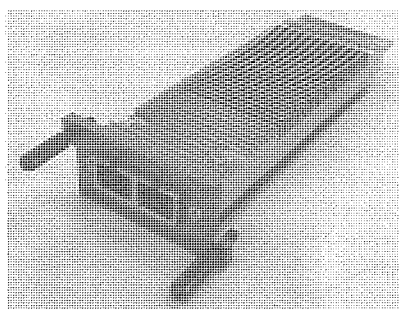


図 8. 10GbE XENPAKトランシーバの外観

表 7. 温度チューナブルLDモジュール, 波長モニタ内蔵LDモジュール

型名	出力パワー	特長
FU-68PDF-V620M××B	20mW	温度チューナブル, 4ch(50GHz)
FU-69PDF-V620M××	20mW	温度チューナブル, 8ch(50GHz)
FU-672PDF-V1M××	10mW	波長モニタ, ±30pm
FU-672PDF-V2M××	20mW	波長モニタ, ±30pm
FU-672PDF-V22M××	20mW	波長モニタ, ±8pm
FU-675PDF-V1M××	10mW	波長モニタ, ±30pm
FU-675PDF-V2M××	20mW	波長モニタ, ±30pm
FU-675PDF-V22M××	20mW	波長モニタ, ±8pm

製品化している。表 7 に、これらのLDモジュールを示す。この波長モニタの手段としては、図 9 に示すように、波長モニタ曲線の有効範囲が500GHzという長周期の複屈折フィルタ方式と、25GHz周期で波長モニタ特性が得られるエタロンフィルタ方式の2種類を用意している。どちらの波長モニタ方式も当社独自の温度補償タイプのフィルタ方式を採用しており、安定な波長モニタ特性を実現している。複屈折フィルタ方式は任意の波長へのロックが必要な場合に、また、エタロンフィルタ方式は高い波長モニタ感度が必要な場合に有効である。図10に製品の外観を示す。

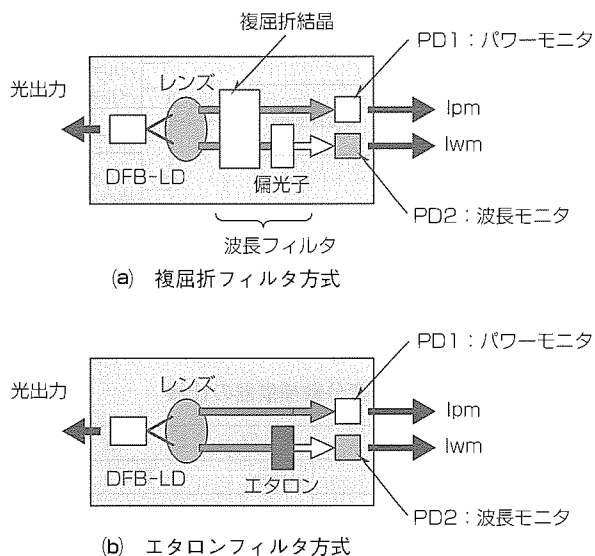


図 9. 波長モニタ方式

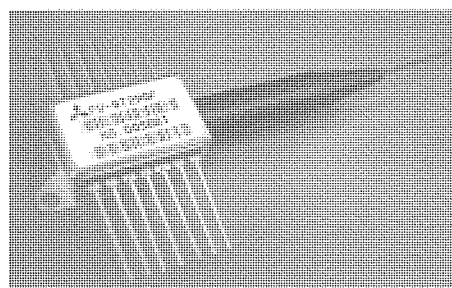


図10. 波長モニタモジュールの外観

### 3.5 次世代光電子機器

光増幅器, 波長多重用デバイス, 高速・広動作温度範囲LDモジュール及び低消費電力・超高速IC等の部品技術の発展により、更なる高速化・長距離化を目指した技術開発が進められている。40Gbps以上での長距離伝送を実現するためには、光ファイバ伝送による種々のひずみを補正する必要がある。40Gbps光伝送では、波長分散や偏波モード分散等の環境変化に対する補償が必要であり、機能・性能を低価格で実現することが40Gbps長距離伝送システム実現の鍵(かぎ)の一つである。

当社は、これらの技術の開発に積極的に取り組んでいる。ここでは、波長分散に対応するための可変分散補償器について特にその分散可変制御方式について述べる。

表 8 に、当社の可変分散補償器の仕様を示す。光伝送特

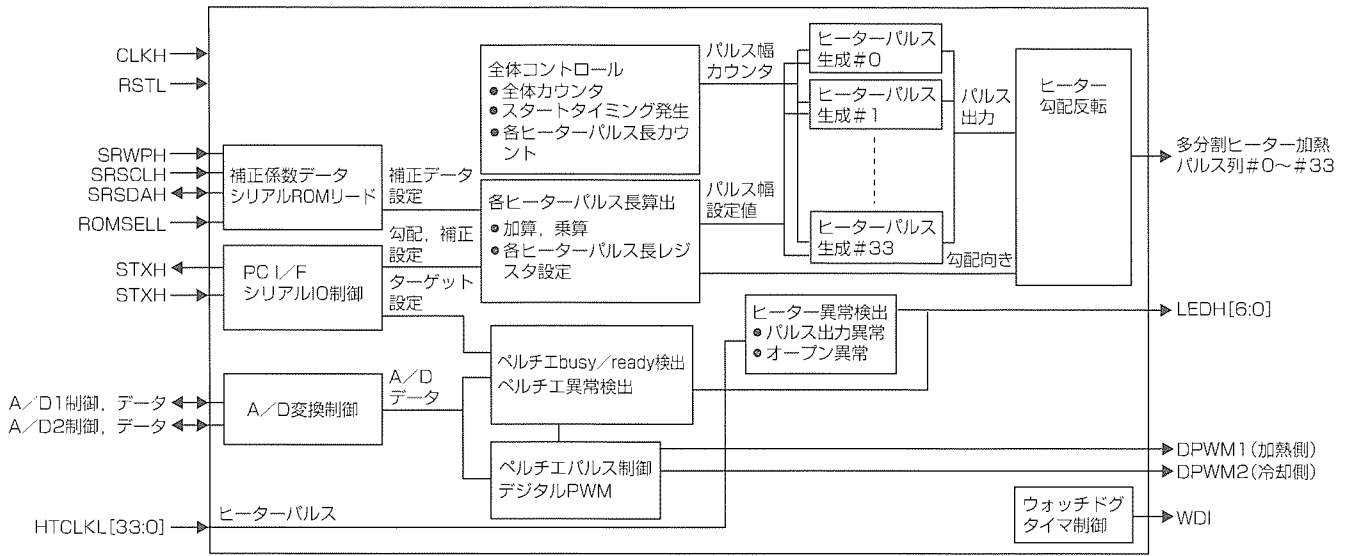


図11. 可変分散補償器制御回路

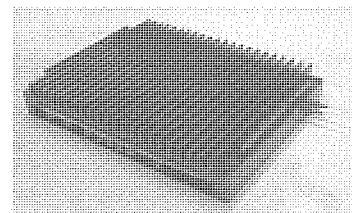
表 8. 可変分散補償器の仕様

項目	単位	仕様
ビットレート	Gbps	40
中心波長	nm	1527~1610
-1dB帯域幅	nm	0.6以上
分散可変範囲	ps/nm	370
群遅延リプル	ps	2
挿入損失 (サーキュレータを含む)	dB	4
寸法	mm	110×145×14
消費電力	W	3
サーキュレータ	—	内蔵
制御インタフェース	—	RS-232C

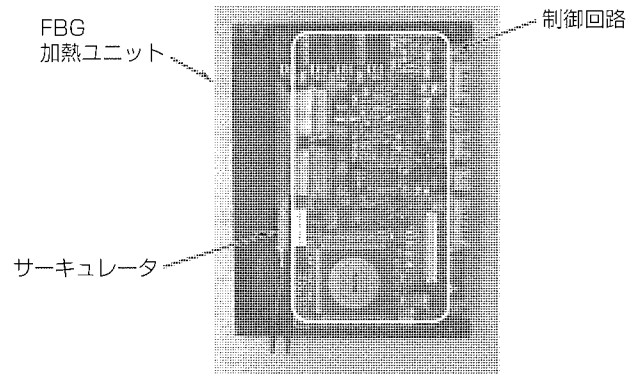
性は光ファイバグレーティング形成技術に依存し、分散可変制御はこの光ファイバグレーティングの長手方向に温度分布を持たせること、及びその中心温度をペルチエ素子で一定温度に制御することによって実現している。光ファイバグレーティングの温度分布は、ファイバの下に置かれた多分割薄膜ヒーターによって形成される。多分割薄膜ヒーターへの電力供給は、パルス位置変調されたパルス電流群によって達成される。ファイバの温度分布は、パルス電流群のパルス幅制御によって達成される。図11に可変分散補償器の制御回路を、図12にその外観を示す。

#### 4. む す び

光ファイバ通信が実用化されてから既に四半世紀もの歳月が経過した。この間、光通信技術は、マルチモードファイバ伝送からシングルモード光ファイバ伝送へ、短波長帯伝送から長波長帯伝送、Mbps伝送からGbps伝送へ等、次々と目まぐるしい発展を遂げた。この動向は今後も続くものと考えられるが、これに加えて、小型・低消費電力・低価格で実現することが非常に重要であり、これなくして



(a) 外観



(b) 制御回路

図12. 可変分散補償器の外観

は、次世代システムへの発展はあり得ない。

当社では、本稿で述べたように、光通信の発展とともに数多くの新しい光電子機器を製品化してきた。光電子機器事業の拡大・発展が一息ついた今、今後の発展につながる更に新しい光電子機器製品群を世に提供できるように努めたい。

#### 参考文献

- (1) 陶山昌雄, ほか: 三菱電機における光通信用部品の歩み, 三菱電機技報, 68, No.6, 500~503 (1994)
- (2) 松川隆幸: 光・高周波デバイスの現状と展望, 三菱電機技報, 74, No.6, 360~364 (2000)



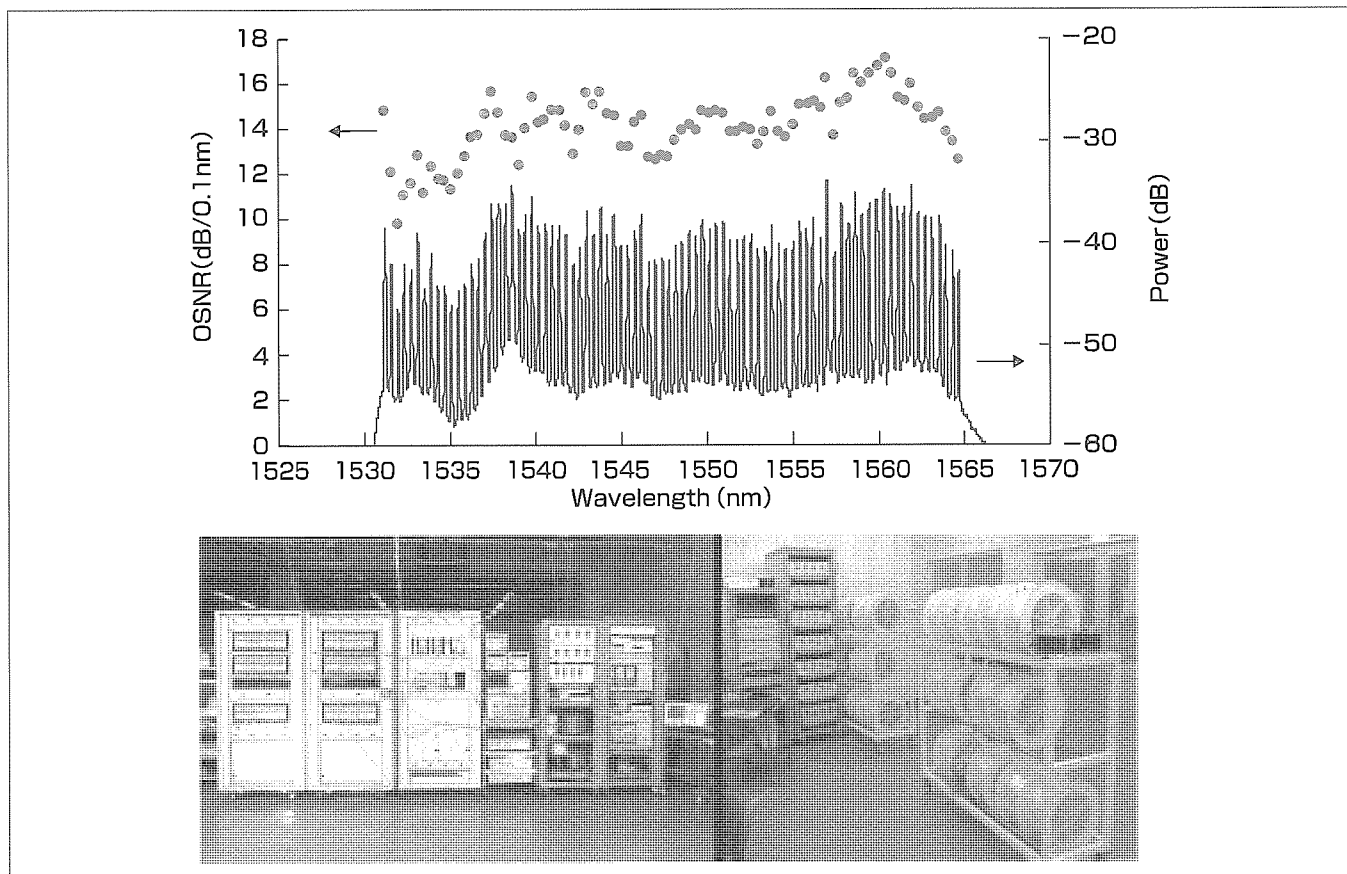
# 次世代光伝送技術

水落隆司\*  
本島邦明\*

## 要旨

更なる長距離・大容量化を目指した次世代光伝送技術の研究開発状況を概観する。まず、シャノンリミットから予測される光ファイバの伝送容量限界について述べ、当座の大洋横断級伝送の容量上限が30Tbpsであることを説明する。次に、次世代光伝送技術を支える各種要素技術について述べる。分散マネジメントをベースとする光伝送路設計技術と、ラマン増幅器によって飛躍的進歩を遂げつつある光増幅中継技術、群速度や偏波モードの分散による信号劣

化の補償技術は長距離光伝送に欠かすことができない重要技術である。周波数利用効率を高める光変復調技術と符号理論を応用する誤り訂正技術は、光技術だけでは達成し得ない伝送容量実現に重要な役割を果たす。最後に、開発した要素技術を用いて実施した20Gbps信号を85波長9,180km伝送した試験結果を紹介する。さらに、ラマン増幅術を用いて実現した43Gbps信号32波長を200kmの光ファイバ1心に双方向伝送した試験結果を紹介する。



9,180km伝送後の1.7Tbps波長多重光スペクトルと次世代光伝送試験設備

上は、20Gbps信号を85波長多重して9,180km伝送した後の光キャリアスペクトル、左下は、その伝送試験を実施する光送信装置と受信装置、右下は、9,180km伝送路を模擬するための416kmの周回伝送用光ファイバと光増幅中継器である。

### 1. ま え が き

1980年代終わりのエルビウムドープファイバ増幅器(EDFA)の発明と、その後1990年代中ごろに巻き起こった波長分割多重(WDM)伝送技術の進展に後押しされ、光伝送技術は驚くべき飛躍を遂げた。図1にその軌跡を示す。進展の度合いを総伝送ビットレートと距離の積( $B \cdot L$ 積)で表す。3年で1けたのペースでの伸び続けた $B \cdot L$ 積は、実験室レベルで2001年に20Tbps・Mmを超えるところまで到達した。実験室報告からはほぼ3年後に同容量の実用システムがサービスインするサイクルの早さであった。ここに来て、昨今の光通信市場の落ち込みと連動するかのようになり、 $B \cdot L$ 積の更新ペースが鈍化しているとはいえ、世界中の研究機関の更なる大容量化へ向けた歩みは止まることを知らない。おそらく近い将来、次のブレークスルー技術が発明され、2006年には100Tbps・Mmを超える“ヒーロー実験”が発表されるだろう。

本稿では、まず光ファイバ伝送の容量限界について考察し、そこに向かって取り組んでいる次世代光伝送技術の要素技術を紹介する。開発した要素技術を用いて実施した二つのTbpsを超える光伝送試験結果について述べる。

### 2. 光伝送容量限界

2001年6月、Bell研究所のMitraとStarkが光ファイバ伝送容量の上限についての論文を発表した<sup>(1)</sup>。ある信号対雑音比(SNR)が与えられれば、周波数利用効率 $C$ は、シャノンの理論<sup>(2)</sup>によって $C = \log_2(1 + \text{SNR})$ で与えられる。光ファイバの有効帯域を波長1.2~1.6 $\mu\text{m}$ の間に存在する50THzの低損失域と仮定すると、SNRが20dBのとき $C = 6.6$ となり330Tbpsの伝送容量を持つことができるが、光ファイバの非線形による制限で実際の伝送容量の上限はその半分ぐらいだというのが彼らの論点である。これは多値変調にまで拡張した議論であり、光ファイバの非線形性が多値変調を難しくするという現実を省みた場合、当面の光伝送容量限界は次のように考えられるだろう。周波数利用

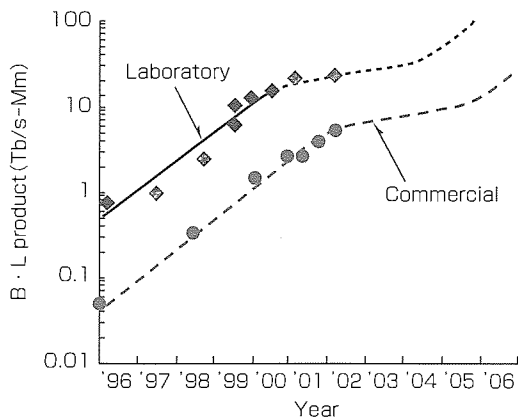


図1. ビットレートと距離の積の進展

効率は誤り訂正(Forward Error Correction : FEC)における符号化率(Code Rate)ととらえることができる。議論をBinary Symmetric Channel(BSC)に限った場合、受信信号の符号誤り率を $p$ とすると、符号化率は同じくシャノンの理論から $C = 1 + p \log_2 p + (1 - p) \log_2 (1 - p)$ で与えられる。ここで重要なのは、 $p$ は幾らでもよい値をとれるわけではなく、伝送距離が伸びるほど、また波長多重数が増えるほど悪くなることである。例えば1万kmに近い大洋横断級の光伝送と数百kmの光伝送では達成し得る $p$ は大幅に異なる。大洋横断級の数十Tbps光伝送システムでは、 $p = 8E-2$ (Q値 = 3 dB)しか達成し得ないと仮定する。受信Q値と符号化率の関係を図2に示す。符号化率0.6でシャノンリミットを達成するFECが実現されれば、前述の50THzの帯域に30Tbpsの伝送容量を詰め込むことができる計算になる。仮に伝送技術が向上して $p$ が改善しても、50THzが当座の帯域限界とすれば、バイナリー変調で長距離光伝送できる究極の光伝送容量も50Tbpsである。

### 3. 要素技術

#### 3.1 光伝送路技術

長距離光伝送するためには、光ファイバの損失だけでなく、群速度分散(Group Velocity Dispersion : GVD)や分散傾斜(GVDをさらに波長で微分したもの)、及び有効断面積(Effective Area :  $A_{\text{eff}}$ )などのパラメータを、伝送方向に周期的に組み合わせる伝送路マネジメントが重要となる。図3に、9,000km光伝送路マネジメントの一例として、GVDの伝送方向マップを示す。点と点の間隔が中継間隔を示し、前段に正の符号のGVDを持つファイバを、後半に負のGVDを持つファイバを配置する(図ではその違いは省略している)。8中継ごとに現れる周期的な変化は、最初の4中継区間は負分散を意図的に残留させ、次の4中継で正分散を意図的に残留させたものである。これにより、WDM伝送時の特性劣化要因の相互位相変調(Cross Phase Modulation : XPM)を抑圧することができる。一方、後述のラマン増幅を用いる場合には、 $A_{\text{eff}}$ マネジメントが有効

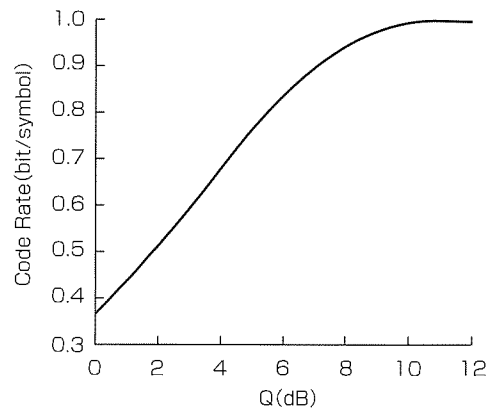


図2. シャノンリミットで決まる符号化率

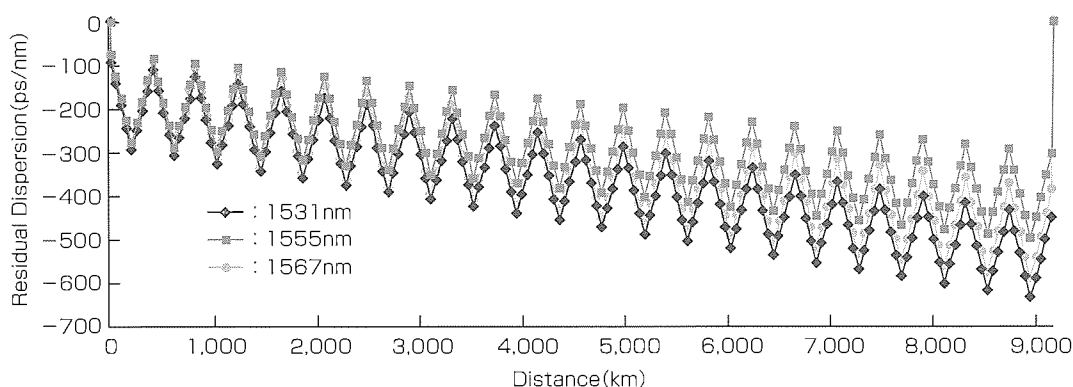


図 3. 光ファイバの群速度分散マネジメント

である。ラマン増幅利得が $A_{eff}$ に反比例することを利用したもので、中継区間の中間に $A_{eff}$ の小さいファイバを配置することで伝送中のレベルダイヤを途中で持ち上げ、結果としてロスレスファイバにより近づけることで、SNRが改善される効果を得る。これにより、40Gbps信号を32波202km無中継伝送することに成功した<sup>(3)</sup>。

### 3.2 光増幅中継技術

大容量光伝送には光増幅中継器の広帯域化が重要である。従来のEDFAで40nmを超える帯域を実現するのは極めて難しいため、EDFAとラマン増幅を組み合わせたハイブリッド型の中継器や、ラマン増幅器だけで構成された中継器が注目を集めている。ラマン増幅は、光ファイバに高強度の励起光を入射するとその一部が光ファイバの格子振動に変換されることで励起光から約13THz長波長側に離れた波長にピークを持つ利得が発生するものである。図4は80nmの帯域が得られるよう設計したラマン増幅器の利得波長特性例である。平坦(へいたん)な利得を得るために、励起光源は1425nmから1503nmの間に6波長を並べた。総励起パワーは790mWである。短波から長波へのバンド内ラマン散乱を克服するために、励起光パワーを短波から順に345mWから50mWまで傾斜をつけている。ラマン増幅器は比較的強い偏波依存性が発生するため、励起光の無偏光化が重要である。複数の縦モードからなる励起光を無偏光化する方法として、複屈折媒質に斜め45°で入射する方法を検討した。これまで、複屈折媒質による無偏光化はよく知られているが、我々は、励起光のスペクトルのフーリエ変換が偏光度そのものになる関係に基づいて、縦モード間隔と縦モード1本の線幅が決まれば最小の複屈折量で偏光度を最小化できる方式を見いだした。実験の結果、0.5dB以上あったラマン増幅器の偏波依存性利得を0.1dBに抑えられた<sup>(4)</sup>。一方、上述のバンド内ラマン散乱によって短波の雑音指数が劣化する問題がある。これを克服するには、通常、後方励起のみである励起光配置を最短波のみ前方励起とする方式が有望である。ただし、前方励起には、利得飽和や相対強度雑音、ブリュアン閾値(いきち)の増大など

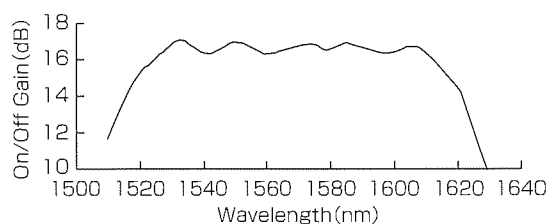


図 4. ラマン増幅器の利得波長特性

注意すべき問題点が多いが、これらを克服することでEDFAでは達成し得ない100nmを超える帯域実現が可能になるものと期待される。

### 3.3 光変復調技術

大容量化のために、変調方式を工夫して周波数利用効率を高める研究が活発化している。光ファイバの非線形性のために多値変調が難しいことから、バイナリー変調でできる周波数利用効率向上が検討されている。デュオバイナリーやPhase-Shaped Binary Transmission (PSBT) 変調方式などの周波数利用効率には及ばないものの、長距離光伝送に適した変調方式としてVestigial Side-Band (VSB) Return-to-Zero (RZ) とCarrier-Suppressed (CS) RZを検討した。これら二つの発生方法は異なるものの、本質的に同一の変調方式である。図5にCS-RZ変調スペクトルの一例を示す。通常のRZに比べ、必要帯域が3/4倍で済むだけでなく、ビットごとの光位相が反転しているため、ファイバ非線形耐力が強いという利点がある。通常のRZ、ビット同期位相変調によって発生させたVSB、及びビット同期強度変調によって生成したCS-RZの3種類の20Gbps信号を50波長4,000km伝送して比較したところ、CS-RZがわずかに優れた伝送特性を示すことが分かった<sup>(5)</sup>。さて、伝送容量を増やすには現在主流の10Gbpsを40Gbps以上に高ビットレート化する必要がある。高ビットレート化が進むにつれて、同じ符号誤り率(BER)を得るのに必要なSNRが増加する(例えば40Gbpsは10Gbpsよりも6dB高いSNRが必要)。これを補うために、コヒーレント変復調方式が見直されつつある。なかでもDifferential Phase Shift

Keying(DPSK)直接検波方式は、通常の強度変調に比べ3 dBのSNR改善を図ることができる方式として注目されている。特に、長距離伝送に適した方式としてCS-RZとDPSKを組み合わせた方式が提案されている<sup>(6)</sup>。

### 3.4 誤り訂正技術

無線・衛星通信で広く使われてきたFEC技術が本格的に光伝送に適用されるようになったのは、1990年代前半に開発された太平洋横断海底ケーブルが初めてである<sup>(7)</sup>。光増幅器の累積雑音によるSNR劣化に加えて、偏波変動などによるBERの時間変動を抑圧する目的で、リードソロモン符号RS(255, 239)が用いられた。その後、2章で述べた周波数利用効率向上の観点から、同じ符号化率でも、より訂正能力の高いFEC符号が求められるようになった。我々はこれまでに連接RS符号のFECを開発し、RS(255, 239)のネット符号化利得を約2 dB上回る7.7 dBを達成した<sup>(8)</sup>が、これを更に2 dB以上上回りシャノンリミットにあと1 dBに迫る軟判定・ターボ符号を用いた新しいFECの開発を進めている<sup>(9)</sup>。符号の候補として巡回符号の一つであるBose-Chaudhuri-Hocquenghem(BCH)の積

符号を選ぶ。BCHの符号長は幾つもあり、それぞれ冗長度が異なるが、9.95GbpsのSTM64データに対し、冗長ビット付加後のビットレートが12.5Gbpsを超えないことが実用上好ましいとの観点から、BCH(128, 113)×BCH(256, 239)とBCH(144, 128)×BCH(256, 239)を候補として検討した。2種類についてチェイスアルゴリズムを用いて実施した誤り訂正能力シミュレーション結果を図6に示す。いずれもネット符号化利得で10 dBが得られた。これはバイナリー符号のシャノンリミットにあと1 dBに迫る訂正能力である。将来のOTN(Optical Transport Network)の実現に向かうためには、NNI(Network Node Interface)の統一、特にITU-T G.709への整合性を考慮することが重要である。BCH(128, 113)×BCH(256, 239)を用いる伝送フレームはG.709との整合性が悪いのに対し、BCH(144, 128)×BCH(256, 239)は、縦方向の情報ビット長が128となるので、G.709のオーバーヘッド処理に完全準拠することが可能である。上記BCH積符号のターボ復号を行うには、軟判定が重要な役割を果たす。受信信号を複数の識別閾値の異なる識別器で判定し、確からしさを信頼度情報という付加ビットで表すものである。図7に開発した3ビット軟判定LSIを示す。40Gbps用のSiGe Bi-CMOSプロセスを用いて試作したもので、12.5Gbps動作で高い識別感度を得られる。以上の技術を海底ケーブルシステムに適用した場合、例えば既存システムの波長数を3倍に増設することや、新規システムの中継器間隔を60kmから75kmに延ばせることによる初期コストの2割低減などが可能になるばかりでなく、これまで実現し得なかった2 Tbps級の大洋横断システムも可能になると考えられる。一方、符号理論に基づくFECとは別に、受信器をダイバシティ化し尤度(ゆうど)の高い識別結果を求める方式<sup>(10)</sup>も次世代技術として注目され始めている。

### 3.5 補償技術

伝送ビットレートが上昇するにつれてGVDや偏波モー

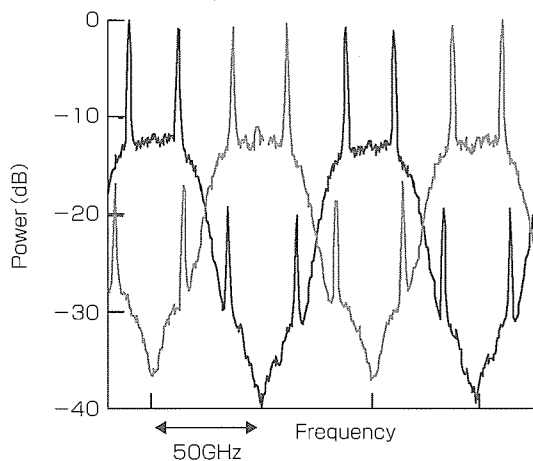


図5. CS-RZスペクトル

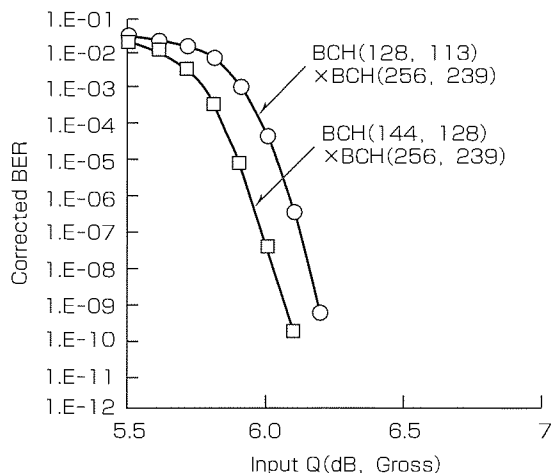


図6. 軟判定ターボ符号FECの誤り訂正特性

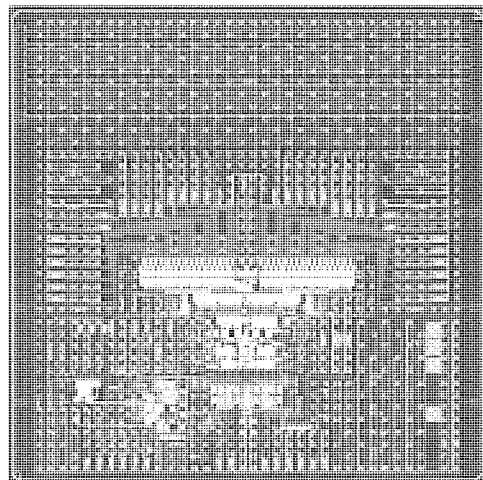


図7. 軟判定LSI

ド分散(Polarization Mode Dispersion : PMD)に対する許容度が狭まるため、これらをいかに動的に補償するかが鍵(かぎ)となる。これまで我々は、可変GVD補償器としてチャープドファイバブラッググレーティング(CFBG)の温度勾配を多分割薄膜ヒーターで制御するデバイスを試作し、40Gbps信号の良好なGVD補償特性を確認している<sup>(11)</sup>。CFBGの帯域幅とGVD可変幅はトレードオフの関係にあるが、これを最適化することで、多段接続することなく200ps/nmを超えるGVD可変幅が得られている。実際の光伝送システムに適用するには、自動制御技術の確立が重要である<sup>(12)</sup>。ITU-T G.709に勧告されているように将来のOTNでFECを前提としたクライアント信号のマッピングが行われるようになると、光ファイバのGVD変動で発生したビット誤りをFECの持つ誤り個数検出機能を利用し、受信端でカウントできるようになる。ビット誤りが常に最小になるようGVD補償器を制御する方式が有効である。

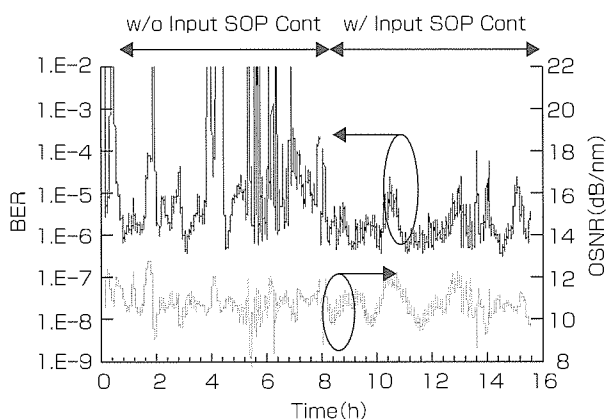


図 8. PMD補償試験結果

43Gbps NRZ信号を34km SMF伝送し、光ファイバのGVDのゆっくりとした変動を模擬し、ビット誤りカウンタ数が最小になるように可変GVD補償器を自動追尾補償した。補償なしでは1E-5までBER劣化したものが、補償を行うことで1E-8以下に低減できた。一方、PMD補償に関しての様々な方式が提案されているが、こちらも、受信側のビット誤り率が最小になるように送信側に配した偏波コントローラで入射偏波を制御することで、PMDによる信号品質変動を、完全でないまでも、効果的に安定化することができる。1周354kmの周回伝送路で3,540kmの伝送路を構築し、伝送路中に配した偏波コントローラを用いて、4時間周期でポアンカレ球上を満遍なくトレースすることで伝送路の偏波変動を模擬した。50GHz間隔に配した42波長の20Gbps信号のうち1波の測定波長の入射偏波補償制御を行った場合、図8に示すとおり、補償なしではフレーム同期外れに至るほどの著しい品質劣化が、PMD補償によってBER変化を2けた程度に抑圧できた<sup>(13)</sup>。

#### 4. 伝送試験

ここまで述べてきた技術の幾つかを用いて実施した二つのテラビット級光伝送試験を紹介する。

##### 4.1 20Gbps×85波9,180km伝送

EDFA中継器にラマン増幅を併用するラマン/EDFハイブリッド増幅中継を用い、中継器と伝送路のパラメータを最適化することで1.7Tbps(85×20Gbps)信号の太平洋横断距離(9,180km)の伝送試験を実施した。試験系を図9に示す。送信装置では1531.12nmから1565.68nmまで85波長を50GHz間隔で偏波直交多重した。偶・奇数チャンネルはそ

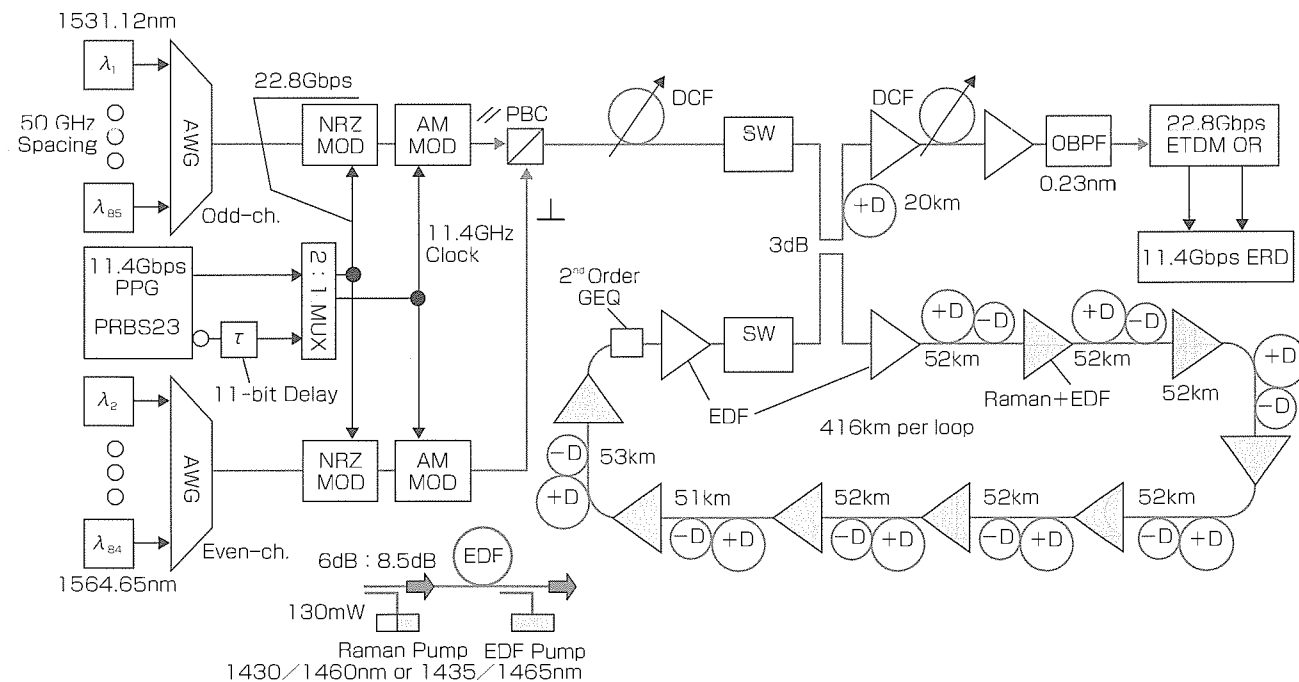


図 9. 20Gbps×85波 9,180km周回伝送試験系

それぞれ独立に22.8GbpsデータでCS-RZ変調した。1周416kmの周回伝送路は平均52km間隔の+D/-D型GVDマネジメント伝送路8スパンと2次利得等化用の1区間から構築した。+D/-D伝送路の距離(km)/群速度分散(ps/nm/km)/ $A_{eff}(\mu m^2)$ はそれぞれ、37/+20/128, 15/-52/23とした。1周の平均GVDと分散傾斜はそれぞれ-0.024ps/nm/kmと $4 \times 10^4 ps/nm^2$ であった。ラマン/EDFハイブリッド中継器は、波長平坦度を得るために2種類の2波長励起(1430/1460nmと1435/1465nm)を併用し、それぞれ偏波保持ファイバを用いて無偏光化した。中継器出力は-4.5dBm/chとし、ラマンとEDFの利得比はそれぞれ8.5dBと5.7dBとした。このときのラマンパワーは合計130mWであった。受信光は、波長ごとに残留分散補償した後、高感度SiGe識別器で再生した。二つのトリビュタリを1:2分離し11.4Gbpsで符号誤り率を測定した。図10に全チャンネル受信Q値を示す。平均Q値及び最悪Q値はそれぞれ9.6dBと9.0dBであり、所要Q値を0.5dB上回る結果を得た。受信Q値の標準偏差は5分間の測定時間に対して0.14dBであった<sup>(14)</sup>。

#### 4.2 40Gbps×32波200km 1心双方向伝送

1心双方向無中継光伝送は、伝送及び中継コスト、保守管理の複雑さを低減する方式として研究されている。C帯とL帯信号を1心双方向無中継光伝送するシステムにラマン増幅技術を適用し伝送距離を延伸化する。従来の1心双方向光伝送の波長配置は、同一バンド内において奇数チャンネルと偶数チャンネルをインターリーブする方法が用いられてきた。これにラマン前置増幅を組み合わせる場合、励起光からおおよそ13THz離れた波長信号を増幅するラマン増幅の特徴から、上り方向の信号波長に対して後方励起の前置増幅として寄与すべきラマン励起光電力が、下り方向の信号に対して前方向励起として消費されてしまう問題(励起デプレッション)があった。このことは、上り信号に対して所望の前置増幅が得られないだけでなく、下り送信信号電

力を非線形効果が発生するレベルに持ち上げてしまう結果につながる。双方向に伝送するC及びL帯の信号に対し、それぞれ13THz短波側に異なる波長で励起光を配置する。この波長配置により、L帯信号に対するラマン励起光はC帯信号に消費されることなく、ほとんどがL帯信号に寄与され、同様にC帯信号に対するラマン励起光はラマン励起波長から十分離れた波長帯に位置するL帯信号に消費されることなく、C帯信号のみを前置ラマン増幅する。図11に伝送試験系を示す。C帯(1537.4~1562.2nm)及びL帯(1576.2~1602.3nm)にそれぞれ100GHz間隔で32チャンネルを配置した。変調はPN23の43Gbps CS-RZ信号を用いた。伝送路はノンゼロ分散シフトファイバ(Corning LEAF<sup>®</sup>)200kmで構成した。平均スパン損失は42dBであった。各帯域信号のトータル出力パワーは+21dBm(+6dBm/ch)とした。C/L帯の受信Q値(Max., Min., Average)はそれぞれ(13.1dB, 11.4dB, 11.9dB)/(13.5dB, 11.5dB, 12.4dB)であった。全チャンネルでFECリミットQ値=11dB以上が得られた<sup>(15)</sup>。

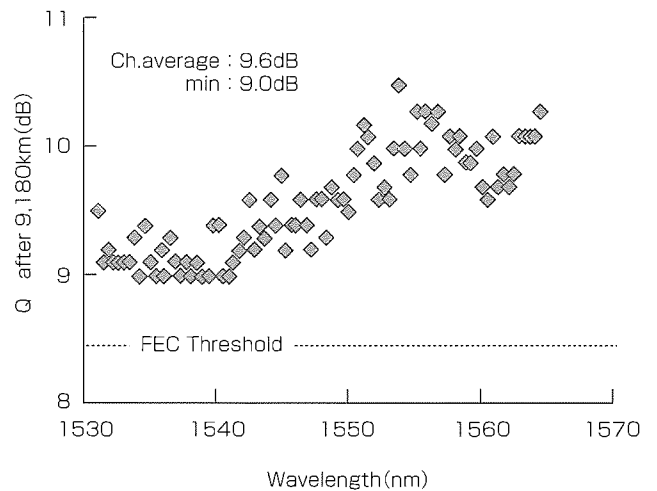


図10. 20Gbps×85波 9,180km伝送後のQ値測定結果

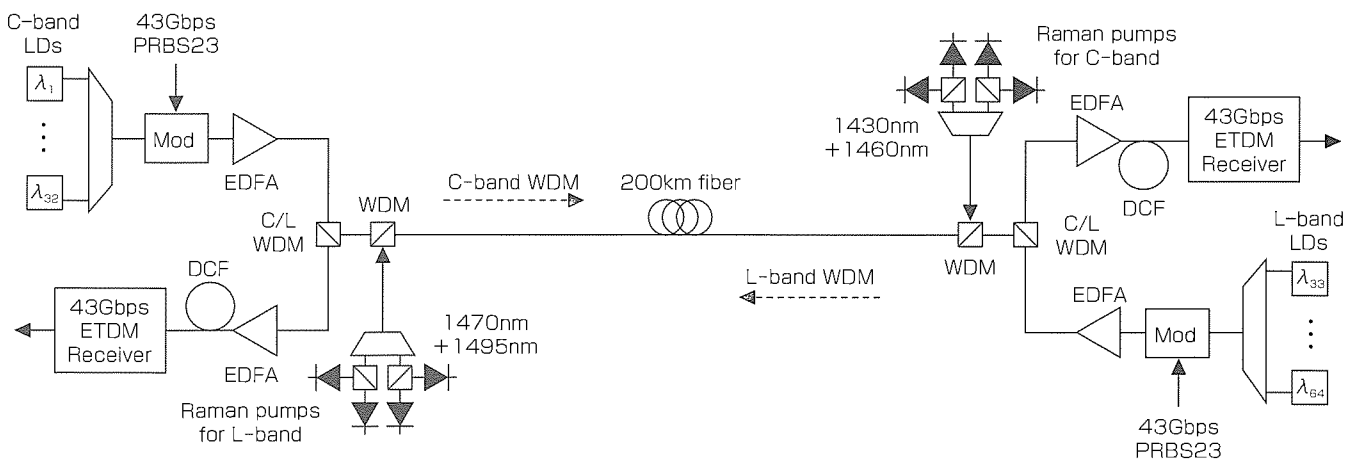


図11. 43Gbps×32波 200km 1心双方向伝送試験系

## 5. む す び

光ファイバの究極の伝送容量に向かって開発を進めている光伝送技術の現状について述べた。これまで強度変調・直接検波だけで進展してきた光伝送技術だが、これからは無線やマイクロ波で確立したコヒーレント技術や、高速集積回路技術に支えられるFECや、ダイバシティと組み合わせた最尤復号、さらにはファイバ非線形を有効に利用したラマン増幅技術、各種波形変動を補償する技術によって更なる発展を遂げていくものと期待する。

## 参 考 文 献

- (1) Mitra, P. P., et al. : Nonlinear Limits to the Information Capacity of Optical Fiber Communications, *NATURE*, **411**, 1027~1030 (2001)
- (2) Shannon, C. E. : A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Tech. J.*, **27**, 379~423, 623~656 (1948)
- (3) Shimizu, K., et al. : Fiber-effective-area Managed Fiber Lines with Distributed Raman Amplification in 1.28Tb/s(32×40Gb/s), 202km Unrepeated Transmission, *Optical Fiber Communication Conference 2001, TuU2* (2001)
- (4) Tokura, T., et al. : A Depolarized Methodology for PDG Mitigation of Multi-longitudinal Laser-pumped Fiber Raman Amplifier, *Seventh Optoelectronics and Communication Conference, 10D2-4* (2002)
- (5) Kobayashi, Y., et al. : A Comparison among Pure-RZ, CS-RZ, and SSB-RZ Format, in 1 Tbit/s(50×20 bit/s, 0.4nm spacing)WDM Transmission over 4,000km, *European Conference on Optical Communication, PD 1.7* (2000)
- (6) Miyamoto, Y., et al. : Carrier-suppressed Differential Phase Shift Keying Format for Ultra-high-speed Channel Transmission, *Optical Amplifiers and Their Application, OtuB2* (2002)
- (7) Yamamoto, S., et al. : 5 Gbit/s Optical Transmission Terminal Equipment using Forward Error Correcting Code and Optical Amplifier, *IEE Electronics Letters*, **30**, No.3, 254~255 (1994)
- (8) Mizuochoi, T., et al. : Transparent Multiplexer Featuring Super FEC for Optical Transport Networking, *Proceeding of SubOptic 2001, P4.2.3*, 484~487 (2001)
- (9) 久保和夫, ほか : 長距離WDMシステムにおけるFEC伝送フレームの検討, *電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-76* (2002)
- (10) Tomizawa, M., et al. : Error Correction without Additional Redundancy by Novel Optical Receiver with Diverse Detection, *Optical Fiber Communication Conference, WX 7* (2002)
- (11) Matsumoto, S., et al. : Tunable Dispersion Equalizer with a Divided Thin-film Heater for 40-Gb/s RZ Transmission, *IEEE Photonics Technology Letters*, **13**, No.8, 827~829 (2001)
- (12) Sugihara, T., et al. : Automatically Tracked Dispersion Compensation with Penalty Free Tunable Dispersion Equalizer for 40Gbit/s Systems, *Optical Fiber Communication Conference, ThAA2* (2002)
- (13) Ishida, K., et al. : Demonstration of PMD Mitigation in Long-haul WDM Transmission using Automatic Control of Input State of Polarization, *European Conference on Optical Communication, 11.1.1* (2002)
- (14) Mizuochoi, T., et al. : 1.7 Tb/s(85×22.8Gb/s) Transmission over 9,180km using Symmetrically Collided Transmission Methodology, to be published in *IEE Electronics Letters* (2002)
- (15) Mizuochoi, T., et al. : Bidirectional Unrepeated 43Gb/s WDM Transmission with C/L Band-separated Raman Amplification, to be published in *IEEE Journal of Lightwave Technology*, **20**, No.12 (2002)



# 光ネットワーク技術 (OXC)

妹尾尚一郎\* 高井伸之\*  
市川俊亭\* 八田竜夫\*  
秋田正志\*

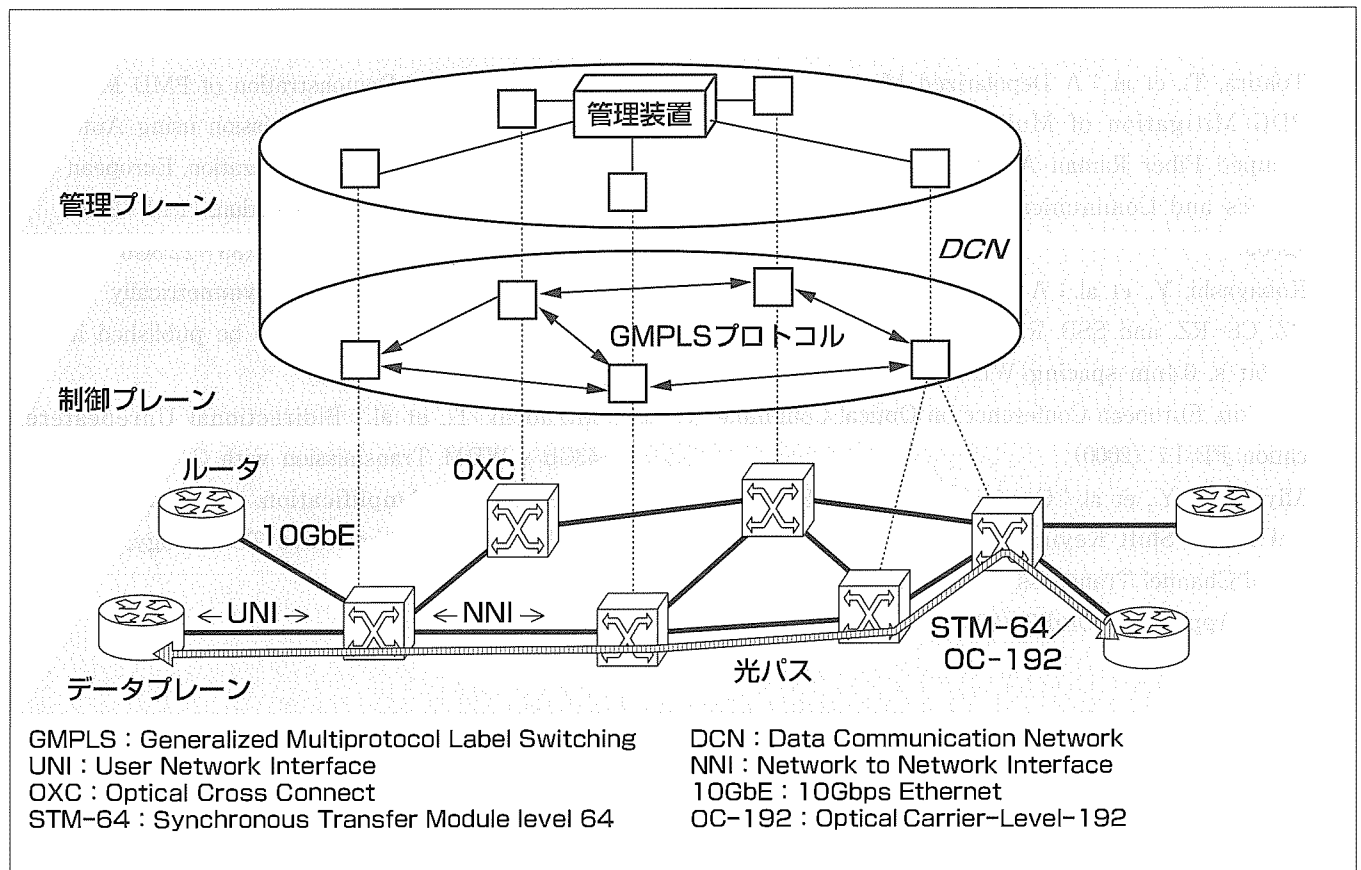
## 要旨

光クロスコネクタ(Optical Cross Connect : OXC)は、次世代ネットワークインフラストラクチャ構築に向けて標準化が進んでいる光トランスポートネットワークのノード装置であり、光の通信路(光パス)を自由に設定して光信号を交換転送する。

三菱電機は、プロトコルや伝送速度に依存しない拡張性と光電気変換を不要とする低コスト性を備えたオール光ネットワーク対応のOXCの研究開発を進めており、2002年2月にOXC間の連携によってフレキシブルに光パスを設定するGMPLS(Generalized Multiprotocol Label Switching)シグナリングプロトコルと高速な1+1プロテクション機能を実装した試作機を公開した。さらに、光スイッチ

ング技術の発達やGMPLS標準化の進展に対応しつつ、光パスの高信頼化やOXCなど光ネットワークに対応したネットワーク管理技術に取り組んでいる。

オール光ネットワーク対応OXCは、装置を置き換えずに伝送容量の増大が可能であり、高信頼でトランスパレントな光パスを需要に応じて即座に設定できるので、比較的伝送距離が短くトラフィック変動が頻繁なメトロネットワークから導入が進み、ネットワークの大容量化と通信コストの低減に役立つものと期待される。当社は、オール光ネットワーク対応OXC及び関連する光ネットワーク技術の研究開発や標準化を通して、次世代ネットワークインフラストラクチャの実現に寄与していく。



## 光ネットワークの構成例

次世代ネットワークインフラストラクチャにおいては、OXCがトラフィック需要に応じて波長やファイバ単位の光パスをフレキシブルに設定し、効率性と高信頼性を備えたバックボーンを提供する。OXCは、IP(Internet Protocol)ルータと共通のシグナリング・ルーティングのプロトコルGMPLSに基づく制御プレーンや、光ネットワークに対応した管理プレーンを備え、オペレータの運用を容易にする。

## 1. ま え が き

インターネットトラフィックの爆発的な増大やIPの広範囲な適用に対応して、大容量でIPとの親和性が高いネットワークインフラストラクチャが求められている。OXCは、そのようなインフラストラクチャを構成する光トランスポートネットワークのノード装置であり、光の通信路(光パス)を自由に設定して光信号を交換転送する。

現行のOXCは電気変換を介して光信号を転送するOEO型であるが、今後は、電気変換を介さないオール光ネットワーク対応のOXCが、プロトコルや伝送速度に依存しない拡張性と光電気変換を省略した低コスト性から有望視されている。

本稿では、オール光ネットワーク対応OXCを支える各種技術の動向と当社の取り組みを紹介し、オール光ネットワーク実現への展望を述べる。

## 2. 光ネットワーク技術の動向

### 2.1 光ネットワークの構成

現在の光ネットワークでは、WDM(Wavelength Division Multiplexing)によって2地点間を結ぶポイントツーポイント形に加え、OADM(Optical Add-Drop Multiplexer)を用いたリングネットワークが導入されつつある。OADMは、波長多重された光信号に対して波長ごとに分岐・挿入操作を行い大容量の信号を処理する機能を持っている。OADMリングネットワークは、管理運用が容易で障害復旧のプロトコルも比較的単純であるという利点があり、主にメトロ系に適用されている。一方、より拡張性に優れた自由度の高いネットワークを構築するため、OXCを用いたメッシュネットワークへの展開が考えられている。OXCは、波長単位で自由に経路を設定し、柔軟なネットワークを提供する。メッシュネットワークでは、障害回復に対応するための予備経路を最小限に抑え効率的なネットワークを構築することが可能となる。

### 2.2 OXCの構成

OXCの主要機能である波長パススイッチ機能を実現する構成として、電気スイッチを用いるOEO型と光スイッチを用いるOOO型がある。次に、それぞれについて示す。

#### (1) OEO型

大容量電気スイッチをコアに持ち、光トランスポンダと組み合わせることによって等価的に波長単位でのスイッチングを実現する。O/E、E/O変換が必要なためフォーマットフリー、ビットレートフリーにはならないが、電気処理の柔軟性を生かして多重化機能等を持たせることができる。2.5Gbps、10Gbpsのインタフェースを持ち、SONET(Synchronous Optical Network)の52Mbps単位(STS-1)

にスイッチングを行う製品等が発表されている。

#### (2) OOO型

スイッチコアとして光スイッチを用いて構成する。原理的にフォーマットフリー、ビットレートフリーであり、ビットレートの増大にも対応できる。将来の高速化・大容量化に伴い、消費電力、サイズの点でOEO型よりも有利と考えられ、今後開発が進んでいくものと期待される。既に製品発表がなされているが、現在の製品はWDM装置又は光トランスポンダとの組合せで使用することを前提としており、さらにO/E、E/O変換のない完全なオール光ネットワーク対応への検討が始められている。

### 2.3 オール光ネットワークへの対応

オール光ネットワークでは、光トランスポンダのコストが大幅に削減され、ネットワークの経済化が期待される。実現のための技術動向について以下に記す。

#### (1) 波長パス最適経路制御

オール光ネットワークでは、光パス設定を行う際に光特有のパラメータ(減衰、分散等)が制約条件となる。そのため、GMPLSの標準化では、これらのパラメータをノード間で共有し、波長パスの最適な経路制御を行うことが検討されている。この場合、光パラメータを考慮に入れた高速な経路計算アルゴリズムの開発が課題である。

#### (2) 3R中継機能の共有化

オール光ネットワークにおいて伝送可能距離を延長し光パス設定の自由度を確保するためには、3R(Regeneration, Retiming, Reshaping)中継機能が必要となる。しかし、すべてのOXCポートに3R中継機能を実装することは経済的でない。そのため、OXCの必要最小限のポートに3R中継機能を実装し、光信号の劣化をモニタすることによって必要な場合のみ適応的に3R中継を行う方式が提案されている。

## 3. 光スイッチング技術

データの伝送形式やビットレートに依存しない光のままでの信号転送を実現する光スイッチング技術について、キーデバイスである光スイッチと、光スイッチを用いた光スイッチプレーンを中心に述べる。

### 3.1 光スイッチ

データフォーマットやビットレートに依存しないオール光信号転送機能の実現には、光信号を電気に変換することなく光のままスイッチングする光スイッチの適用が有効である。また、伝送速度が10Gbpsを超えた場合、電気スイッチのサイズは光スイッチの2~3倍以上、消費電力は3倍以上と予想されている。ノード装置の発熱、装置規模の観点からも、近い将来ノード装置に光スイッチが適用されることは必然である<sup>(1)</sup>。

光スイッチには、機械式光スイッチやマイクロマシン

(MEMS)光スイッチなどの駆動型光スイッチ，例えば光導波路上での屈折率変動を利用する非駆動型光スイッチなどがあり，それぞれメリット，デメリットを持っている。信頼性の点では駆動部を持たない非駆動型光スイッチが優位であるが，挿入損失，クロストーク及び入出力ポート数の大規模化ではMEMS光スイッチが優位と言える。MEMS光スイッチで現在開発されているものに二次元型(2D)と三次元型(3D)がある。ポート数の拡張性では三次元型<sup>(2)</sup>が有望であるが，MEMSの制御の困難さが実用化の大きな壁となっている。2DMEMS光スイッチ<sup>(3)</sup>は，例えば，Telcordia規格などの部品評価試験をクリアするレベルのものも出てくるなど信頼性の面で進歩が見られる。図1に開発中の跳ね橋型光スイッチ<sup>(4)</sup>の外観を示す。入出力ポートは32，挿入損失6.0dB以下，クロストーク35dB以上の良好な特性が得られている。また，単体スイッチの信頼性としては1,000万回のスイッチングで損失変動0.3dB以下でありTelcordia規格GR-1073-COREを十分満足している。

### 3.2 光スイッチプレーン

OXCにおける光信号転送機能は，光スイッチを用いたデータプレーンである光スイッチプレーンによって提供される。光スイッチプレーン構成を検討すべき項目としては，装置信頼性，高密度実装化，試験機能，Connectivity Discoveryへの対応等がある。これらの項目に対応した光スイッチプレーン構成を図2に示し，以下にその特長を記す。

- (1) 多心コネクタ，多連PD(Photodiode)アレーなど多チャネル用光部品を採用することにより，光スイッチの多ポート化に対応
- (2) 冗長部において，A系，B系の光スイッチを別々の基板に実装し，冗長部-共通部間をコネクタ接続とし，基板単位での保守運用性を確保
- (3) 冗長分岐カプラを適用することにより，リンク・パス試験機能の実装や，Discovery機能の実現に対応した光信号入力ポートを用意

光スイッチデバイスは，現在も研究開発の途上であり，今後も多ポート化，低挿入損失化，低クロストーク化などの性能向上が予想される。当社光クロスコネクタの光スイッチプレーンは，制御プレーンとのインタフェースでポート数拡大を想定し，将来，性能の向上した光スイッチを用いたシステムへスムーズな移行が可能である。

光スイッチプレーンに対する制御は，アーキテクチャが独立した制御プレーンによってなされる。光スイッチプレーンにおける冗長構成の光スイッチを制御して1+1パスプロテクションパスを論理的に提供する例を図3に示す。スイッチドライバにより，2面の光スイッチプレーンを統合したデータプレーンを制御プレーンに提供する。

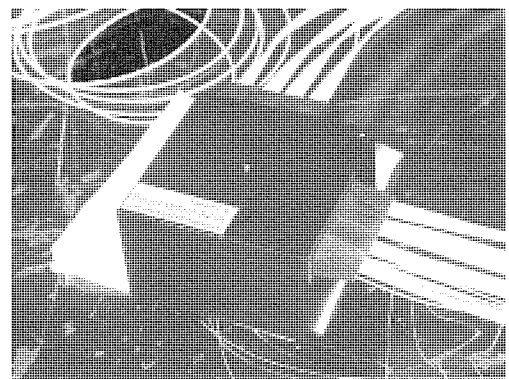


図1. 跳ね橋型光スイッチの外観

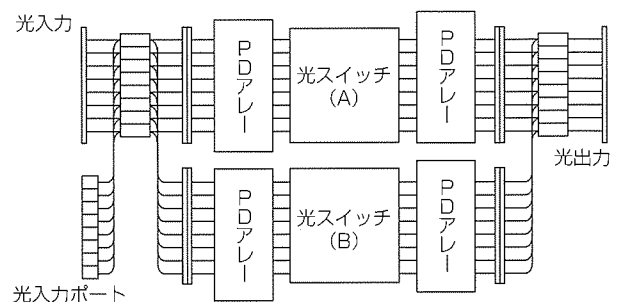


図2. 光スイッチプレーン構成

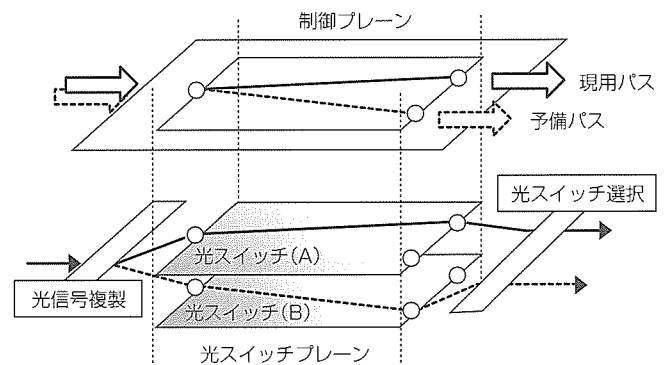


図3. 1+1プロテクションパスの構成

## 4. 光ネットワークを制御するGMPLS技術

### 4.1 OXCにおけるGMPLSプロトコル

電気変換を介して光信号を転送するOEO型OXCも含め，OXC間ないしOXCと光トランスポートネットワークのクライアント間の光バス制御プロトコルとしてGMPLSの標準化が進められている<sup>(5)</sup>。GMPLSは，IPにレイヤ2技術に依存しない下位層パスを提供するMPLS(Multiprotocol Label Switching)を波長やファイバからなる光バスにも適用できるよう拡張したもので，GMPLSシグナリングプロトコルによってOXC間で動的かつ即時の光バスの設定・解放が実現でき，また，GMPLSルーティングプロトコルによってOXC間で自律分散的なリソース使用状況の共有

が実現できる。

GMPLSは標準化途上であるためプロトコルが度々変更されており、また、後述する光パスのプロテクションをサポートする場合など、所望する機能によっては拡張が必要である。GMPLSの現状を考慮し、またシグナリングが光スイッチプレーンに含まれる特定のハードウェアに依存することを避けるため、当社が試作したOXCでは、図4に示すように階層的にモジュール分けしたソフトウェア構成を採用した。図の構成は、①管理インターフェースや光パス設定情報を扱うOXC制御部とGMPLSプロトコルを処理するGMPLS部を分離、②光スイッチプレーンのハードウェアをスイッチドライバ(SWドライバ)によって制御しハードウェアの特性を隠蔽(いんぺい)、という指針に基づいている。

#### 4.2 GMPLSプロトコルの拡張

光パスの高信頼化を実現するには、後述する光パスプロテクションや光パス正常性確認のサポートに伴い、GMPLSプロトコルの拡張が必要になる。例えば光パスプロテクションでは、光パス設定時のシグナリングメッセージにおけるプロテクション種別、光パス障害時にOXC間でやり取りされる切換えメッセージ、及びルーティングプロトコルにおける予備パスの帯域情報がある。これらの標準化はIETF(the Internet Engineering Task Force)やOIF(the Optical Internetworking Forum)においても議論されているので、動向を注視しながら必要に応じて拡張を加えて実装している。

### 5. 光パス高信頼化技術

#### 5.1 プロテクション技術

障害発生時における光パスの迅速な回復技術には、プロテクション、レストレーション、リルートといったものがある。この中で、プロテクションは最も高速な回復を可能にする。

プロテクションは、現用パスに対してあらかじめ予備パスを確立しておき、障害発生時には現用パスから予備パス

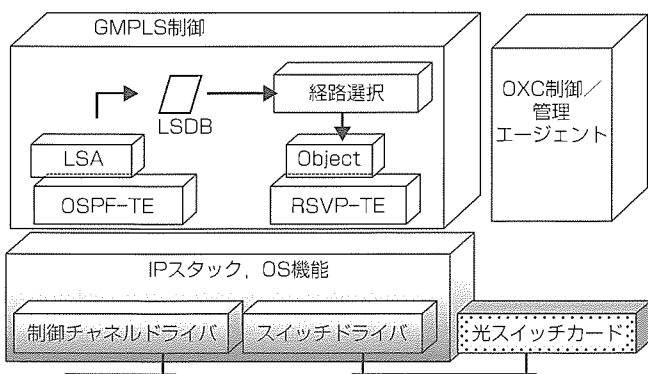


図4. OXCのソフトウェア構成

へユーザートラフィックを切り換える技術である。図5に主なプロテクションの分類を示す。まず、プロテクションを実施する単位により、パス全体を対象とするパスプロテクションや、パスを構成する個々のリンクを対象とするスパンプロテクション等に分類される。それらのプロテクションは、予備パスの使用方法によって更に分類される。

#### 5.1.1 パスプロテクション

##### (1) 1+1パスプロテクション

1+1パスプロテクションでは、あらかじめ現用パスと予備パスを設定しておき、headノードでユーザートラフィックを現用パスと予備パスの両方にコピーし、tailノードで現用パスのトラフィックを選択して出力する。そして、tailノードで現用パスからの光入力断を検出すると、直ちに予備パスのトラフィックを選択し直す(図6)。

1+1プロテクションは、障害発生時にシグナリングが必要なく、ハードウェアで高速に切換え可能であり、当社試作機では、約2msの切換え時間が得られた。

##### (2) 1:1パスプロテクション

1:1パスプロテクションでは、1+1と同様あらかじめ現用パスと予備パスを設定するが、ユーザートラフィックは現用パスのみで転送される。tailノードで現用パスからの光入力断を検出すると、headノードに通知してユーザートラフィックを予備パスで転送するように切り換える。

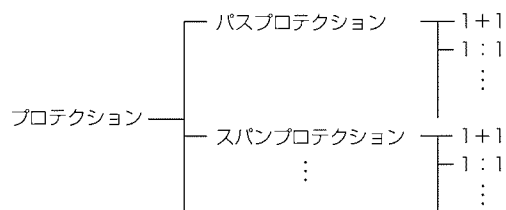


図5. プロテクションの分類

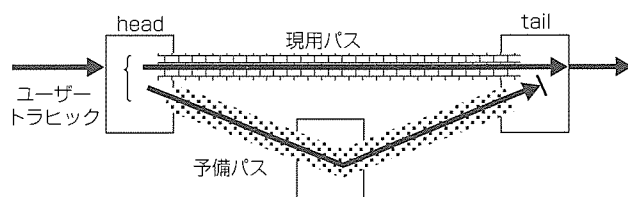


図6. 1+1プロテクション

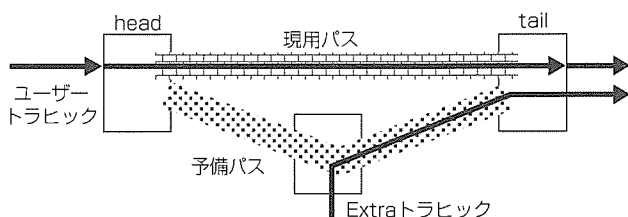


図7. 1:1プロテクション

1:1は障害発生時にシグナリングを行ってユーザートラヒックの回復を実施するため、1+1よりも復旧時間がかかる。しかし、予備パスは障害発生までトラヒックを転送しないので、優先度の低いExtraトラヒックの転送に使用でき、また複数の現用パスに対応する予備パスの共用が可能である(図7)。そのため、ネットワークリソースの使用効率の点で、1+1よりも有利と言える。

### 5.1.2 経路選択

障害時のプロテクションが有効に機能するためには、予備パスの経路選択が重要である。ある障害発生時に予備パスと現用パスが同時にトラヒックを転送不可となった場合、プロテクションは実質的に機能しない。そのため、予備パスのルートには、現用パスから独立性の高いルートを選択する必要がある。このような経路選択を行うために、リンクやノード等のディスジョイントという概念を導入する。

リンクディスジョイントでは、現用パスで使用したリンクは予備パスで使用しない。例えば、二つのノード間に2本のファイバAとBが設置されている場合、現用パスがAに経路決定されるなら、予備パスはBを選択する。

ノードディスジョイントでは、現用パスのルートが通過しているノードは予備パスで使用しない。したがって、リンクディスジョイントよりも更に高い独立性を予備パスに求めるので、より信頼性の高いプロテクションを提供できる(図8)。

なお、経路選択の条件はネットワークのトポロジーや運用ポリシーに依存するため、光ネットワーク機器は様々な

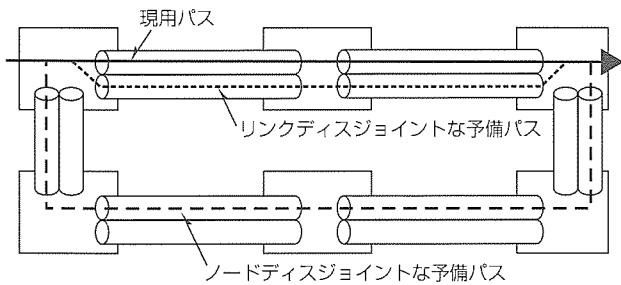


図8. 予備パスの経路選択

経路選択条件をサポートしながら効率的な経路選択を行う必要がある。

### 5.2 光パス正常性確認技術

伝送路へのWDM技術の導入によってネットワークの大容量化が達成されたが、現在光化されているのはポイントツーポイントのリンク間のみである。各ノード間では光トランスポンダによってO/E/O変換が行われ、交換処理は電気で実行される。このO/E/O変換がデジタル処理によって管理・保守を行うポイントをネットワークに提供している。

従来のNMS(Network Management System)による集中管理的なパス設定に対し、GMPLSのような自律分散的な伝送レイヤ制御技術のコンセプトはスケーラブルかつ短期間でのパス確立であり、パス正常性確認の新しい枠組みが必要になる(図9)。特にOXC, OADMなどのOOO型機器が使用される光パスネットワークにおいては、高信頼性を確保するためにパス設定時に正常性を確認する技術が不可欠になる。我々は、GMPLSなどの新しいプロビジョニングプロトコルに適合する正常性確認シーケンスを提案している<sup>(6)</sup>。

ネットワークの監視技術の中でもモニタリングポイントをどこに設定するかは、ネットワークの信頼性・運用性を決定付ける意味で重要である。我々は特に①End-to-Endと②Link-by-Linkでパス監視を行うモデル化と性能比較を行っている。特に障害頻度が高く限られたリソースによる運用が要求されるネットワークでは、②による方式が有効であるという結論が得られた。また、大規模ネットワークでは、①の方式が効率的である。ネットワークの形態、ノード装置として適用するOXC装置構成によって両手法を使い分けて効率的な運用を行うことが重要である。

### 6. 光ネットワーク管理技術

一般にネットワークシステムには、通信サービスの安定した提供を継続・維持・運用していくために、ネットワー

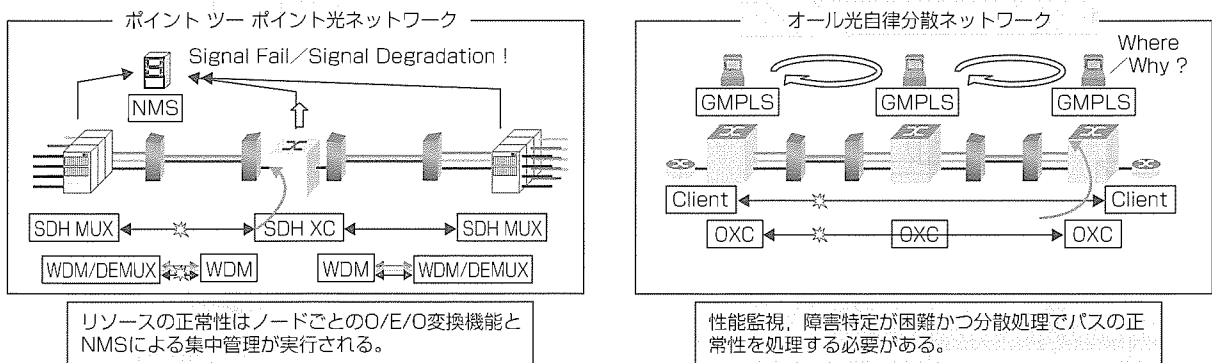


図9. オール光ネットワークにおけるパス正常性確認

クのトラヒック状況、稼働状況を監視して、障害発生時に速やかに障害情報のオペレータへの通知及び速やかな代替・回復処置をとる仕組みが組み込まれている。この機能をネットワーク管理機能と呼ぶ。ネットワーク管理機能は、ワークステーションやパソコンに実装された管理マネージャーと呼ばれるソフトウェアと、管理対象となるOXC装置に組み込まれた管理エージェントと呼ばれるソフトウェアの連携によって実現される(図10)。

管理マネージャー側を以降は管理装置と呼ぶ。光ネットワークの観点から、必要とされるネットワーク管理として障害管理、構成管理、性能管理の特長を以下に説明する。

障害管理機能は、光ネットワーク上の通信経路、通信機器が正常に稼働しているか監視を行い、障害発生時には障害箇所、障害原因の特定、障害の切換え(光パスプロテクション)、障害情報のオペレータへの通知を行う。障害情報は、OXC自ら検知して、組み込み管理エージェントが管理装置に通知を送信する。管理情報を伝送する通信には、通常の通信サービスが伝送される通信路を使用する場合、及び通信機能特有の通信ネットワークを構築する場合がある。OXCによる光ネットワークでは、例えば物理的通信路は通信サービスと共有するが、通常の通信サービスと異なる管理用通信波長を定めてこの波長を通して管理情報の交換を行う。

管理装置とOXC間の通信手順としては、簡易な標準管理プロトコルSNMP(Simple Network Management Protocol)を適用する。発生した障害は、この障害にかかわる通信機器が検知して、特定のメッセージ形式で管理装置に通知する。障害時に代替通信路切換えによって通信サービスの継続を保証する光パスプロテクション機能は、通信サービスを切断せず高速な対処が必要なために、従来の集中管理方式をとらず、管理装置を経由することなく対象通信路にかかわる通信装置間でシグナリングによって実現する方式を採用している。

ネットワーク管理装置側では、通信サービス開始前のプロテクションの現用パス・切換え用予備パスの設定・参照等のオペレーション、及び障害発生時のオペレータへの通知、プロテクション実行時の切換え状況表示を行う。オペレータへの障害通知に当たっては、ネットワークシステムが、安全確実に早期に障害検知するように設計されているために実際に回線断等が発生した場合には各通信機器が障害を検知して、1件の障害でも数十件、数百件の複数の障害通知が管理装置に通知される場合がある。すべての障害情報をオペレータに通知された場合には、真の原因を推定追求するために、オペレータの多大な労力と経験、時間が必要とされる。その点を効率化するために、複数の通知された障害を集約・分析して推測を行い真の主原因障害のみをオペレータに通知する障害集約・分析機能の適用が有効

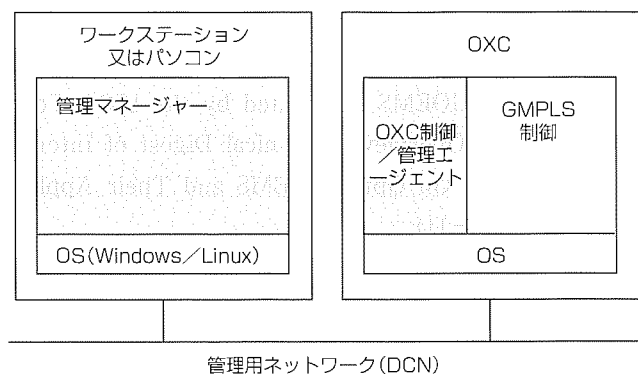


図10. ネットワーク管理機能ソフトウェア実装例

である。この機能は現在開発中であり、障害管理の特長機能として今後組み込みを検討する。

構成管理機能とは、ネットワークの構成状況を管理する機能である。有線系ネットワークであれば、設置された各通信機器と相互接続構成は決まり、その後の設置工事、接続変更等がなければネットワーク構成は固定である。しかし、IPルーティング等の論理的トポロジカルな構成は変化する。各ノード間のシグナリング・コネクションの管理、ルーティング、リンク管理、プロテクション管理としてパラメータ設定・制御・表示機能が必要とされる。

性能管理では、各通信ネットワーク上のトラヒック状況を監視する。光ネットワーク上ではトラヒック状況を直接モニタすることが困難であるために、プロビジョニングによって割り当てた通信帯域情報を基にして、End-End間、又はIPコアルータやエッジルータとのインタフェースで電気信号に変換された際の情報を読み取り、トラヒック情報のモニタリングを行う。性能管理は、障害管理機能では検知できない特定のアプリケーションによる大帯域の不当占有等による他利用者への通信の障害、異常な輻輳(ふくそう)情報の検知等の支援を行う。また、短期的トラヒック状況監視と同時に中長期的通信トラヒックの統計的監視を支援することにより、ネットワーク設備増強計画の支援機能も兼ね備えている。

## 7. む す び

オール光ネットワークを実現するOXCに向け、光スイッチング技術、GMPLSプロトコル技術、光パス高信頼化技術、及び光ネットワーク管理技術の動向と当社の取り組みを述べた。オール光ネットワーク対応OXCは、今後メトロネットワークから導入され、オール光化によってネットワーク大容量化と通信コスト低減をもたらすであろう。

## 参考文献

- (1) 特集「フットニックIPネットワークは人類の幸せのために」、電子情報通信学会誌, 85, No.5 (2002)

- (2) <http://www.bell-labs.com/news/1999/november/10/1.html>
- (3) Mohr, J. : MOEMS Fabricated by the LIGA Technique-An Overview, Technical Digest of International Conf. On Optical MEMS and Their Applications (1997-11)
- (4) Saito, T., et al : Mechanical Optical Switch using Flexible Polymetric Waveguide, OFC 2002, paper TuC 2 (2002)
- (5) Banerjee, A., et al : Generalized Multiprotocol Label Switching : An Overview of Signaling Enhancements and Recovery Techniques, IEEE Commun. Mag., **39**, No.7 (2001)
- (6) Konishi, Y., et al : A Study of Continuity Check Scheme for Optical Path, OECC 2002 (2002- 7)
- (7) 小崎成治, ほか : オール光ネットワークに対応した光クロスコネクタ装置, 信学技報, PS2002-13 (2002- 4)
- (8) Akita, M., et al : A Study on Technology to Realize Optical Cross Connects for All Optical Networks, OECC 2002 (2002- 7)



# 次世代光デバイス技術 —波長可変レーザとモードロック半導体レーザ—

井須俊郎\* 野村良徳\*  
西村哲也\*\*  
後藤田光伸\*

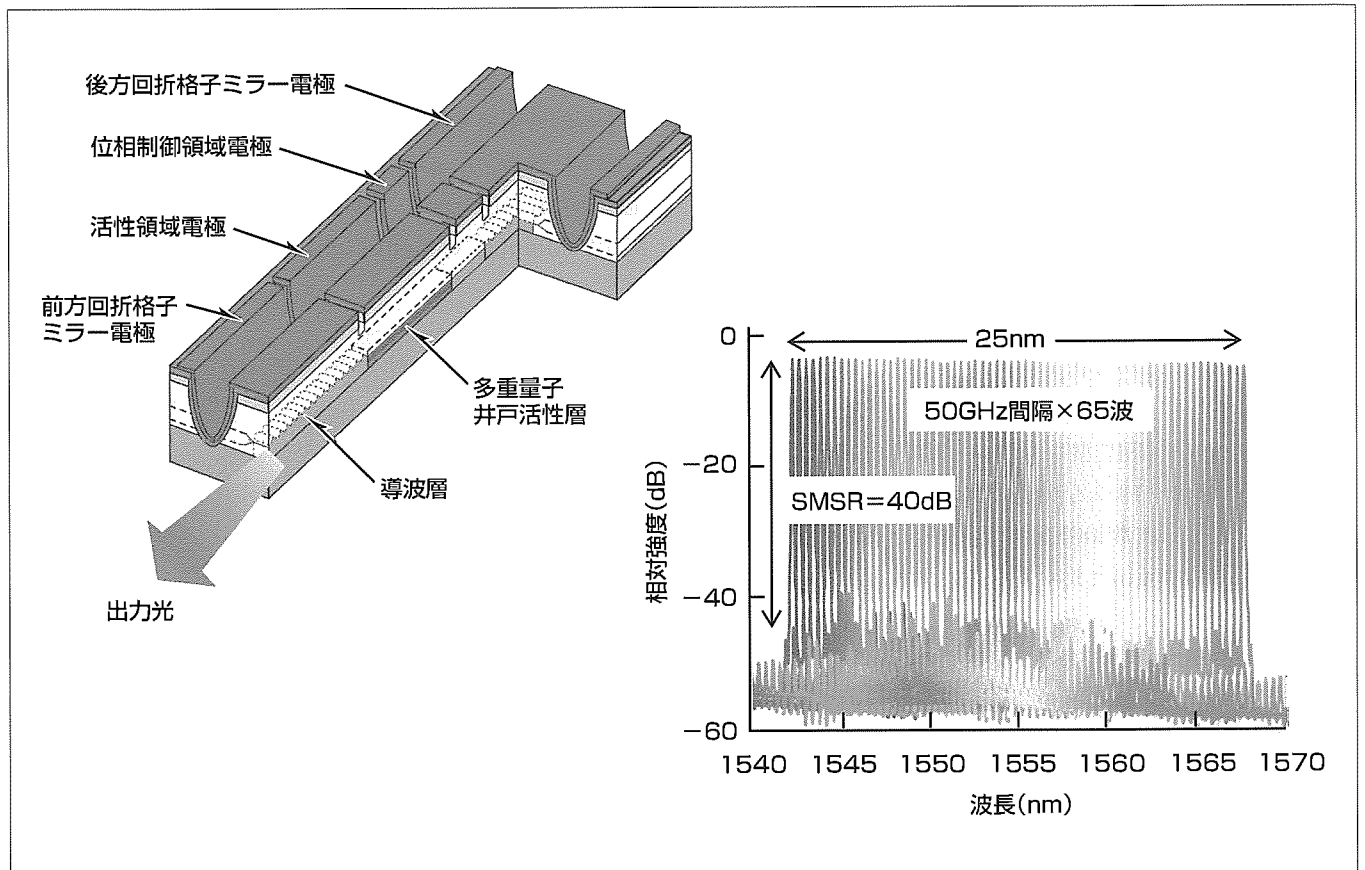
## 要旨

光通信ネットワークシステムの大容量化に対応するため、波長多重伝送方式の実用化が加速されている。また同時に、システムを構成するデバイスはより高速で動作することが要求され、電子デバイスの駆動速度の限界を超えるために光の入出力を光で制御するような超高速光デバイスを使った光時間多重伝送方式が研究されており、そのためのデバイスとして超短パルス発生光源や全光スイッチなどのデバイスの実用化が期待されている。

本稿では、波長多重伝送のための光源として、広い範囲でその発振波長を制御できる波長可変半導体レーザと、超短パルス発生光源として利用されるモードロック半導体レーザについて述べる。波長可変半導体レーザでは、前後に

DBR(Distributed Bragg Reflector：分布ブラッグ反射)回折格子を持つ単一導波路構造を用い、前後のDBR部分に制御電流を流すことにより、30nm以上に及ぶ広い波長可変幅と安定した発振を実現した。モードロック半導体レーザは、三菱電機の独自の構造である不均一励起分布ブラッグ反射型を試作し、40GHzの受動モードロックによる発振と超高速光通信に適したトランスフォームリミットのパルス形状を確認した。

ここに紹介する結果はまだデバイス開発の途中段階のものであるが、これらの知見を基に、次世代半導体光デバイスとして実用化に向けて開発を進めている。



## 試作した波長可変レーザの模式図と発振波長スペクトル

活性層の利得領域の前後にSG(Sampled Grating)とSSG(Super Structure Grating)構造のDBRがあり、ここに電流を流すことによってその屈折率を変えることで反射波長を制御する。前後の反射波長のバーニア効果を利用して広い波長可変幅を実現している。発振スペクトルは50GHz間隔で65波の発振を重ね合わせたものである。



1. ま え が き

波長多重伝送方式の広がりにつれ、そのシステムの低コスト化のため、多波長信号光源、バックアップ用光源、又は波長ルーティングの光源として、広帯域波長可変光源が求められている。波長可変光源として、これまで、SG-DBRレーザ<sup>(1)</sup>やSSG-DBRレーザ<sup>(2)</sup>などが提案されている。これらは、その反射領域に電流注入することで屈折率を変化させ、レーザの発振波長を制御するものである。これらの多電極DBRレーザは波長可変幅が広く波長スイッチング速度も速いという特長を持っており、また、単一の導波路で形成できるため、これまでの半導体レーザの製造プロセスを利用できる。しかし、波長制御のためのパラメータが多く、簡単に信頼性のある波長制御方法と長期にわたる波長安定性が必要とされる。今回、我々は、フロント部をSG、リア部をSSGとし、共振光の位相を調整する位相制御領域を設けたSG-SSG-DBRレーザを試作し、30nm以上に及ぶ広帯域の波長可変特性と、安定した波長制御を行うことができることを確認した。

また、更なる通信速度の向上に向けて、光の入出力を光で制御する光時間多重伝送方式のデバイスとして超短パルス発生光源や、全光スイッチなどのデバイスの実用化が期待されている。半導体モードロックレーザ(ML-LD)は、数十GHz以上の高速の繰り返しパルスの発生を行うことができるので、信号源又はクロック再生など超高速光通信システムでの様々な応用が考えられるとともに、パルス波形が超高速光通信に適したフーリエ変換リミットに近いことから有用なデバイスと期待される。最近、40GHzのパルス発生の必要性が特に注目されるようになってきた。これまで、可飽和吸収領域を集積化した受動ML-LDで、40GHzから480GHzの繰り返し周波数が報告されてきている<sup>(3)</sup>。一方、我々は可飽和吸収領域を持たないファブリペロー(FP)型半導体レーザで60GHzを超える受動モードロックパルスが発生できることを確認した<sup>(4)</sup>。また、繰り返し周波数40GHzを実現するためにはそのキャビティ長を約1,000 $\mu\text{m}$ と長くする必要があるが、そのような長いキャビティ長でも安定したモードロック動作を生じさせるための不均一励起構造を提案した。

今回、スペクトル幅などを含め光通信用として適正なものとするため、DBRミラーでモード選択できるような構造を追加したML-LDにおいて、40GHzで超高速光通信に適したフーリエ変換リミットの形状を持つパルス発生ができることを確認した。

これらの結果はまだデバイスの基本的な機能を確認した段階であるが、今後超高速光通信システムのための次世代半導体光デバイスとして有望であることが明らかになったので、その結果を紹介したい。

2. 広帯域波長可変半導体レーザ

2.1 SG-SSG-DBRレーザ

半導体レーザに電流を注入すると、そのキャリアによるプラズマ効果によって屈折率が減少する。このため、DBRレーザにおいて、DBR領域に電流注入を行うと、そのブラッグ反射波長が短波長側にシフトする。SGはその一部を一定周期で取り除いた部分を持つような回折格子であり、SSGはピッチを少しずつ変化した回折格子を周期的に繰り返したもので、いずれも超周期構造を持つ不均一回折格子である。これらの回折格子は、スペクトル上で複数の反射率ピークを持っている。SG-DBRレーザやSSG-DBRレーザでは活性領域の前後にそれぞれSG-DBR又はSSG-DBR領域を持っており、双方の反射率ピークの重なった波長で発振が生じる。

図1に波長可変の原理を示す。DBR領域への電流注入でそれぞれの反射ピーク波長を変化させることができるが、前後のDBRの反射率ピークの間隔をわずかに変えておくことで、そのバーニア効果を利用して隣接した反射率ピークを使うことによって大きく発振波長を変化させることができる。それぞれの反射率の特性などを勘案すると、SSGのみの組合せよりもSGの反射率を下げることによって出力を大きくとることができるので、フロント側にSG、リア側にSSGを配置し、さらに共振光の位相を調整するための位相制御領域を設けた構造とした。

図2に試作したSG-SSG-DBRレーザの共振器方向の構造断面の模式図を示す。活性層はひずみ量子井戸からなるMQW(Multiple Quantum Well)層を用い、利得領域以外

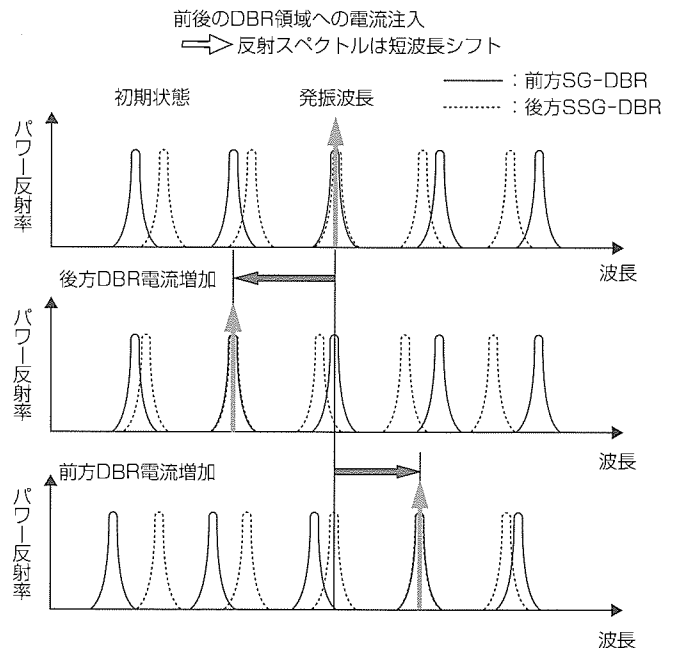


図1. 発振波長可変の原理

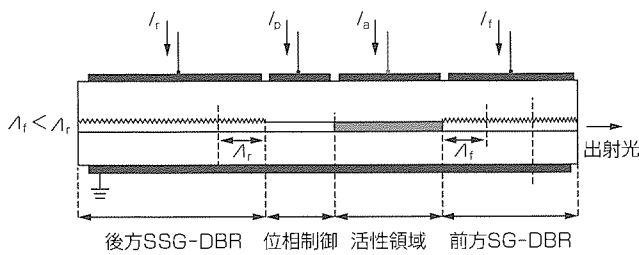


図2. SG-SSG-DBRレーザの断面構造模式図

の透明導波路はバットジョイント成長で形成し、DBRは埋め込み回折格子を用いている。劈開(へきかい)端面での反射を防ぐため、両端には反射防止膜を形成した。

## 2.2 レーザ特性

試作したレーザの典型的な出力は100mAの電流注入時に13mW程度であり、閾値(いきち)は14mA前後であった。SG-SSG-DBRレーザでは、前後のDBR領域への電流注入によって発振波長を変化させるが、大きな波長変化は前後のDBRの反射ピークの異なるモードに移ることによって。このため、これらのSG又はSSGのモードの間の境界ではわずかな電流の違いで波長がずれるため、モード間の境界近傍を避けた条件での波長制御と、長期間にわたる発振波長の安定性が重要となる。図3は、活性領域電流を一定にしたときの、フロントDBRの電流( $I_f$ )とリアDBRの電流( $I_r$ )に対する発振波長を等高線表示したものである。全体で30nmに及ぶ波長可変幅を得ていることが分かる。長期にわたる発振波長の安定化を図るため、60°Cで18時間から770時間のエージングを行い、その後の発振波長を調べた。全体の波長可変幅はエージング時間にかかわらず一定であった。しかし、幾つかの電流条件では“波長変化”がエージング後も認められた。このような電流条件を等高線表示にプロットしてみると、いずれも等高線が集中している領域、すなわちモード境界の条件となっていることが分かった。これはエージングによるわずかの屈折率変化がモード境界を変化させたことによるものであると考えられる。このことから、モード境界を避けた電流条件での波長制御が重要であることが分かる。なお、適切な電流条件での2.5Gbps直接変調、50kmの伝送実験では、BER(Bit Error Rate)= $10^{-9}$ に対してパワーペナルティ0.7dBが得られた。

## 2.3 波長制御アルゴリズム

安定した波長制御を得るためには、 $I_f$ と $I_r$ の波長等高線図(マップ)に着目して注意深く電流表を作らなければならず、さらに電流のフィードバック制御も不可欠となる。詳細なマップをとる時間を短縮し、波長制御を行うために次のようなアルゴリズム<sup>(5)</sup>を試みた。 $I_f$ と $I_r$ を粗調整として用い、微調整として温度を用いる。すべての波長可変範囲をカバーできるように、複数のモードごとにそれぞれ

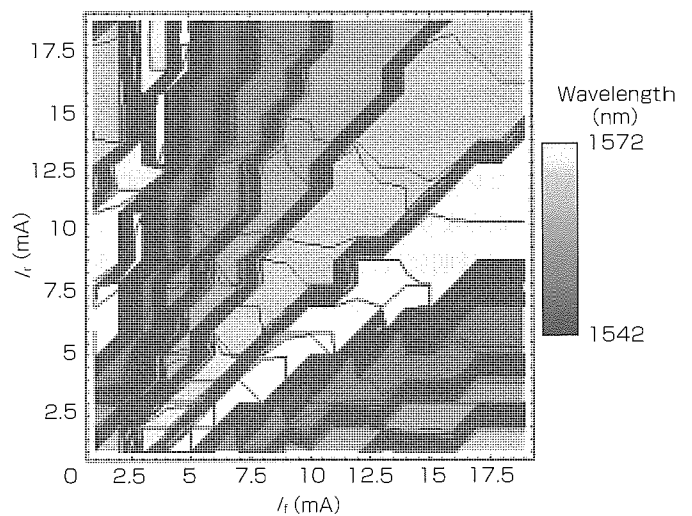


図3. フロントDBRとリアDBR注入電流に対する発振波長の等高線表示

の領域のほぼ中央となるよう  $I_r = a \times I_f + b$  となる条件式を用いる。所望の波長に対し、モードの選択と  $I_f$ ,  $I_r$  を設定して粗調整する。また、出力の高周波成分をRIN(Relative Intensity Noise)モニタで観測し、所定値以下にするように位相領域に電流注入して制御する。その後、波長モニタ信号をリファレンスとして素子温度を変化させることによって微調整を行う。アイソレータ付きバタフライパッケージにモジュール化して行った波長制御実験で、要旨のページの図に示したように、50GHz間隔のITU(International Telecommunication Union)-T(Telecommunication Standardization Section)勧告に準拠した波長グリッドに同調した65波に対して、1mWでの安定した出力で40dBの安定したサイドモード抑圧比が確認できた。

## 3. 40GHzモードロックDBRレーザ

### 3.1 モードロックDBRレーザ

ファブリペローレーザでは多くの縦モードがあるため、あるキャリア密度において隣接するモード間の位相が一致するような場合、受動モードロックが生じることが知られている。三つの縦モードを考慮した半導体レーザのモデルを使って、それらの位相差とキャリア密度などの関係を理論的に解析した<sup>(4)</sup>。

位相差はキャリア密度、光密度とともにキャビティの縦モード間隔や利得領域の長さ大きく依存し、発振の条件において位相差が同位相となるときに振幅モードロックが生じることが分かった。モードロックの周波数は共振器長で決まるので、40GHzのモードロック周波数を得るためには1,000 $\mu$ m程度の共振器長が必要となる。この長さでは、利得領域と共振器が同じ長さの場合、同位相で発振する条件を満たさなくなる。しかし、長い共振器に対しても、共振器の一部のみを利得領域とし前後に透明領域を設ける不

均一励起では、モードロックが生じることが理論的に導かれた。これらの理論的知見からスペクトル幅を制限するとともに複数の縦モードを選択するためのDBRを設け、不均一励起を行うことのできる構造を考案した。

今回試作したレーザ構造の模式図を図4に示す。導波路は三つの領域からなり、中央の利得領域(520 $\mu\text{m}$ )、DBR(291 $\mu\text{m}$ )のある透明領域(375 $\mu\text{m}$ )、DBRのない透明領域(260 $\mu\text{m}$ )で、DBRのない側は劈開端面をミラーとして用い、DBRのある側の端面には無反射コートをした。利得領域と透明領域の長さは、隣接する縦モード間の位相差がin-phaseとなるような不均一励起の条件を満たすように設計してある。

### 3.2 モードロック動作特性

試作したレーザの発振閾値は13mA、25 $^{\circ}\text{C}$ で利得領域へ130mA注入時の出力は10mWであった。モードロックパルスは、利得領域とDBR領域に電流を注入して観測を行った。出力光は光ファイバを経由してカプラで分岐し、光スペクトルアナライザで発振スペクトルを、また光ファイバアンプで増幅した後、自己相関器(オートコリレータ)によってパルス形状を観測した。図5に、利得領域電流130mA、DBR領域電流3.66mAの時のスペクトルを示す。図から分かるように、-20dB以内で三つのモードが選択されていることが分かる。このことから、DBRはきれいなモードロックパルスを得るためのモード選択とともに、スペクトル幅を三つのキャビティ縦モードの幅に狭める働きをしていることを確認できた。図6はオートコリレータ

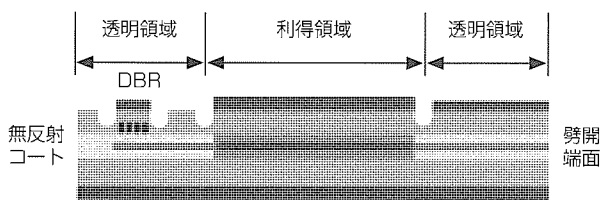


図4. モードロック半導体レーザの断面構造模式図

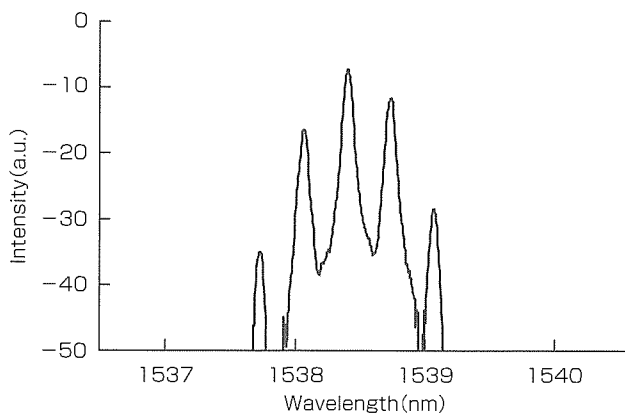


図5. モードロック半導体レーザの発振波長スペクトル

の出力波形であり、繰り返し周波数はそのパルス間隔から40.4GHz、パルス幅はその波形がsech<sup>2</sup>型であるとする8.8psであると求められた。この値はスペクトル幅から求めたフーリエ変換リミットの波形とほぼ一致し、時間帯域幅積は変換限界の1.14倍であった。DBR領域電流を増加すると、DBR領域のプラズマ効果によってモードロックの中心波長を5nm程度変化させることができた。

## 4. む す び

SG-SSG-DBRレーザは、DBR領域の電流制御により、30nm以上の広帯域の波長可変幅を持ち、安定した出力と40dBの安定したサイドモード抑圧比を持つことが分かった。波長可変レーザは、波長多重伝送システムにおける光源として極めて重要なデバイスである。SG-SSG-DBRレーザはその一つの候補として有望なデバイスであること示した。しかしながら、これまでのレーザに比べ波長制御の複雑さがあることは否めない。今後、高出力化など実用化に向けた開発において、DBR部や活性領域の設計など半導体部分に関する最適化のみならず、波長制御アルゴリズムの更なる改善を進めることが重要であると考えられる。

可飽和吸収領域を持たない不均一励起のDBRレーザにおいて、40GHzの繰り返し周波数での受動モードロック発振を確認した。そのパルス幅は8.8psであり、超高速光通信に適した変換リミットにほぼ近い波形を持っていることが観測できた。また、DBR領域に電流注入することで、発振波長を5nm程度可変できることが分かった。これらの結果は、今後の40Gbps以降の光通信システムにおいて、様々な応用が期待できるデバイスであることを示している。今後、伝送特性や、クロックリカバリーなどの用途に対して、外部同期特性などを調べ、その特長を明らかにすることが必要である。

次世代光デバイス技術としてSG-SSG-DBRレーザと不均一励起DBRモードロック半導体レーザを取り上げ、こ

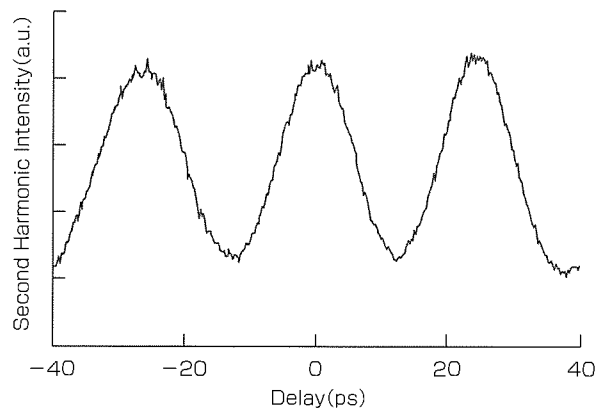


図6. 出射パルスの自己相関波形

れまでに得られている結果を紹介した。いずれもまだ開発途中段階の特性であり、実用化に向けてまだ多くの課題は残されている。また、これらを導波路デバイスとの集積化や光スイッチと組み合わせ、波長変換や光3Rなどの機能を実現し、フォトニックノードで用いる次世代デバイスを目指して更なる研究開発を進めていきたい。

#### 参考文献

- (1) Jayaraman, V., et al.: Theory, Design, and Performance of Extended Tuning Range Semiconductor Lasers with Sampled Gratings, IEEE J. Quantum Electron. **29**, 1824~1834 (1993)
- (2) Tohmori, Y., et al.: Broad-range Wavelength-tunable Superstructure Grating (SSG) DBR Lasers, IEEE J. Quantum Electro. **29**, 1817~1823 (1993)
- (3) Liu, H. F., et al.: Tuning Characteristics of Monolithic Passively Mode-locked distributed Bragg Reflector Semiconductor Lasers, IEEE J. Quantum Electron. **32**, 1965 (1996)
- (4) Nomura, Y., et al.: Mode Locking in Fabry-Perot Semiconductor Lasers, Phys. Rev. A **65**, 043807 (2002)
- (5) 今城正雄, ほか: SSG-DBR-LDの波長制御アルゴリズム, 電子情報通信学会総合大会, C-4-45 (2002)





# 特許と新案 \* \* \*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話(03)3218-9192(ダイヤルイン)

## 光増幅装置 (特許 第3247919号, 特開平7-38182号)

発明者 三菱電機(株) 本島邦明, 北山忠善, 山下純一郎, 仲川栄一  
KDDI(株) 安部春夫, 則松直樹  
KDDI海底ケーブルシステム(株) 秋葉重幸, 後藤光司  
(株)KDDI研究所 鈴木正敏

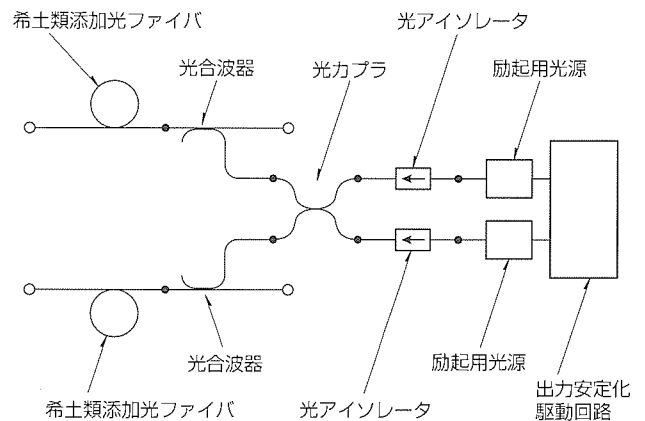
この発明は、光ファイバに希土類元素を添加して増幅作用を持たせた光増幅器の励起方法にかかわり、特に複数の光ファイバ増幅器を複数の励起用光源で励起する冗長化構成における励起光電力の安定化に関するものである。

光カプラを用いて励起用光源から出力される励起光を合波・分配することによって希土類添加光ファイバを励起する従来の励起用光源の冗長化構成においては、励起用光源どうしの結合によって注入同期が発生し、コヒーレンスのとれた二つの光が光カプラに入力され、希土類添加光ファイバに入力される励起光電力が変動するため、結果的に希土類添加光ファイバの利得そのものも変動するという問題があった。

この発明の励起用光源の冗長化構成においては、光増幅器励起用光源と光カプラ間に光アイソレータを挿入することにより、複数の励起用光源が注入同期によって光カプラで干渉して光増幅器へ入力される励起光電力が変動するこ

とを防ぐことができる。

この発明によれば、従来の構成で発生した希土類添加光ファイバの利得変動を抑圧でき、励起用光源の冗長化構成による高信頼化のメリットを生かしつつ安定な動作を実現できる。



## 光増幅装置 (特許 第3250428号, 特開平9-97940号)

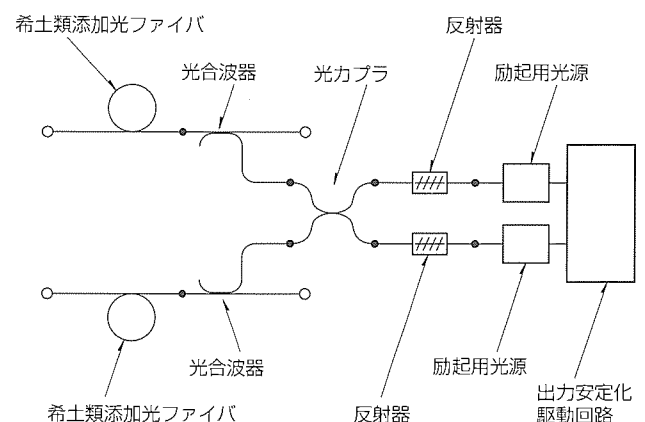
発明者 本島邦明, 水落隆司, 高野勝美, 北山忠善

この発明によれば、従来の構成で発生した希土類添加光ファイバの利得変動を抑圧でき、励起用光源の冗長化構成による高信頼化のメリットを生かしつつ安定な動作を実現できる。

この発明は、光ファイバに希土類元素を添加して増幅作用を持たせた光増幅器の励起方法にかかわり、特に複数の光ファイバ増幅器を複数の励起用光源で励起する冗長化構成における励起光電力の安定化に関するものである。

光カプラを用いて励起用光源から出力される励起光を合波・分配することによって希土類添加光ファイバを励起する従来の励起用光源の冗長化構成においては、励起用光源どうしの結合によって注入同期が発生し、コヒーレンスのとれた二つの光が光カプラに入力され、希土類添加光ファイバに入力される励起光電力が変動するため、結果的に希土類添加光ファイバの利得そのものも変動するという問題があった。

この発明の励起用光源の冗長化構成においては、光増幅器励起用光源と光カプラ間にファイバグレーティング等の波長選択性を持つ反射器を挿入することにより、励起用光源のコヒーレンスを低下させ、注入同期による励起光電力の変動を抑圧することができる。





# 特許と新案\*\*\*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
電話 (03) 3218-9192(ダイヤルイン)

## OPTOELECTRONICS PACKAGE (米国特許4989930号)

発明者 仲川栄一, 山下純一郎

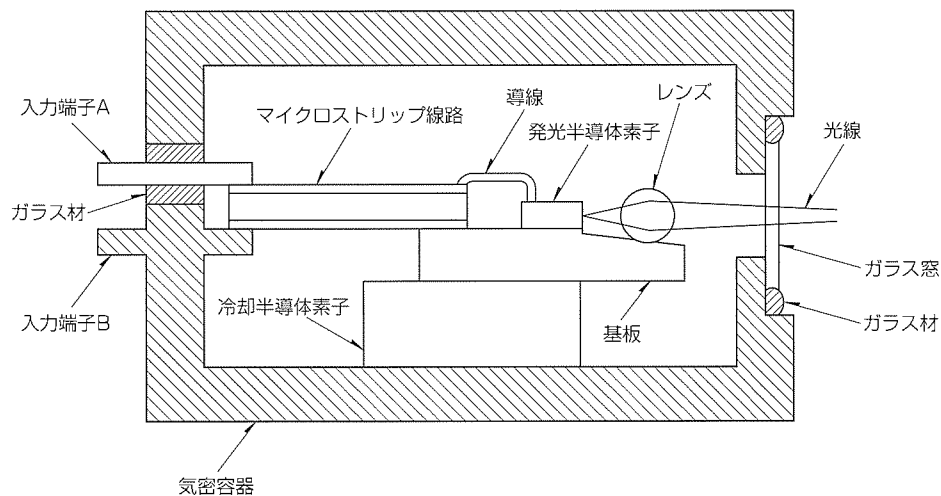
この発明は、光通信に用いられる発光半導体素子を搭載する発光半導体装置用パッケージに関するものである。

発光半導体素子及び冷却半導体素子を収納し発光半導体素子の駆動信号の入力端子を備えた気密容器からなる従来の発光半導体装置用パッケージにおいては、冷却半導体素子の電気容量の影響によって発光半導体素子に伝えられる高周波信号が小さくなってしまい、効率良く駆動できないという問題点があった。

この発明の発光半導体装置用パッケージでは、高周波信

号を伝えるマイクロストリップ線路の接地側を利用して発光半導体素子と端子の間を接地することによって冷却半導体素子の電気容量の影響なくしているので、発光半導体素子を効率良く駆動することができる。マイクロストリップ線路は熱伝導が小さいので冷却半導体素子による冷却効果を損なうことがなく、発光半導体素子の温度を安定に保つことができる。

以上のようなパッケージ構造の発明により、高周波信号を効率良く駆動できる発光半導体装置を容易に実現できる。



### <本号記載の商標について>

本号に記載されている会社名、製品名はそれぞれの会社の商標又は登録商標である。

### <次号予定> 三菱電機技報 Vol.77 No.1 「技術の進歩」特集

三菱電機技報編集委員	三菱電機技報 76巻12号	2002年12月22日 印刷
委員長 井手 清	(無断転載・複製を禁ず)	2002年12月25日 発行
委員 高橋 大 畑谷正雄 堤 清英	編 集 人 井手 清	
楽原幸志 村松 洋 松本 修	発 行 人 福本 紀久男	
浜 敬三 石野 禎将 中川 博雅	発 行 所 三菱電機エンジニアリング株式会社 e-ソリューション&サービス事業部	
中島克人 部谷文伸	〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目4番1号	
黒畑幸雄 山木比呂志	秀和芝パークビルA館9階 電話 (03)3437局2692	
事務局 松本 敬之	印 刷 所 株式会社 三菱電機ドキュメンテクス	
本号取りまとめ委員 本島 邦明	発 売 元 株式会社 オーム社	
	〒101-0054 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地	
	電話 (03)3233局0641	
	定 価 1部735円(本体700円)送料別	
URL <a href="http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/">http://www.MitsubishiElectric.co.jp/giho/</a>	三菱電機技報に関するお問い合わせ先	<a href="mailto:cep.giho@ml.hq.melco.co.jp">cep.giho@ml.hq.melco.co.jp</a>

# 三菱電機技報 (2002年 第76巻) 総目次

1号 技術の進歩	6号 特集「21世紀の生活と産業を支えるモータ技術」	9号 特集「インターネット時代の社会インフラシステム」
2号 特集「化合物半導体」	7号 特集「最近のプラント建設工事」	10号 特集「IT応用水環境システム」
3号 特集「半導体」	8号 特集「IT時代のヒューマンインタフェース技術」	11号 特集「人と暮らしを支える技術」
4号 特集「情報セキュリティ」		12号 特集「光通信技術」
5号 特集「省エネルギー機器・技術」 特集「低圧遮断器の最新動向」		

## 技術の進歩特集

号	ページ	号	ページ
巻頭言・カラーピックアップ	1 ... 4	7. 情報	1 ... 64
1. 研究・開発	1 ... 31	8. 映像情報	1 ... 72
2. 発電・産業及び公共	1 ... 43	9. 住環境	1 ... 75
3. 系統変電及び電気鉄道	1 ... 48	10. FA及び産業メカトロニクス	1 ... 78
4. 昇降機及びビル設備	1 ... 53	11. 自動車機器	1 ... 83
5. 宇宙・衛星及び電波応用	1 ... 56	12. 半導体・電子デバイス	1 ... 86
6. 通信	1 ... 59	社外技術表彰一覧表・総目次	1 ... 92

## 特集論文

### 特集「化合物半導体」

1. 光・高周波デバイスの将来展望	三宅良雄	2	104
2. 10Gbps直接変調アンクルドDFBレーザ	境野 剛・久 義浩・渡辺 斉	2	109
3. 10Gbps用高効率InP/InGaAsアバランシェ フォトダイオード	石村栄太郎・船場真司・田中芳和	2	113
4. 1.3μm帯AlGaInAs系リッジ導波路型レーザ	瀧口 透・三橋 豊・門脇朋子	2	117
5. 半絶縁性InP基板を用いた40Gbps電界吸収型光変調器	高木和久・多田仁史・青柳利隆	2	121
6. 40Gbps伝送用光モジュール	金子進一・宮原利治・野田雅樹・北村洋一・石崎光範	2	125
7. Er添加光ファイバアンプ励起用980nm半導体レーザ	鳴原君男・川崎和重・山村真一	2	129
8. DVD-R/RW/RAM用赤色低電流高出力レーザ	佐々木素子・宮下宗治・坂本善史	2	133
9. 超高速光スイッチに向けた高非線形半導体材料	秋山浩一・冨田信之・井須俊郎	2	137
10. GSM方式携帯電話用HBTパワーアンプ	鈴木 敏・紫村輝之・服部 亮	2	141
11. CDMA方式携帯電話用HBT電力増幅器モジュール	前村公正・藤井一暢・山本裕司・大塚裕之	2	145
12. 直列/並列LC回路切替方式広帯域反射型移相器MMIC	宮口賢一・檜枝護重・久留須 整・新居眞敏・高木 直	2	149
13. 温度補償回路内蔵X帯MMIC電力増幅器	山内和久・伊山義忠・山口真美子・池田幸夫・高木 直	2	153
14. 衛星搭載用K帯高効率MMIC電力増幅器	宇土元純一・石田多華生・小丸真喜雄・赤石 明	2	157
15. 化合物半導体の品質保証	太田洋一朗・伊木茂男・水口 澄	2	161

### 特集「半導体」

1. 革新的ITDMを目指して	松川隆行	3	168
2. 216MHz 32ビットRISCマイコンM32R“M32104S6FP”	布村泰浩・鈴木弘明	3	175
3. 単精度浮動小数点演算器内蔵マイクロプロセッサ“M32R-FPU”	前田昇平・岩畔一之・橋本浩志・佐藤由和・宮内英男・千石天光	3	179
4. デジタルパワーアンプ用プロセッサLSI	森岡幸一・大木正司	3	183
5. Bluetooth用ベースバンドLSI“M64110WG”	三浦 学・白石竹虎・大迫義行・堀 俊彦	3	187
6. Bluetooth用RFトランシーバLSI“M64846FP”	伊賀哲也・長谷川浩一・高橋幸二・小紫浩史・江花武雄	3	191
7. 0.13μm 256MビットSDR/DDR SDRAM	久家重博・山岡 茂・谷田 進	3	195
8. 0.18μm4M/8Mビット低消費電力SRAM3V/1.8Vシリーズ	池田和也・中嶋 泰・芦田 基	3	199

9. 携帯機器向け大容量モバイルRAM搭載MCP .....	築出正樹・鈴木富夫・奥垣 明	3	.....203
10. sTSP搭載メモリモジュール .....	福元孝和・松浦哲也・三角和幸・筆保吉雄	3	.....207
11. 混載DRAM用モジュールジェネレータ .....	諸岡毅一・渡邊直也・小田学洋	3	.....211
12. 大規模高速システムLSI対応設計システム .....	井上善雄・高橋一浩・古茂田道夫・岩永 純・加賀谷達次	3	.....215
13. システムLSIにおける超低コストアナログテスト技術“Static Analog BOST” .....	花井寿佳・船倉輝彦・山下栄作・森 長也	3	.....219
14. 0.1μm世代をにらんだ半導体デバイスの評価技術 .....	廣瀬幸範・福本晃二・益子洋治	3	.....223

#### 特集「情報セキュリティ」

1. 暗号・情報セキュリティの動向.....	小野修一・小松田敏二・竹田栄作	4	.....230
2. 三菱電機の暗号アルゴリズム開発—MISTY, KASUMI, Camellia— .....	松井 充・時田俊雄・反町 享	4	.....236
3. 標準化動向.....	近澤 武	4	.....241
4. 暗号強度評価技術.....	時田俊雄・酒井康行・高島克幸	4	.....245
5. 暗号アルゴリズムの実装.....	中嶋純子・市川哲也・粕谷智巳・山岸篤弘	4	.....249
6. 量子暗号技術.....	長谷川俊夫・西岡 毅・石塚裕一・安部淳一	4	.....255
7. セキュリティライブラリ.....	辻 宏郷・齋藤和美	4	.....259
8. 耐タンパーセキュアボード“TURBOMISTY” .....	中川路哲男・竹原 明	4	.....263
9. PKI構築技術 .....	坂上 勉・佐伯正夫	4	.....267
10. 電子文書に対する署名技術.....	鈴木 博・大澤 尚・植村 穰・清水可奈子・佐伯正夫	4	.....271
11. セキュアストレージ—電子カルテへの適用—.....	宮崎一哉・茗原秀幸	4	.....275
12. メモリカードを用いたデジタルコンテンツ配布システム.....	宮崎一哉・中嶋春光	4	.....279
13. 不正アクセス対策技術.....	藤井誠司・勝山光太郎	4	.....283
14. セキュリティポリシー.....	青木 尚	4	.....287
15. PKI応用—EDIにおけるPKIの適用— .....	遠藤 淳・田中 学	4	.....291
16. 電子政府・電子自治体への取組.....	並河 誠・高橋 浄	4	.....295

#### 特集 I「省エネルギー機器・技術」

1. 省エネルギー機器・技術の現状と展望.....	馬場文明	5	.....310
2. 電力機器の省エネルギー.....	山本俊二・前田 進・村上 寛・南井良文・吉田康夫	5	.....314
3. エレベーターの省エネルギー技術.....	久保田猛彦・小松孝教・荒木博司	5	.....318
4. 空調機の省エネルギー技術.....	古藤 悟・中山雅弘・七種哲二・加賀邦彦・若本慎一	5	.....322
5. 省エネルギーに対応したパワーデバイスの動向.....	山元正則・福永匡則	5	.....326
6. インバータ技術と省エネルギー.....	木全政弘	5	.....330
7. 省エネルギーをリードするシミュレーション技術 .....	長尾政志・馬場和彦・川尻和彦・廣中康雄・岩村義巳・加藤康明	5	.....334

#### 特集 II「低圧遮断器の最新動向」

1. 低圧遮断器の現状と展望.....	井下雄右・矢木澤 守	5	.....340
2. 新形ノーヒューズ遮断器・漏電遮断器“WSシリーズ” .....	山県伸示・谷辺俊幸	5	.....344
3. 最近の遮断器における新遮断技術.....	三橋孝夫・月間 満・伏見征浩	5	.....348
4. 遮断器用モールドケースの衝撃解析技術.....	春名一志・安村賢二	5	.....352
5. WSシリーズ対応計測表示ユニット付きブレーカ .....	永久英夫	5	.....356
6. WSシリーズ漏洩電流表示付き遮断器 .....	野村敏光・神谷慎太郎	5	.....360
7. 小型気中遮断器“AE4000-SSA” .....	川上淳一・中出口真治・久森洋一・岡下広史	5	.....364
8. 拡大する中国市場におけるMCBに求められる役割と動向 .....	河上 正・池田龍典・池田清二	5	.....368

#### 特集「21世紀の生活と産業を支えるモータ技術」

1. 中小型モータの現状と展望.....	中村史朗・海野真人	6	.....374
----------------------	-----------	---	----------



2. エレベーター巻上機用モータ	川口守弥・大穀晃裕・安江正徳・小松孝教	6	378
3. 住環境機器用高効率モータ	川口 仁・馬場和彦・松岡 篤・石井博幸・及川智明	6	382
4. 電動パワーステアリング用モータ	田中俊則	6	387
5. 鉄道車両用高効率主電動機	寺澤英男・赤木秀成・坂根正道	6	391
6. 高性能専用ACサーボモータ	合田 洋・大塚 久	6	396
7. 高効率産業用モータ	立見廣光・吉野 裕	6	400
8. 工作機械用主軸モータ	川島和之・小林 学・嶋田明広	6	405
9. 最新のモータ電磁設計技術	米谷晴之・井上正哉・守田正夫・仲 興起	6	410
10. 最新のモータ機械設計技術	吉桑義雄・今城昭彦	6	416
11. 最新のモータ制御技術	佐竹 彰・金原義彦・貝谷敏之	6	421
12. 最新のモータ製造技術	三宅展明	6	426

### 特集「最近のプラント建設工事」

1. 省力化・合理化に挑戦するプラント建設工事	松宮保夫・塚田光政	7	434
2. プラント建設工事の安全衛生・品質保証・環境保全活動	吉岡 克・一宮昭博・板井公作	7	439
3. 教育研修・技量認定と技術の伝承	大竹 茂・廣岡俊言	7	443
4. プラント建設工事を支える情報システム	佐藤 寛・酒井満治・河瀬 幹	7	447
5. プラント建設工事をリードする最新工法	前畑純一・徳宮 豊・加福 徹	7	451
6. 公共工事における合理化・省力化機材	辻本一孝・平 隆則・前原信章	7	455
7. 原子力プラント建設工事の最新工法	安藤博敏・今住智弘・奥村康志	7	459
8. 電力プラント建設の最新技術動向	山口耕平・千田一郎・小松幸雄	7	463
9. ビル・交通電源設備リニューアル工事の最新工法	金子 守・近藤良孝・近藤一男	7	467
10. 機械室レスエレベーターの据付工法	夏目 隆	7	471
11. ペルセウスシールドの施工	金本貴志・瀬戸信二・加藤栄二郎	7	475
12. 大型光学赤外線望遠鏡“すばる”の建設	本多博一・大山 巧	7	479
13. 台湾における先端大規模クリーンルームの建設	細井 昭・大野明之・井原勘太郎・陳 明凱	7	483
14. 駅ビル百貨店増築改修設備工事	樋野 清・細井 茂・朝木敏晴・大木光男	7	487
15. 環境対応形の食品加工・流通設備の建設	松隈茂昌・竹田健一・大津茂生・横尾 淳	7	491

### 特集「IT時代のヒューマンインタフェース技術」

1. IT時代のヒューマンインタフェース—現状と展望—	依田文夫・石川 泰	8	498
2. 音声認識技術とその応用	岩崎知弘・花沢利行	8	503
3. テキスト音声合成技術	藤井洋一・石川 泰	8	507
4. 音声対話技術	石川 泰・渡邊圭輔・谷垣宏一	8	511
5. 人物監視技術	ポール バーズリー・レシエク チプリンスキー・ポール ビオラ・鷺見和彦	8	515
6. 接触認識技術“ダイヤモンドタッチ”	ポール デイーツ・ダレン リー	8	521
7. 携帯端末用“Z3D”グラフィックスエンジン	亀山正俊・藤本仁志・岩崎建樹・河合浩行・児玉幸夫	8	525
8. 携帯電話向け画像処理技術とその応用	的場成浩・田中正二・ミロスロー ボーバ	8	529
9. マルチプロジェクト技術	ラメシュ ラスカル・ジェロエン ファンバー・芦崎能広	8	534
10. ネットワーク上の文書テキスト検索・利用技術	鈴木克志・高山泰博	8	538
11. 情報化オフィスにおける文書インタフェース技術	岡田康裕・亀代泰三・平野 敬	8	542
12. インタフェースデザイン評価技術	若松正晴・沢田久美子	8	546
13. ヒューマンセンシング技術の開発と作業計測への応用	白松直樹・坂口貴司・平澤宏祐・大須賀美恵子	8	550
14. 産業用ヒューマンインタフェース評価システム	坂上聡子・寺下尚孝	8	554

### 特集「インターネット時代の社会インフラシステム」

1. IT時代の社会インフラシステム	尾崎禎彦・伊藤 均	9	562
--------------------	-----------	---	-----

2. 電力eビジネスを支えるITソリューション	藤本 俊・森岡雄二・野村 立	9	567
3. 電力取引へのインターネットの適用	マルタ マルミローリ・広瀬公一・稲岡孝雄・永瀬貴之・秋吉政徳	9	572
4. インターネットを利用した電力事業者(電力, 自家発電)向けASPサービス	大野啓明・長沼一裕・片桐三津雄	9	577
5. 電子政府を実現するITソリューション	居駒哲夫・今村 誠・秋間孝道・池田健一郎	9	582
6. 地域イントラネットシステム	牧本健二・藤井正泰・小林伸太郎	9	588
7. 鉄道におけるIT応用システム	加山 勉・角南健次・木村尚史	9	593
8. One-to-One型リモート保守ポータル	藤井康順・高橋 勇・南部雅彦	9	599
9. インターネット応用監視制御フレームワーク“DiaSynapse/JAXSON”	石原 鑑・大崎雅代・高田秀志	9	604
10. 社会のIT化を支えるe社会基盤“e-infr@”	高畑泰志・上村一穂・伊藤 均	9	609
11. 高速PICネットワークシステム	長島義明・成川昌史・水谷良則	9	614

#### 特集「IT応用水環境システム」

1. IT応用水環境システムの展望	吉積敏昭・畑辺 健・廣辻淳二	10	622
2. 上下水道広域統合監視制御システム	成原弘修・中道功二・古林三郎	10	630
3. インターネットを使った上下水道企業と需要家の情報共有	川田卓嗣・石丸昌克・鹿島理華	10	635
4. 上下水道維持管理支援ASP情報サービス	外崎道夫・道行泰代・南部雅彦・今村 誠	10	639
5. 上水水源用油臭センサ応用システム	増田直人・土方健司・上山智嗣・古川誠司	10	643
6. 省エネルギー型窒素・りん除去下水処理制御システム	古川誠司・田中久雄	10	649
7. 三菱パッケージ型オゾン・膜応用高度浄水設備“ハイパーMAX-O <sub>3</sub> ”	田村哲也・石田稔郎・真田欣将・成原弘修・神谷俊行	10	654
8. 消化ガスを燃料とするマイクロガスタービン コージェネレーションシステム	三好英明・谷口哲也・小沢建樹	10	659

#### 特集「人と暮らしを支える技術」

1. ネット家電技術の動向	馬場文明・木目健治朗	11	682
2. ルームエアコンの差別化技術	鈴木 聡・川野将俊・森下国博・村上泰隆	11	687
3. ITと空調管理システム	増井弘毅・荒木義臣・田村和也・井上雅裕・砂澤健司	11	691
4. ビル用マルチエアコンのリニューアル対応技術	森本 修・河西智彦・高下博文	11	695
5. パッケージエアコン用室外機の低騒音化	廣中康雄・中川祥道・加藤康明	11	699
6. 空調機用インバータの高効率化・高性能化技術	川久保 守・矢部正明	11	703
7. 省エンジニアリング設計のホームコントローラ	中田成憲・久代紀之・鈴木繁樹	11	707
8. バス乾燥・暖房・換気システムの衣類乾燥検知及び暖房運転切換えの自動化	清水拓也・福田光男・矢部大輔	11	711
9. 調理家電機器における本質機能の高度化	長田正史・長峯長次・菱山弘司・金井孝博・星野裕嗣	11	715
10. ウレタン発泡三次元流動解析技術	三谷徹男	11	719
11. AVネットワークテレビと周辺機器	赤津慎二・小坂英明・松原雅美・三浦 紳・草葉 裕	11	723
12. 監視用映像デジタル記録装置“DXM 1 core”シリーズ	熊野 眞・加藤直樹・勢木真一	11	727
13. 双方向マルチ大画面制御技術	河原敏成・山川隆司・佐々木啓祐	11	731
14. 高輝度モニター用CRT	長瀬章裕・平野孝之・近藤利一・村上文昭・中西功二	11	735
15. カラーマネジメント技術の現状と将来	香川周一・杉浦博明	11	739

#### 特集「光通信技術」

1. 光通信システム技術及びデバイス技術の展望	笠原久美雄・北山忠善・三宅良雄	12	746
2. 光海底ケーブルシステム技術	中川潤一・尾崎陽二郎・仲川栄一・浅川栄道・加藤雅敏	12	751
3. 陸上幹線・メトロ伝送システム技術	下笠 清・森田俊哉・西尾 猛・上村有朋・大田 聡・加治屋 哲	12	757
4. 光アクセスシステム技術	牧野真也・羽根稔尚・上田広之・横谷哲也・浅芝慶弘	12	763
5. 通信用光半導体デバイス技術	三井康郎	12	769
6. 光通信システムLSI技術	近藤晴房・吉村 勉・前川繁登・久保和夫・高相 純	12	775
7. 光コンポーネント技術	平井俊之	12	780

8. 次世代光伝送技術	水落隆司・本島邦明	12	787
9. 光ネットワーク技術(OXC)	妹尾尚一郎・市川俊亭・秋田正志・高井伸之・八田竜夫	12	794
10. 次世代光デバイス技術—波長可変レーザーとモードロック半導体レーザー—	井須俊郎・西村哲也・後藤田光伸・野村良徳	12	801

**普通論文**

---

薄型・小型指紋センサ	佐藤行雄・岡本達樹・橋戸隆一・近藤潤一・坂下徳美	4	299
デジタル写真プリントエンジン	山田敬喜・木村修也・高橋正敏	4	303
完全固体高集光高出力・波長変換レーザー	小島哲夫・古田啓介・竹中裕司	10	663
第二世代X線リソグラフィ	糸賀賢二・丸本健二・炭谷博昭・熊田輝彦・北山豊樹	10	669
LSI配線用Cu-CMP技術	深田哲生・高田 裕・佐藤一直	10	674



# スポットライト 40Gbps用可変分散補償器

インターネットの爆発的な普及や、より高画質の画像伝送の要求など、通信需要は、拡大の一途をたどっています。光ファイバ通信システムは、拡大する通信需要に対して最適なソリューションです。現在の光ファイバ通信システムにおいては、信号変調速度が10Gbpsの波長多重(WDM)伝送方式が実用化され、より高速の40Gbps WDM伝送方式の研究開発が精力的に進められています。高速の光伝送システムでは、伝送路に使用する光ファイバ固有性質の一つである波長分散特性<sup>(注)</sup>によって信号光パルスのパルス幅が伝搬距離とともに広がり、隣接パルス間で重なるため正しい通信ができなくなります。このため、信号光パルスの伝搬距離が波長分散で制限を受けることになります。伝送路の波長分散は距離にほぼ比例しますが、特に40Gbps以上の高速伝送においては、温度や圧力等の環境の変化によって経時的に変動する分散値を精密に補償する必要があります。10Gbps以下の伝送システムでは、固定の分散値を補償するために、分散補償光ファイバ(Dispersion Compensating Fiber : DCF)を用いています。しかし、変動する分散値を精密に補償するためには、分散値を制御できる可変分散補償デバイスが必要となります。

当社が開発した可変分散補償デバイスは、当社独自の光ファイバグレーティング(Fiber Bragg Grating : FBG)技術と高精度温度制御技術を融合することにより、40Gbps信号の分散値の補償を正確に実現できます。

## 特長

図1に、開発した可変分散補償器の分散補償機能部分の構成を示します。信号光パルスは、伝送路固有の波長分散の影響でパルス幅の広がった状態で光ファイバグレーティングに入射します。波長分散を補償するために、FBG内部で信号光に伝送路とは逆符号の分散を与えます。FBG内部には屈折率を周期的に変化させた回折格子が形成されており、例えばFBG周期が入口から見て長周期から短周期に変化している場合、長波長光は進行方向手前側で、短波長光は奥側で反射されることとなります。入口では反射してきた長・短波長光の遅延時間差、すなわち分

(注) 波長分散特性：光ファイバの群遅延時間が波長によって異なる性質

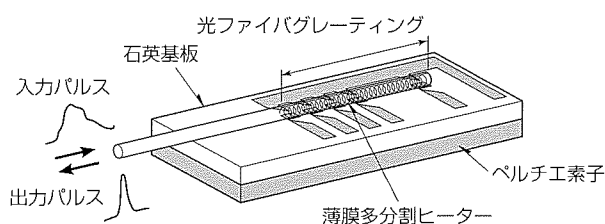


図1. 分散機能部分の構成

散が補償されて、その結果、パルス幅は元の状態に戻ります。伝送路分散値の変動に対し、FBG内の分散値を変化させます。FBGに与える温度分布を変化させることによってガラスの屈折率が変化し、長・短波長光の反射位置が変化することにより、結果として分散値を変化させることができます。図1に示すように、FBGは石英基板上に形成した薄膜多分割ヒーター上に搭載されています。土台にはペルチエ素子を配置し、分散値を可変した際、中心波長が変動しないように制御しています。

## 特性

開発した可変分散補償器の諸特性を表1に示します。透過損失特性において-1dB帯域幅は約0.6nm以上、挿入損失は5dB以下、分散の可変量は350ps/nm以上を達成しています。また、群遅延リプルの特性は±2ps/nmと世界最高水準の特性を持っています。

図2は43Gbps CS-RZ伝送システムでの伝送実験評価結果です。伝送路の分散値374ps/nmに対して補償した場合、0.4nm以上の信号透過帯域が確保できる良好な結果が得られています。

表1. 可変分散補償器の諸特性

項目	特性・仕様
対応伝送方式	43Gbps NRZ変調フォーマット
信号通過帯域幅	0.2nm以上
-1dB帯域幅	0.6nm以上
分散可変幅	350ps/nm以上
群遅延リプル	±2ps以下
挿入損失	5dB以下
PMD	0.5ps以下
応答速度	30秒以下
動作環境温度	5~65℃
消費電力	3W
サイズ	(W)110×(D)145×(H)14(mm)
通信インタフェース	RS-232C

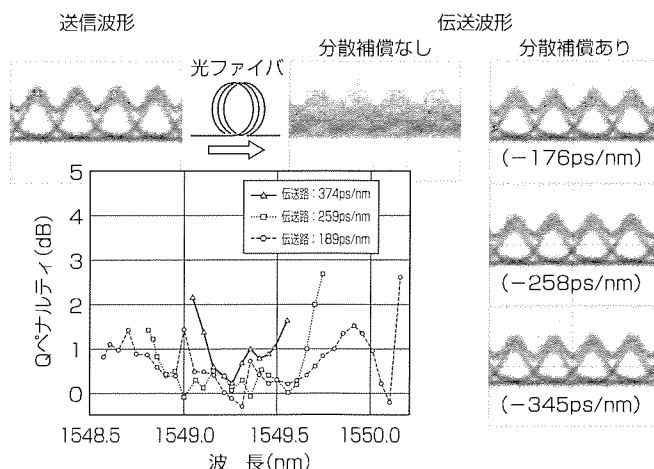


図2. CS-RZ変調方式評価結果

住 所：〒247-8520 神奈川県鎌倉市上町屋325番地

会社名：三菱電機株式会社 鎌倉製作所 お問い合わせ先：電子デバイス事業部 光電子機器営業部 カスタマーサポートグループ TEL 0467-41-5207