



## 光通信と近赤外レーザー

猿 渡 正 俊

NTT 伝送システム研究所 〒238-03 横須賀市武 1-2356

(1991年3月8日受理)

### Optical Communications and Near-Infrared Lasers

Masatoshi SARUWATARI

NTT Transmission Systems Laboratories,  
1-2356, Take, Yokosuka 238-03

#### 1. はじめに

光通信システムは、1970年代の後半から本格的な実用化研究が始まり、わずか10年足らずで日本縦貫のネットワークを形成する超大容量・長距離の基幹伝送方式へと成長した。この急速な進展は、光ファイバの極低損失化や低損失波長領域とマッチした半導体レーザーの開発等、方式要求に応えたキー部品の技術的進歩に負うところが大きく、幾多の技術革新を経て、現在、電話約3万チャンネルを一本の光ファイバで送信できる2.4 Gb/s方式(情報伝送速度: 2.4 ギガビット, 中継間隔: 40~80 km)まで実用化されている。本報告では、光通信システムと近赤外レーザー、特に半導体レーザー技術との係わりについて、実用化の経緯や現在および将来の技術動向を踏まえて各種伝送技術と対比させながらその概要を紹介する。

#### 2. 光通信システムの開発経緯

石英系光ファイバの伝搬損失スペクトルは、図1に示すように最小損失となる波長領域が0.8 μm帯から1.3 μm帯、1.5 μm帯へと歴史的な変遷を遂げている。この経過に従って、光伝送方式の狙いとする波長帯もGaAlAs系の半導体レーザー(LD)や発光ダイオード(LED)に対応した0.85 μmから、いわゆる長波長帯と称するInGaAsP系LDの波長1.31 μm、および1.55 μmへと移ってきた。また、光ファイバも、当初はファイバの接続の容易性を考慮して、2乗屈折率分布でコア径の大きなGI形のマルチモード光ファイバが用いられ

たが、その後の技術革新により、1985年にシングルモード光ファイバ(SMファイバ)を使用した1.3 μm帯のF-400 M方式が実用化された。その後、超高速伝送時のSMファイバの分散の影響を避けるため、単一縦モードで発振する分布帰還型(DFB)-LDを適用してF-400 Mとの伝送距離の互換性を図ったF-1.6 G方式<sup>1)</sup>が商用化され、さらには、零分散波長を1.3 μmから1.55 μmに移した分散シフト(DS)ファイバ<sup>2)</sup>を適用することで、伝送距離のいっそうの拡大を図った1.55 μm帯伝送方式等<sup>3)</sup>が開発された。表1には現在までに実用化されている各種光ファイバ伝送方式の主要諸元をまとめる。これらの方式は全て中継局間を結ぶ長距離の中継系光伝送方式であり、F-6 M方式の20 km系を除いてSMファイバが用いられている。また、使用波長も研究当初の0.8 μm帯から損失の小さい長波長帯に変更されている。なおこの表には掲載しなかったが、1990年末、国際標準の新同期インタフェース(略称SDH: Synchronous Digital Hierarchy)に準拠させた超高速の伝送方式として、2.4 Gb/s新同期光伝送方式<sup>4)</sup>とFS-1.8 G光海底伝送方式<sup>5)</sup>が相次いで事業に導入されている。

ここで、上記伝送方式で要求されるLDの具体的な性能項目とその改善の経過について若干説明する。SMファイバを使用した長距離の光ファイバ伝送システムでは、伝送距離が主にファイバ損失で制限されるため、光ファイバへの結合パワーができるだけ大きく、かつ、安定でなければならない。したがって、LDには高出力特性と併せて安定な基本横モード特性が必須となる。また、ファーフィールドパタンの対称性や小さな広がり角

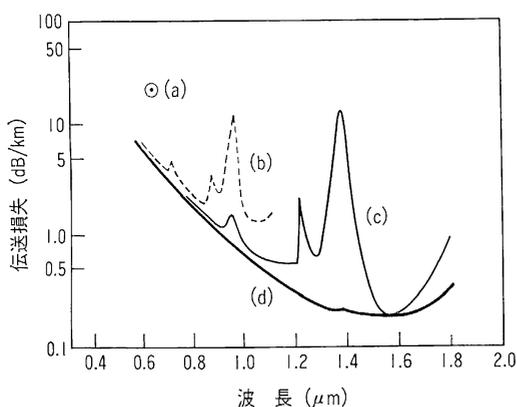


図1 光ファイバの伝送損失の変遷

- (a) 1970年 (OVD)
- (b) 1974年 (MCVD)
- (c) 1979年 (MCVD)
- (d) 1981年 (VAD法: OHフリー光ファイバ)

も望まれる。この要求には屈折率導波路を有する各種の埋め込み形構造の長波長 LD が開発された。さらに、F-1.6 G 方式などの超高速の長距離大容量伝送方式では、高速の変調特性と共に、多縦モード発振に起因するモード分配雑音<sup>6)</sup>による伝送距離制限を回避するため、変調時にもサイドモードが十分に抑圧される単一縦モード特性が要求される。当初、複合共振器構造を利用した C<sup>3</sup> レーザー等の提案もあったが、導波路内に作り付けの回折格子を備えた DFB-LD の方が基本特性や信頼性・安定性の面で優れていることが実証された<sup>7)</sup>。また、

応答特性の改善に対しては、埋め込み部分だけを残すメサエッチ構造を採用して不要な pn 接合部で生じる浮遊容量をできるだけ低減させている。なお、DFB-LD は光接続部 (コネクタ等) からのわずかな戻り光により雑音や発振スペクトルが劣化するため、実用システムでは光アイソレータを内蔵した DFB-LD モジュール<sup>8)</sup>が使用されている。また、海底中継方式に使用される海底中継器には、陸上中継器と比較して、約2桁高い信頼度が要求される。実際のシステムでは、LD 素子単体の信頼度の改善に加えて、偏波結合器を用いた二つの LD 光源の切り替え方式を採用して高い信頼度を確保している。

以上のように、光ファイバ伝送方式の実用化の進展は、各々の時期に設定された方式目標に合わせて、LD 光源等の特性がタイミング良く改善された結果であり、方式サイドとデバイスサイドとの連携プレーが不可欠であることが理解できる。

### 3. 光通信システムの研究状況

光通信システムの研究課題は、高速化、長スパン化、周波数 (波長) 多重化を狙いとした基幹伝送系の進展と、“Fiber to the Home” の標語で表される加入者系の全光化に大別される。これらの領域では実用化のアプローチは異なるものの、光伝送技術としてはそれぞれの用途に共用できる技術も多い。以下には、現在、勢力的に研究されている主要な光ファイバ伝送技術を紹介し、そこで使用されるレーザー光源について技術現状および

表1 中継系光伝送方式の主要諸元

項目	方式				
	F-6 M	F-32 M	F-100 M	F-400 M	F-1.6 G
情報伝送容量	6.312 Mb/s	32.064 Mb/s	97.728 Mb/s	397.200 Mb/s	397.2×4 Mb/s
電話換算伝送容量	96×2 ch	480 ch	1,440 ch	5,760 ch	23,040 ch
波長	1.2/1.3 μm	1.3 μm			1.55 μm
光ファイバ	多モード	単一モード (1.3 μm 零分散)		単一モード (1.55 μm 零分散)	
光源	InGaAsP/InP・FP-LD			InGaAsP/InP・DFB-LD	
受光素子	Ge-APD			InGaAs-APD	
中継間隔	20 km	40 km (1.3 μm)	80 km* (1.55 μm)		

\* 海底区間では 120 km

研究課題についてまとめる。

### 3.1 超高速光伝送技術

#### 3.1.1 強度変調-直接検波方式

強度変調-直接検波(IM-DD)を用いた光伝送方式は簡便で実用的な方式であり、現在、さらに高速化を狙って研究が進められている。これまで、直接変調方式ではMQW形の1.5 $\mu$ m帯DFB-LDとInGaAs-APD受光素子を用いて10Gb/s-100km伝送実験<sup>9)</sup>が報告されている。また、外部変調方式ではLiNbO<sub>3</sub>(LN)光変調器と後述のErドープ光ファイバンプを用いて1.5 $\mu$ m帯で10Gb/s-161kmの伝送実験<sup>10)</sup>、さらには同様の構成で17Gb/s-150kmの伝送実験<sup>11)</sup>が発表されている。これらの伝送実験では、長距離伝送で生じる波形劣化を抑えるため、DSファイバの零分散波長に対応するDFB-LD光源を使用したり、分散値の符号の異なる光ファイバを付加した分散補償<sup>12)</sup>が試みられている。ここで、IM-DD方式の超高速伝送で必要となるレーザー光源まわりの課題について整理してみる。

##### (i) 直接IM変調方式

LDの直接変調時には、キャリア密度の変化で誘起される屈折率の変動により、光周波数がパルス内で変わるチャージングが生じる。この大きさはキャリア密度 $N$ の変化に対する屈折率( $n$ )変化と利得( $g$ )変化の比( $[\partial n/\partial N]/[\partial g/\partial N]$ )で定義される $\alpha$ パラメータ<sup>12)</sup>の値に比例する。通常、バルク形のDFB-LDでは $\alpha=2\sim 7$ である。これより、強度変調時のDFB-LDの光スペクトル幅は電気信号の持つ側帯幅幅に比べて10数倍以上も広がる。なお、 $\alpha$ が小さいとされる前述のMQW形DFB-LDでも現状では10Gb/s変調時のスペクトル幅が7A(90GHz)と依然として大きい。上記の伝送実験では光ファイバの分散値を100km長で37ps/nmと小さく選んでいるのでその影響は見えていないが、分散値のスロープ(0.08ps/km/nm<sup>2</sup>)やばらつきを考慮して2ps/nm/kmまで許容すると、90GHz幅では伝送距離が大きく制限されてしまう。したがって、直接変調用のDFB-LDは、高速性だけでなく低いチャージング特性も要求される。MQW構造はバルク形に比べて緩和振動周波数が高くかつ $\alpha$ パラメータの低減も期待できるので今後の改善が待たれる。

##### (ii) その他の変調方式

チャージングを回避する簡便な方式は文献10, 11)で使われた光変調器の利用である。すなわち、単一スペクトルの光を外部変調器でIM変調して光スペクトル幅を限界まで小さくするものである。現在、性能の面では

電気光学効果を用いたLiNbO<sub>3</sub>方向性結合型光変調器が進んでおり、20GHzの帯域も実現している<sup>13)</sup>。実用的な観点からは、半波長電圧のいっそうの低減とDCバイアスの温度ドリフトや信頼性の向上が必要である。吸収端の電圧依存性を利用したMQW変調器<sup>14)</sup>は小型化、集積化の点で有望視されている。現状では挿入損失や $\alpha$ パラメータが大きい等の欠点があり、これらの解決が望まれる。なお、外部変調方式に使用するレーザー光源は単一縦モードで安定にCW発振すればよく、反射対策を行えば現状のDFB-LDで十分である。

チャープレスのIM変調光を得る方法として、LDを直接位相変調(PM)する方式が検討されている<sup>15)</sup>。これは、 $\pi$ 変調された位相変調光がマッハツェンダ形干渉系でPM-IM変換されることを利用するものである。LDは $\alpha$ パラメータが大きいので、微小な変調電流で $\pi$ 位相変調ができるため、駆動回路の負担を軽減できる。また、高いバイアス条件で使用できるため、緩和振動周波数を大きく設定できる利点がある。原理から明らかなように、この方法では、直接IM変調と異なり、 $\alpha$ パラメータの大きなDFB-LDが有効になる。ただし、LDの周波数応答としては、強度変調用と同様に、平坦性、広帯域性が要求される。この用途には、後述するコヒーレント伝送用の電極分割形DFB-LDが適用できる。

#### 3.1.2 超短光パルス伝送方式

LDのモード同期、または利得スイッチで得られる高速のピコ秒パルス列を利用すると、伝送速度のいっそうの高速化が期待できる。図2にその構成例を示す<sup>16)</sup>。送信側では超短パルス性を利用して、光パルス幅の逆数程度まで時分割多重(MUX)し、受信側では光DEMUXで低速の光信号系に落として電気系の負担を軽減する方式である。また、伝送系は光ファイバの分散制限を避けるため、光ソリトン伝送<sup>17)</sup>、チャープパルス伝送などが利用されよう。現在、LDの4GHzモード同期パルスを用いた4多重の16Gb/s伝送実験<sup>18)</sup>、DFB-LDの利得スイッチパルスを2多重した20Gb/s光ソリトン伝送実験<sup>19)</sup>、さらには伝送基本技術として、光カー効果を利用した50Gb/s速度の全光スイッチ実験<sup>20)</sup>等が報告されている。以下には、超短パルス伝送に必要なレーザー基本技術について紹介し、その課題をまとめる。

##### (i) 超短光パルスの発生技術<sup>16)</sup>

超短パルスの波形をできるだけ崩さずに伝送させるには、IM変調と同様に余分なスペクトル広がりを抑える必要がある。このためにはパルス幅 $\Delta t$ とスペクトル幅 $\Delta\nu$ がフーリエ変換で関係づけられるTL(transform

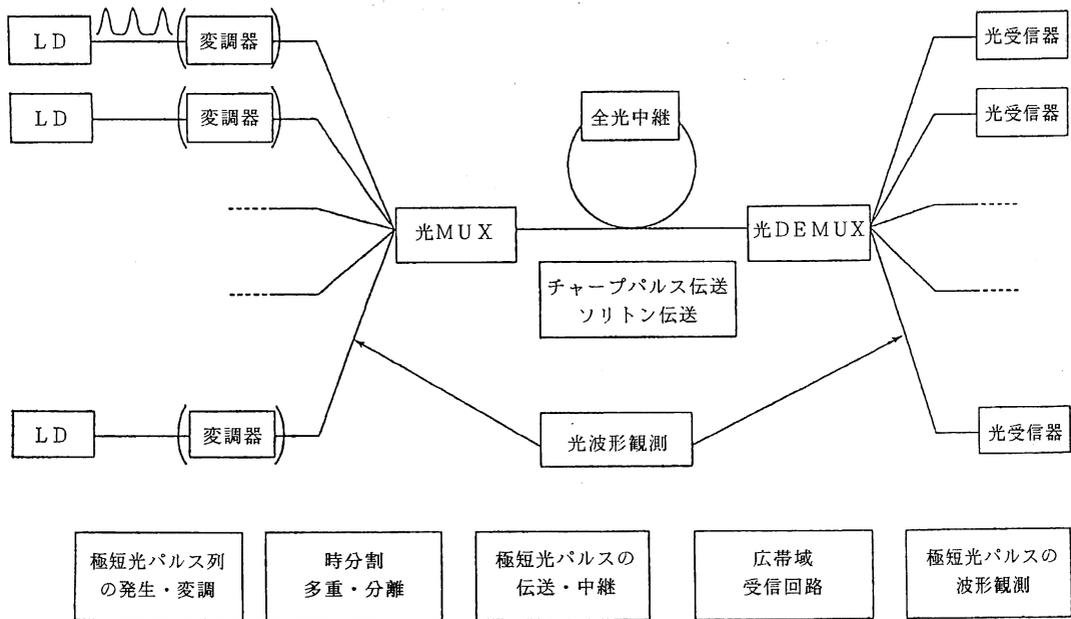


図2 時分割多重・分離技術を適用した光伝送系の構成

limited) パルスの発生が重要である。LDのモード同期法では活性部と導波路部をモノリシックに集積化した長共振器LDを用いて、パルス幅4.4 ps、繰り返し40 GHzの超高速光パルス列が得られている<sup>21)</sup>。ただし、この例では $\Delta\tau \cdot \Delta\nu$ 積が1.8であり、TL条件よりパルス幅が4倍広がった。最近、過飽和吸収部をモノリシックに集積化したMQW-LDを用いて、衝突モード同期法により40 GHz、1.4 ps (口答で80 GHz、830 fs)のTLパルス列( $\Delta\tau \cdot \Delta\nu = 0.3$ )の発生が報告された<sup>22)</sup>。これは最高の繰り返し速度で、しかもTLの条件を満たしているため、今後の応用が期待される。

利得スイッチによる光パルス列の発生法は繰り返し周波数の自由度があり、他の信号系との同期が容易で応用範囲が広い。発生原理はLDを高周波(または短パルス)駆動して過渡応答における緩和振動の第一パルスのみを取り出すものである。TLパルス化はDFB-LDの利得スイッチパルスが時間的に長波長にずれるレッドシフトチャージングを持つことを利用して、正常分散ファイバによるパルス圧縮を用いている<sup>23)</sup>。これにより、12 GHzで6 ps幅のほぼTL条件の高速パルス列が得られている。この技術は、前述の20 Gb/s光ソリトン伝送、光DEMUX、光サンプリング<sup>24)</sup>等に利用されている。今後、さらに高速化、短パルス化をはかるとともに緩和振動周波数の大きなMQW-DFB-LDが望まれる。

## (ii) 時分割多重分離技術

光信号は $2 \times 2$ 光カップラと光ファイバ遅延線などの光受動回路を用いて容易に時分割多重化(MUX)できる。現在、6 ps、3 Gb/sの光パルス列を5段構成で<sup>25)</sup>多重して100 Gb/s相当の固定パターン列も発生させている<sup>25)</sup>。一方、時分割分離(DEMUX)では超高速の光スイッチが必要になる。先の16 Gb/s伝送実験ではLiNbO<sub>3</sub>光スイッチが用いられた。本用途では所望の単一周波数の狭帯域動作で十分であるため、共振型電極構造などの構成が可能である。挿入損失、駆動電圧の低減が待たれる。

光ファイバで生じる光カー効果(光強度に比例して屈折率が増加する現象)はfsの応答を有しているため、これを利用すると光パルス幅で定まる超高速の全光形MUX/DMUXが構成できる。構成法としては、いずれもゲート光パルスを用いて、信号光パルスの偏光を90度スイッチするもの、光ファイバループミラー<sup>26)</sup>の出力ポートをスイッチするものが研究されている。前者では1.06  $\mu\text{m}$ 、または1.32  $\mu\text{m}$  YAGレーザーをゲートパルスに、偏波分散を補償した偏波保存ファイバをカー媒質に用いて、1.3  $\mu\text{m}$ 、2 Gb/sの光パルス列の光DEMUX(スイッチングパワー/ファイバ長: 30 W/20 m)<sup>27)</sup>、さらには50 Gb/sの光DEMUX(3.4 W/150 m)<sup>20)</sup>が報告されている。後者では偏波保存ファイバループを用いて、

5 Gb/s の光 DEMUX (1.8 W/200 m)<sup>28)</sup>, さらには 40 Gb/s の光 DEMUX (0.4 W/3 km)<sup>29)</sup> が発表されている. 特に最後の例では Er ファイバンプを駆使して全て LD で構成されている.

これらの全光形 DEMUX ではスイッチに必要な光パワー  $P$  とファイバ長  $L$  の積は  $360 \text{ W}\cdot\text{m} \sim 1,200 \text{ W}\cdot\text{m}$  となり, 低パワー化には長尺光ファイバが必要で信号光とゲート光のウォークオフ<sup>20)</sup>を考慮しなければならない. また, 現状の構成では信号光の偏波を制御する必要がある. 今後, さらに高速化と全 LD 化による安定な動作を行うためには, 光増幅技術に加えて  $PL$  積や分散の小さな光カー媒質の開発が必要であろう.

### (iii) 光ソリトン伝送技術<sup>17,30)</sup>

光ソリトンは光ファイバ中の光カー効果と波長分散(異常分散)のバランスで生じる非線形な伝搬特性を利用する光パルスである. 特に,  $N=1$  の基本光ソリトンは波形が不変であり, 極めて長尺の光ファイバ伝送が期待される. これを実現するには, 光パルスのピーク値を, パルス幅と分散値で定まる条件内に保つ必要があり, 光ファイバの損失補償, すなわち後述の光直接増幅技術が不可欠になる. 分布増幅形の光ファイバラマン増幅を使用した例では, 利得スイッチ LD パルスと LD 励起ラマン増幅を用いて 5 Gb/s-23 km や 20 Gb/s-70 km の伝送を行い誤り率特性を評価している<sup>19)</sup>. 集中増幅形の Er ファイバ増幅を用いた例では 5 Gb/s-250 km や 10 Gb/s-300 km の多中継伝搬実験<sup>31)</sup>が報告されている. つい最近では, Er ファイバ増幅器を 30 km おきに 4 個配置した光ファイバループを周回させて, 2 Gb/s で 9,000 km 伝送時の誤り率特性と光ソリトンの WDM 2 チャネル伝送の影響も測定されている<sup>32)</sup>.

これらの光ソリトン伝送では光源として DFB-LD の

利得スイッチパルスやモード同期パルスが使用されている. ここでは光ソリトンとなるように TL パルスの条件が不可欠であり, また, 光増幅によるピーク値の調整が必要になる. 光ファイバ伝送路の損失補償も併せて, 光増幅技術の役割が極めて重要になる.

以上, 基幹伝送系の一つの柱である超高速光伝送技術の概要について紹介した. これらの方式では, 後述の光アンプを適用すると光ファイバの損失制限が回避されるので帯域幅  $B$  と伝送距離  $L$  の積が大きくなり, 光ファイバの分散制限が重要なファクタとなる. 光ソリトン伝送はこれを回避する巧妙な方法であるが, いずれにしても光パルスは TL 条件を満たす周波数コヒーレンスを追求しなければならない.

## 3.2 コヒーレント光伝送技術<sup>33)</sup>

コヒーレント光伝送方式は, 光受信感度がショット雑音で制限される理論限界まで低減できるので, 無中継伝送距離の長スパン化技術として研究されている. この方式は変調および復調方式により表 2 のように分類できる<sup>33)</sup>. 表中には受信レベルの相対感度と必要とされる光源の線幅も示した. 以下には現在多くの伝送実験が行われている FSK (周波数変調)-ヘテロダイン検波方式と PSK (位相変調)-ホモダイン検波方式について紹介し, その現状と光源に対する課題をまとめる.

### 3.2.1 FSK 方式

FSK 方式では, DFB-LD が電流で直接 FM (周波数) 変調できるのを利用して, 位相の連続した CPFSK-ヘテロダイン検波方式が研究されている. これは理論的には最も高感度の PSK-ホモダイン方式より 4 dB 劣化するが, 簡便であり線幅に対する要求も比較的緩い. 高速・長距離の伝送実験としては多電極の長共振器 DFB-LD を用いて 2.5 Gb/s で 290 km の無中継伝送実験<sup>34)</sup>,

表 2 各種変復調方式の比較<sup>33)</sup>

変調方式	復調方式	相対受信レベル (光子数/ビット)	相対スペクトル幅 スペクトル幅/伝送レート
PSK	ホモダイン (理想)	0 dB (9)	
	ホモダイン (残留キャリア法)	~1 dB (12)	$6 \times 10^{-6}$
	ヘテロダイン同期検波	~3 dB (18)	$5 \times 10^{-3}$
	ヘテロダイン遅延検波 (DPSK)	~4 dB (23)	$7 \times 10^{-3}$
FSK	ヘテロダイン・デュアルフィルタ	~7 dB (45)	$5 \times 10^{-2}$
CPFSK	ヘテロダイン・遅延検波	~4 dB (23)	$3 \sim 7 \times 10^{-3}$
ASK	ホモダイン	~7 dB (45)	
	ヘテロダイン同期検波	~9 dB (72)	
	ヘテロダイン包絡線検波	~10 dB (90)	$9 \times 10^{-2}$

さらには同様の送受信器に Er ファイバンプの 1 R 光中継器を 25 個用いて 2,200 km の伝送実験<sup>35)</sup>に成功している。受信感度はそれぞれ光子数が 100 個/1 ビット、76 個/ビット (5 m 伝搬長) であり、後者は理論限界に 5.7 dB まで迫っている。また、光ファイバの分散限界を克服する技術として、本方式で可能な IF 帯での遅延等化技術を適用することで、1.55  $\mu\text{m}$  の分散が 16 ps/km/nm と大きな通常光ファイバを用いて 8 Gb/s-202 km の伝送実験<sup>36)</sup>にも成功している。

以上のように、CPFSK 方式は実験的には満足しうるレベルに達しているが、実用上は光源まわりで以下の課題が残されている。信号光および局発光に対する線幅  $\Delta\nu$  は伝送ビット速度を  $B$  とすると  $\Delta\nu/B=0.3\sim 0.7\%$  が要求される。すなわち、2 Gb/s 伝送で 6 MHz 以下が目安である。現状の DFB-LD でも選別すればこの値は満たされるが、長期的な信頼性の確認が必要になる。また、送信用の LD には平坦な FM 変調特性が要求される。LD の FM 変調特性は 100 kHz 以下の低周波部分は熱的効果で、それ以上の高周波部分はキャリアによる屈折率変化が支配している。両者は位相が 180 度異なるため周波数特性にディップが生じるが、現在、熱抵抗の小さな長共振器の多電極 DFB-LD を用いることで平坦な FM 特性が実現されている。ヘテロ (ホモ) ダイナミック検波では局発光に対して光周波数掃引特性と高出力特性が新たに要求される。現在、多電極の MQW-DFB-LD を用いて 210 GHz の広いチューニング幅で 890 kHz 以下の線幅が報告されている<sup>37)</sup>。今後は、スペクトル幅や相対強度雑音 (RIN) も含めて高出力時の信頼性の確保が待たれる。

### 3.2.2 PSK 方式

PSK-ホモダイナミック検波方式は最小受光レベルが光子数 9 個/ビットと最も小さいが、光源に対するコヒーレンス (許容線幅) が  $\Delta\nu/B=6\times 10^{-4}\%$  と厳しいという欠点がある。現在、この方式を使った報告例は 4 Gb/s-167 km 伝送 (光子数 83 個/ビット)<sup>38)</sup>、10 Gb/s-151 km 伝送 (297 個/ビット)<sup>39)</sup>がある。これらの実験は外部共振器により DFB-LD の線幅を狭窄化 (前者では 2.5 kHz) した光源と LN 位相変調器を用いている。受信感度の最良値は送信および局発光源に LD 励起の単一周波数 YAG レーザーを用いた 1.32  $\mu\text{m}$  の 140 Mb/s-28.6 km 伝送実験で 25 個/ビットが報告されている<sup>40)</sup>。これは理論限界まで 4.4 dB に迫った値である。

PSK-ホモダイナミック伝送では上記実験例のように高い時間的コヒーレンスの光源が不可欠であり、現状の半導体

レーザー単体では約 3 桁の開きがある。外部共振器は有効な手段ではあるがその安定性が問題であり、よりいっそうの改善が必要である。コヒーレント伝送系の LD 光源に対する共通の課題は、チップごとに絶対波長がばらつき、しかも温度依存性が大きい (15 GHz/°C) ことである。現状技術ではまだ解決が困難であるが今後の努力に期待したい。なお、LD の代替案として準位間遷移を利用する固体レーザーも候補の一つといえる。固体レーザーは  $\alpha$  パラメータが本質的にゼロであり、1.5  $\mu\text{m}$  帯発振の Er ドープファイバレーザーではリング共振器構造を用いて 1.4 kHz の小さな線幅が報告されている<sup>41)</sup>。

## 3.3 周波数多重化伝送技術

### 3.3.1 光周波数多重 (光 FDM) 伝送方式<sup>39)</sup>

光周波数多重 (光 FDM) 技術は光源の狭いスペクトル幅と光ファイバの広帯域特性を利用して、光周波数の異なる多数の信号光を密に多重し、これを 1 本の光ファイバで伝送するものである。この方式は多重数を増やすことで大容量化ができること、異種の信号系列を同時に伝送して分配できること等の特徴があり、幹線系だけでなく加入者系へも適用できる。以下に、代表的な光 FDM 伝送実験例を紹介する。

多重化された光信号の分波は光分波器を用いる方法と、局発光との混合で特定周波数の電気信号に変換するヘテロ (ホモ) ダイナミック検波法とに分けられる。前者の例として、石英基板上にマッハツェンダ (M-Z) 形フィルタを多段に形成した波長選択形分波器が開発されている。システム実験では、これを用いて 10 GHz の光周波数間隔で 622 Mb/s の信号を 100 チャンネル多重した 50 km 伝送実験が報告された<sup>42)</sup>。送信側では周波数偏位 2 GHz で FSK 変調された DFB-LD の信号光をカップラで多重し、受信側では上記分波器で 1 チャンネル選択した後、M-Z 干渉計で ASK 信号に変換して直接検波している。DFB-LD は中心周波数のドリフトを抑圧するため温度制御を行っている。

ヘテロダイナミック検波法を採用した例では、CPFSK-ヘテロダイナミック検波方式形の 4 チャンネル多重 2.5 Gb/s-150 km 伝送実験が報告された<sup>43)</sup>。チャンネル間隔は複雑な制御系を駆使して 15 GHz  $\pm$  70 MHz に安定化されている。受信部では光 FDM 信号が四つに分岐され、それぞれの受信器で局発光を用いてヘテロダイナミック検波している。

以上、現在報告されている光 FDM 伝送の実験例を紹介したが、現状の LD 光源は、先にも述べたように、光周波数がばらつきしかも安定性が劣るので光周波数の制御系が必要になる。直接検波では 10 GHz 間隔程度

であれば温度制御で対処できるが、コヒーレント方式では複雑な制御系が必要で、現状では大型で高価な装置になってしまう。今後、光周波数の基準発振器、基準周波数の掃引器となり得る小形で安定なレーザー装置の開発が望まれる。

### 3.3.2 サブキャリア多重 (SCM) 伝送方式<sup>44)</sup>

この方式は、映像信号 (アナログ信号) をそのまま電気領域で周波数 (FDM) 多重し、VHF 帯またはマイクロ波キャリアに乗せた FDM 電気信号を光ファイバで伝送させる方式で、CATV 系への適用が期待されている。FDM の方法は FM 変調の映像信号を多重した FM-FDM 方式と残留側帯波振幅変調の VSB 信号を多重した AM-FDM 方式の 2 種類が検討されている。いずれも、光でアナログ信号を伝送させるものであり、それぞれ所要の  $C/N$  (搬送波/雑音) 値と高調波歪特性を満たさなければならない。以下にはこれらの SCM を用いた光伝送実験の経過を紹介しその現状と課題をまとめる。

10 数年前、FP 形 LD と GI ファイバを用いて VHF 帯の映像信号 (AM-FDM) を伝送する光伝送方式が研究された。これは、LD の特性 (直線性、相対強度雑音: RIN) が十分でなく、また GI ファイバのモダルノイズも加わり実用にはならなかった。1988 年秋、広帯域 LD と SM ファイバを使って、FM-FDM 方式による映像 60 チャンネルの光伝送が発表され<sup>44)</sup>、SCM 方式が再び着目された。この方式は AM-FDM に比べてチャンネル間隔が 5 倍以上大きくなるが、所要  $C/N$  値が 16 dB 程度と 26 dB も小さいので LD の RIN 制限を回避できる。したがって、この方式の LD は直線性と高速性が確保できればよい。その後、10 GHz 以上の広帯域 LD を用いて 120 チャンネルの光伝送も行われている。一方、AM-FDM 方式は LD の RIN と直線性に対する要求値が厳しいが同軸 CATV との整合性がよく経済性に優れている。現在、特性の優れた DFB-LD の開発により研究が進展し、多重数では 50 チャンネルまで実現している。

アナログ伝送系の問題点は受光レベルが比較的高いので分配数や伝送距離が取れないことである。最近開発された歪の小さな Er アンプによりこの問題も解決されつつある。例えば、19 チャンネルの AM-FDM 信号または 11 チャンネルの FM-FDM 信号を 6 段の光アンプで増幅してそれぞれ 44.5 dB および 103.1 dB の損失を許容できることが確認できた<sup>45)</sup>。また、SCM 技術は光 FDM とも共用でき、16 個の異波長の 1.5  $\mu\text{m}$  帯 DFB-LD

と利得スペクトル幅を拡大した Er アンプを用いて、10×10 チャンネルの FM-TV 信号と 6 チャンネルの 622 Mb/s デジタル信号を 4,096 加入者に分配するモデル実験も報告されている<sup>46)</sup>。今後、DFB-LD の直線性や RIN 特性のいっそうの改善と、多波長光信号を共通に増幅する光アンプの確立が重要な課題である。

### 3.4 光直接増幅技術

光信号を光のまま増幅できる光直接増幅技術は、LD 励起の Er ドープ光ファイバ増幅器 (Er アンプ) を用いて長距離光伝送実験の成功が報告<sup>47)</sup>されたのを契機に、これまで紹介した各種光通信技術への応用実験が活発化した。これは、光ファイバ通信に必要な増幅条件、①高い利得、②ファイバとの高結合性をも含めた低雑音特性、③入力光信号のパルスパターンや偏波に無依存、④高い飽和出力、等の性質を有するためである。なお、光アンプの種類・特徴と、最近の光伝送応用実験に関する詳細な報告は文献<sup>48)</sup>を参照されたい。ここでは光アンプの用途別に要求される性能をまとめ、Er アンプや LD アンプの技術現状と今後の課題を整理してみる。

#### 3.4.1 プリアンプ

光プリアンプは受光感度の改善を狙いとするもので、理論的には PIN-PD を用いた IM-DD 方式でもショット雑音限界よりわずかに 3 dB 劣化 (光子数 42 個/ビット) に留まる。従来の IM-DD 方式の感度は APD を用いても数千個/ビットであり、コヒーレント系に比較して単純な系で構成できるのでこの効果は極めて大きい<sup>10,11,47)</sup>。プリアンプの主要な要求項目は上記の①、②、③であり、特に低雑音化は必須である。したがって、雑音要因の自然放出光 (ASE) 同士のビート雑音を低減するための狭帯域光フィルタと、光ファイバとの低損失結合がキーポイントになる。また、比例定数である自然放出光係数  $n_{sp} (= N_2 / (N_2 - N_1))$ 、 $N_2$ : レーザー上準位の密度、 $N_1$ : 下準位の密度) を  $n_{sp} \rightarrow 1$  にするための高い励起が必要である。

Er アンプは上記基本特性を満たしており、感度向上の課題は光フィルタの開発と  $n_{sp}$  の低減等である。 $n_{sp}$  は 2 準位系に近い 1.48  $\mu\text{m}$  光励起より、3 準位系の 0.98  $\mu\text{m}$  光励起の方が小さく、実験上でも 0.98  $\mu\text{m}$  LD 励起を用いて 10 Gb/s 伝送で 147 個/ビットまで感度の向上が図られている<sup>49)</sup>。今後、Er アンプの高効率化と共に、0.98  $\mu\text{m}$  励起用 LD 光源の高パワー化、高信頼化が待たれる。一方、電流注入で  $N_2$  を大きくして動作させる LD アンプは  $N_1$  が一定のため本質的に  $n_{sp}$  が大きくなる。また、ファイバとの結合損失も大きいので

現状ではブリアンプには適さない。

### 3.4.2 ポスト (ブースタ) アンプ

本用途は送信側の光出力を増加させて伝送距離の伸長や分配数の増大を図るものである。したがって、送信側の比較的大きな光パワーを増幅するので前記条件④の高い飽和出力が特に望まれる。また、光 FDM 信号などの多波長信号を増幅する場合は広帯域な利得スペクトル幅が、さらにアナログ信号の場合は低い歪特性が求められる。

飽和出力とは、入力光パワーを増加させると、反転分布が多量に消費されるので、その結果、利得が減少して光アンプの出力パワーが制限されるものである。LD アンプではキャリア寿命  $\tau_c$  が 0.1~0.5 ns 程度であり、反転分布 (利得) もこの応答を有する。したがって、 $\tau_c$  より速い光信号成分では利得が応答せず平均パワーレベルによって利得が飽和するが、遅い成分では個々の光パルスのピーク値で飽和が決まる。これより、LD アンプは入力パワーの大きな飽和領域で Gb/s 光信号を増幅するとパタン効果が生じてしまう。また、光アナログ信号に対しては瞬時の光入力レベルに依存する利得により歪が避けられない。一方、Er アンプは上準位の寿命が数十 ms と長いので、反転分布が光変調信号にตอบสนองせず、飽和領域で使用してもパタン効果や波形歪が生じない。これより、Er アンプは高出力のポストアンプとしてほとんど全ての変復調方式で使用できる。現在、Er アンプの二段構成で 100 mW 以上まで送信レベルを増幅した報告もある<sup>50)</sup>。今後は励起光源の負担を軽減するため、より高効率化、高出力化が望まれる。

### 3.4.3 インラインアンプ (1 R 中継器)

これは減衰した光波形を増幅する 1 R (reshaping) の機能を用いて、光信号を多段に 1 R 中継して伝送距離の増大を図るものである。これは光-電気変換系を介して電気領域で 3 R 中継する従来の光中継器に比べて簡易で経済的である。ここで要求される利得や雑音指数は、前記 3.4.1、2 の平均的なものである。したがって、LD アンプでも 1 R 多中継により 5 Gb/s-233 km (5 中継) の長距離伝送実験が実現している。ただし、現状では偏波の制御が不可欠である。ここで、中継距離 (段数) や伝送速度の増大を狙うと、できるだけ高い飽和値と低い雑音特性が必要になる。したがって、トップデータは Er アンプを使用した例であり、10 Gb/s-505 km 伝送 (5 中継) が実現している<sup>51)</sup>。また、インラインアンプはコヒーレント伝送系に使用しても効果が大きく、2.5 Gb/s-2, 220 km の CPFASK 伝送が報告されて

いる<sup>52)</sup>。その他、先に紹介したソリトン伝送などにも適用され、その効果は極めて大きい。

以上のように、Er アンプは広汎なシステム応用実験が展開されており、その多大なメリットは衆目の一致するところである。現在、励起 LD 光源や増幅媒質自身の特性改善も進みつつあり、早期の実用化が期待できよう。LD アンプは現状では Er アンプに押されているが、偏波依存性、飽和出力の改善も進みつつあり、小型化、光集積化、高機能化等の特徴を生かした応用が期待できよう。

## 4. おわりに

以上紹介したように、光通信システムは各種の光伝送技術が出そろい新たな転換期を迎えている。基幹伝送系では、超高速化、長スパン化、超多重化に向けた研究が急速に進展しており、テラビット光ファイバ伝送の到来も現実味を帯びつつある。また、信号分配系では SCM 等を利用したアナログ多重伝送が可能になり、光加入者系への適用も見えてきた。これらの光伝送技術の急速な進展は、一に Er 添加光ファイバを使った高性能な光アンプの出現にあり、これまで光損失で制限を受けていた種々のシステム構成が本技術で解決されるからである。このような状況下では、光信号をどこまで歪や雑音の増加なしに送れるかが課題であり、信号を運ぶ光キャリアには周波数コヒーレンスとしての TL パルス化、時間的コヒーレンスとしての単一周波数化が求められる。また、伝送路の光ファイバは低損失化に加えてよりいっそうの広帯域化が追求されよう。さらに、光波としての 200 THz にも及ぶ超高周波特性の活用を図るため、今後、光ファイバ伝送路にマッチした近赤外領域をカバーするコヒーレントなレーザー発振器の開発が望まれよう。

## 文 献

- 1) 木村英俊, 中川清司: "F-1.6 方式の概要", 通研実報, **36** (1987) 153-160.
- 2) 大橋正治, 桑木伸夫, 田中千速, 上杉 直: "1.5  $\mu\text{m}$  帯零分散ファイバの伝送特性", 通研実報, **36** (1987) 935-941.
- 3) 相田一夫, 中川清司, 根岸幸康: "高性能化 F-400 M 方式", 通研実報, **36** (1987) 315-321.
- 4) 辻 久雄, 坪井利憲, 荒井英哲: "2.4 Gb/s 新同期光伝送方式", NTT 技術ジャーナル, **3** (1991) 72-75.
- 5) 四十木守, 河田 修: "FS-1.8G 光海底伝送方式を開発", NTT 技術ジャーナル, **3** (1991) 76-79.
- 6) 岡野介英, 中川清司, 伊藤 武: "高速光ファイバ伝送における半導体レーザーのモード分配雑音の検討", 電子情報通信学会論文誌, **J 62-B** (1979) 199.

- 7) 本杉常治, 板屋義夫, 吉田淳一, 鈴木正光: “F-1.6方式用光半導体光素子”, 通研実報, **36** (1987) 197-204.
- 8) 猿渡正俊, 河野健治, 萩本和男: “F-1.6方式用光回路”, 通研実報, **36** (1987) 182-195.
- 9) F. Fujita, M. Kitamura, T. Torikai, N. Henmi, H. Yamada, T. Suzaki, I. Takano, K. Komatsu and M. Shikada: “A 10 Gb/s-100 km optical fiber transmission experiment using a high speed MQW DFB-LD and a back-illuminated InGaAs-APD,” Tech. Dig., Picosecond Electronics and Optoelectronics Topical Meeting, Salt Lake City (1989) PD-3.
- 10) K. Hagimoto, Y. Miyagawa, Y. Miyamoto, M. Ohhashi, M. Ohhata, K. Aida and K. Nakagawa: “A 10 Gb/s long-span fiber transmission experiment employing optical amplification technique and monolithic IC technology,” Tech. Dig., Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Kobe(1989)PDA-6.
- 11) K. Hagimoto, Y. Miyamoto, T. Kataoka, K. Kawano and M. Ohhata: “A 17 Gb/s long-span fiber transmission experiment using a low-noise broadband receiver with optical amplification and equalization,” Tech. Dig., Optical Amplifiers and Their Applications, Monterey (1990) TuA 2.
- 12) C. H. Henry: “Theory of the linewidth of semiconductor lasers,” IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 259-264.
- 13) K. Kawano, T. Kitoh, H. Jumoni, T. Nozawa and M. Yanagibashi: “New travelling-wave electrode Mach-Zehnder optical modulator with 20 GHz bandwidth and 4.7 V driving voltage at 1.52  $\mu\text{m}$  wavelength,” Electron. Lett., **25** (1989) 1382-1383.
- 14) K. Wakita, I. Kotaka, O. Mitomi, Y. Kawamura and O. Mikami: “InGaAlAs/InAlAs multiple quantum well optical modulators,” Tech. Dig., Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Kobe (1989) 19C2-2.
- 15) M. Shirasaki, H. Nishimoto, T. Okiyama and T. Touge: “Fiber transmission properties of optical pulses produced through direct phase modulation of DFB laser diode,” Electron. Lett., **24** (1988) 486-488.
- 16) 猿渡正俊: “超高速光パルスの発生・処理技術”, 信学技報, **OQE 88-69** (1988) 37-44.
- 17) A. Hasegawa: “*Optical Soliton in Fibers*,” Springer-Verlag (1989).
- 18) R. S. Tucker, G. Eisenstein, S.K. Korotky, L.L. Buhl, J.J. Veselka, G. Raybon, B.L. Kasper and R. C. Alferness: “16 Gb/s fibre transmission experiment using optical time-division multiplexing,” Electron. Lett., **23** (1987) 1270-1271.
- 19) K. Iwatsuki, K. Suzuki, S. Nishi, M. Saruwatari and K. Nakagawa: “20 Gb/s optical soliton data transmission over 70 km using distributed fiber amplifiers,” IEEE Photonics Tech. Lett., **2** (1990) 905-907.
- 20) T. Morioka, M. Tsukada and M. Saruwatari: “Demonstration of 50 Gb/s all-optical Kerr demultiplexing utilizing pump-probe pulse walk-off in optical fibers,” Tech. Dig., Photonics Switching, Kobe (1990) 14D-9 (PD).
- 21) R. S. Tucker, U. Koreny, G. Raybon, C. A. Burrus, B. I. Miller, T. L. Koch, G. Eisenstein and A. Shahar: “40-GHz active mode-locking in a monolithic-cavity laser,” Tech. Dig., Semiconductor Laser Conference (1988) PD 5.1-2.
- 22) M. C. Wu, Y. K. Chen, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, M. A. Chin and G. Raybon: “Colliding pulse mode-locked quantum-well lasers on a single chip,” Tech. Dig., Semiconductor Laser Conference, Davos (1991) I-5.
- 23) A. Takada, T. Sugie and M. Saruwatari: “High-speed picosecond optical pulse compression from gain-switched 1.3  $\mu\text{m}$  distributed feedback-laser diode (DFB-LD) through highly dispersive single-mode fiber,” IEEE J. Lightwave Technol., **LT-5** (1987) 1525-1533.
- 24) Y. Yamabayashi, A. Takada and M. Saruwatari: “Picosecond optical sampling with LiNbO<sub>3</sub> waveguide and compressed laser diode pulses,” Tech. Dig., Integrated and Guided-wave Optics, Santa Fe (1988) WD 5.
- 25) A. Takada and M. Saruwatari: “100 Gb/s optical signal generation by time-division multiplication of modulated and compressed pulses from gain-switched distributed feedback (DFB) laser diode,” Electron. Lett., **24** (1988) 1406-1407.
- 26) K. J. Blow, N. J. Doran and B. K. Nayar: “Experimental demonstration of optical soliton switching in an all-fiber nonlinear Sagnac interferometer,” Opt. Lett., **14** (1989) 754-756.
- 27) T. Morioka and M. Saruwatari: “Ultrafast all-optical switching utilizing the optical Kerr effect in polarization-maintaining single-mode fibers,” IEEE J. Select. Areas Commun., **6** (1988) 1186-1198.
- 28) M. Jinno and T. Matsumoto: “Ultrafast, low power, and highly stable all-optical switching in an all polarization maintaining fiber Sagnac interferometer,” IEEE Photonics Tech. Lett., **2** (1990) 349-351.
- 29) A. Takada, K. Aida and M. Jinno: “Demultiplexing of 40 Gb/s optical signal to 2.5 Gb/s using a nonlinear fiber loop mirror driven by amplified, gain-switched laser diode pulses,” Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Diego (1991) TuN3.
- 30) 中川清司, 中沢正隆: “ファイバ中の光ソリトン通信研究動向”, 信学誌, **73** (1990) 1336-1343.
- 31) M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada and Y. Kimura: “Distortion-free single-pass soliton communication over 250 km using multiple Er<sup>3+</sup>-doped optical repeaters,” Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 5.
- 32) N. A. Olsson, P. A. Andrekson, J. R. Simpson, T. Tanbun-Ek, R. A. Rogan and K. W. Wecht: “Two-channel soliton pulse propagation over 9000 km with 10<sup>-9</sup> bit-error rate,” Tech. Dig., Optical Fiber Communication Conference, San Diego (1991) PD1.
- 33) 島田禎晋: “コヒーレント光通信”, 電子情報通信学会 (1988).
- 34) Y. Ichihashi, T. Imai, N. Ohkawa, T. Sugie and T. Ito: “100 photon/bit sensitivity in a 290 km $\times$ 2.5 Gb/s CPPSK heterodyne detection system,” Tech. Dig., Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Kobe (1989) 20 PDA-12.
- 35) S. Saito, T. Imai, T. Sugie, O. Ohkawa, Y. Ichihashi and T. Ito: “An over 2200 km coherent transmis-

- sion experiment at 2.5 Gbit/s using erbium-doped-fiber amplifiers," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 2.
- 36) N. Takachio, K. Iwashita, K. Nakanishi and S. Koike: "Chromatic dispersion equalization in an 8 Gbit/s 202 km optical CPFSK transmission experiment," Tech. Dig., Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Kobe (1989) 20 PDA-13.
- 37) Y. Kotaki, T. Fujii, M. Matsuda and H. Ishikawa: "Narrow linewidth and wavelength tunable multiple quantum well  $\lambda/4$  shifted distributed feedback laser," Tech. Dig., Conference of Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) THE 3.
- 38) J.M. Kahn, A.H. Gnauck, J.J. Veselka, S.K. Korotky and B.L. Kasper: "4 Gbit/s PSK homodyne transmission system using phase-locked semiconductor lasers," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 10.
- 39) S. Norimatsu, K. Iwashita and K. Noguchi: "10 Gbit/s optical PSK homodyne transmission experiments using external cavity DFB LDs," Electron. Lett., **26** (1990) 648-649.
- 40) L.G. Kazovsky and D.A. Atlas: "PSK synchronous heterodyne and homodyne experiments using optical phase-locked loops," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 11.
- 41) K. Iwatsuki, H. Okamura and M. Saruwatari: "Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring-laser with 1.4 kHz linewidth," Electron. Lett., **26** (1990) 2033-2035.
- 42) H. Toba, K. Oda, K. Nakanishi, N. Shibata, K. Nosu, N. Takato and M. Fukuda: "100-channel optical FDM transmission/distribution at 622 Mb/s over 50 km," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 1.
- 43) S. Yamazaki, T. Ono, H. Shimizu, M. Kitamura and K. Emura: "2.5 Gb/s CPFSK coherent multi-channel transmission experiment toward over 100 Gb/s communication system," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 12.
- 44) R. Olshansky: "RF multiplexing techniques applied to video distribution in local networks," Tech. Dig., 13th European Conference on Optical Communication, Helsinki, **2** (1987) 122-125.
- 45) K. Kikushima, E. Yoneda and K. Aoyama: "6-stage cascade Erbium fiber amplifiers for analog AM- and FM-FDM video distribution systems," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 22.
- 46) W.I. Way, S.S. Wagner, M.M. Choy, C. Lin, R.C. Menendez, H. Tohme, A. Yi-Yan, A.C. Von Lehman, R.E. Spicer, M. Andrejco, M.A. Saifi and H.L. Lemberg: "Distribution of 100 FM-TV channels and six 622 Mb/s channels to 4096 terminals using High-density WDM and a broadband in-line Erbium-doped fiber amplifier," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 21.
- 47) K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, K. Nakagawa and M. Horiguchi: "A 212 km non-repeated transmission experiment at 1.8 Gb/s using LD pumped Er<sup>3+</sup>-doped fiber amplifiers in an IM/direct-detection repeater system," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, Houston (1989) PD-15.
- 48) 猿渡正俊: "光増幅器の通信への応用と課題", 信学技報, **OQE 90-73** (1990) 19-24.
- 49) T. Saito, Y. Sunohara, K. Fukagami, S. Ishihara, N. Henmi, S. Fujita and Y. Aoki: "High receiver sensitivity at 10 Gb/s using Er-doped fiber preamplifier pumped with a 0.98  $\mu\text{m}$  laser-diode," Tech. Dig., Optical Fiber Communication Conference, San Diego (1991) PD 14.
- 50) T. Sugie, N. Ohkawa, T. Imai and T. Ito: "A 2.5 Gb/s, 364 km CPFSK repeaterless transmission experiment employing an Er-doped fiber amplifier and SBS suppression optical link," Tech. Dig., Optical Amplifiers and Their Applications, Monterey (1990) PDP 2.
- 51) K. Nakagawa: "Optical amplifiers for trunk and distribution network," Tech. Dig., Optical Amplifiers and Their Applications, Monterey (1990) TuA 1.
- 52) S. Saito, T. Imai, T. Sugie, N. Ohkawa, Y. Ichihashi and T. Ito: "An over 2200 km coherent transmission experiment at 2.5 Gb/s using Erbium-doped-fiber-amplifiers," Tech. Dig., Conference on Optical Fiber Communication, San Francisco (1990) PD 2.