



光通信システムと光増幅

中川 清司・川西 悟基

NTT 伝送システム研究所 〒238 横須賀市武 1-2356

(1989年1月31日受理)

Optical Amplification Techniques in Optical Communications Systems

Kiyoshi NAKAGAWA and Satoki KAWANISHI

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

1. はじめに

現在実用化されている光ファイバ通信システムにおいては、光ファイバの損失による光信号の減衰を補償するために、一定距離ごとに光信号を電気信号に変換して電気増幅回路によって信号を増幅したのち光信号に変換し、光ファイバ伝送路中に再び送り出すという構成になっている。もしこの光信号を低雑音で直接増幅することができれば光中継器の小型化、経済化を図ることができるだけでなく、光分岐などの光損失を簡易な構成で補償することが可能であり、より高度な光通信システムの構築が可能であると考えられる。

光増幅の基礎となる誘導放出効果は、1954年に Townes らによって初めて発振に成功したマイクロ波領域の増幅器(メーザー)によって確認され¹⁾、次いでレーザーの発振成功に伴い光増幅器の研究も進められてきた。半導体レーザー(LD)系の光増幅器においては、LDの発明の直後から研究が開始されたが、実用に向けての本格的な研究が活発化したのは1980年以降である。LDの特性の改善に伴ってまずファブリー・ペロー型LD増幅器、次いで進行波型LD増幅器が研究された²⁻⁴⁾。一方、ファイバ増幅器においても、光ファイバ技術の発展に伴い、ファイバラマン増幅器^{5,6)}、ブリュアン増幅器⁷⁻⁹⁾を用いた光伝送実験が進められ、さらに最近では希土類ドープファイバの研究¹⁰⁾が活発化している。

本稿では、光増幅器の基本的な雑音特性から始めて、光通信システムに光増幅器を用いる場合の構成法および

各構成における光伝送実験例を報告するとともに、今後の課題等についても紹介する。

2. 光直接増幅系雑音特性

光増幅器は、基本的には増幅性媒質中を光波が進行するときに生ずる誘導増幅を利用するものである。光通信システムにおいて光増幅器を用いようとする場合にとくに重要なのはその雑音特性である。ここでは、光増幅器の雑音特性および光伝送系におけるS/Nについて論ずることとする。

2.1 光増幅器の雑音指数

光増幅器の信号・雑音特性は、霜田らによって用いられたマスタ方程式¹¹⁾を用いて、光増幅器の出力光中の光子数の平均 $\langle N \rangle$ および分散 σ^2 を算出することによって明らかにすることができる。

まず、増幅される波束に n 個の光子が存在する状態 $|n\rangle$ の確率を $P_n(t)$ 、自然放出の確率を a 、誘導吸収の光子1個当りの確率を b とすると自然放出、誘導放出、および吸収による光子数の変化に対するマスタ方程式は次式で表わされる。

$$\frac{d P_n}{d t} = -\{a(n+1)+bn\} P_n + anP_{n-1} + b(n+1)P_{n+1} \quad (1)$$

(1)式から、光子数の平均値 $\langle n \rangle$ 、自乗平均値 $\langle n^2 \rangle$ について、次式のように表わされる¹²⁾。

$$\langle n \rangle = \langle n_0 \rangle \exp \{ (a-b)t \} + \frac{a}{a-b} [\exp \{ (a-b)t \} - 1] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 &= \langle n_0 \rangle \exp \{ (a-b)t \} + \frac{a}{a-b} \{ \exp \{ (a-b)t - 1 \} \\ &+ 2 \frac{a}{a-b} [\exp \{ (a-b)t \} - 1] \exp \{ (a-b)t \} \langle n_0 \rangle \\ &+ \left(\frac{a}{a-b} \right)^2 [\exp \{ (a-b)t \} - 1]^2 \\ &+ \exp \{ 2(a-b)t \} \{ \langle n_0^2 \rangle - \langle n_0 \rangle^2 - \langle n_0 \rangle \} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに $\langle n_0 \rangle$, $\langle n_0^2 \rangle$ は, $t=0$ での $\langle n \rangle$, $\langle n^2 \rangle$ の値である.

(2), (3) 式より光増幅器出力端における光子数の平均 $\langle N \rangle$ および分散 σ^2 を求めると次式のように表わされる.

$$\begin{aligned} \langle N \rangle &= G \langle N_0 \rangle + (G-1) n_{sp} \Delta f \quad (4) \\ \sigma^2 &= G \langle N_0 \rangle + (G-1) n_{sp} \Delta f + 2 \langle N_0 \rangle G (G-1) n_{sp} \\ &+ (G-1)^2 n_{sp}^2 \Delta f + G^2 \{ \langle N_0^2 \rangle - \langle N_0 \rangle^2 - \langle N_0 \rangle \} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, $\langle N_0 \rangle$: 光増幅器に入射する光子数の平均値, G : 増幅器の利得 ($\infty \exp \{ (a-b)t \}$), n_{sp} : 自然放出光係数 ($= a/(a-b)$), Δf : 光フィルタの帯域である.

(4) 式の第 1 項, 第 2 項はそれぞれ, 増幅された信号光, 自然放出光を表わしている. また, (5) 式の第 1 項から第 5 項まではおのおの信号光ショット雑音, 自然放出光ショット雑音, 信号光-自然放出光ビート雑音, 自然放出光間ビート雑音および入射光過剰雑音を表わしている. 入射光がポアソン統計に従うコヒーレント光の場合, (5) 式第 5 項は 0 となる.

これから, コヒーレント光入力に対する光増幅器の雑音指数 F は次のように表わされる.

$$\begin{aligned} F &\equiv \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} \\ &= \frac{1}{G} + \frac{G-1}{G^2 \langle N_0 \rangle} n_{sp} \Delta f + 2 \left(\frac{G-1}{G} \right) n_{sp} + \frac{(G-1)^2}{G^2 \langle N_0 \rangle} n_{sp}^2 \Delta f \\ &\approx 2 n_{sp} + n_{sp}^2 \Delta f / \langle N_0 \rangle \quad (G \gg 1) \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式の第 1 項は, 信号光-自然放出ビート雑音, 第 2 項は自然放出光間ビート雑音に起因している. (6) 式第 1 項は, 信号光が存在する限り発生する雑音であるのに対して, 第 2 項は光学フィルタの使用等により低減可能である. 第 2 項が第 1 項に比べて無視できる程度まで低減された場合が光増幅器の雑音の理論限界であり, その値は 3 dB となる.

2.2 光伝送路と雑音特性

光増幅器からの出力光が, 光ファイバなど損失を含む光伝送路を伝播した場合の S/N について考えてみる.

この場合の光子数の平均 $\langle N \rangle'$ および分散 σ'^2 は次の

ように表わされる.

$$\begin{aligned} \langle N \rangle' &= LG \langle N_0 \rangle + L(G-1) n_{sp} \Delta f \quad (7) \\ \sigma'^2 &= L \{ G \langle N_0 \rangle + (G-1) n_{sp} \Delta f \} \\ &+ L^2 \{ 2G(G-1) n_{sp} \langle N_0 \rangle + (G-1)^2 n_{sp}^2 \Delta f \} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに L は光伝送路伝播後の光強度の減衰の割合 ($0 < L < 1$) である. (7) 式は平均光子数が損失 L で減衰することを表わし, (8) 式は光伝送路に入射した雑音のうち信号光ショット雑音は L で減衰し, ビート雑音に相当する過剰雑音は L^2 で減衰を受けることを示している.

光ファイバの出射端で受光したときの S/N は, 次式で表わされる.

$$\begin{aligned} S/N &= (LG \langle N_0 \rangle)^2 / 2 \{ LG \langle N_0 \rangle M^2 / (\eta_1 \eta_2) \\ &+ 2L^2 G(G-1) n_{sp} \langle N_0 \rangle / \eta_1 \\ &+ 2kTF_e / (R_L e^2 \eta_1^2 \eta_2^2 M^2) \} B \end{aligned} \quad (9)$$

ここに, M は APD の増倍係数, x は APD の過剰雑音指数, η_1 は光増幅器の入射結合効率, η_2 は APD の入射結合効率と量子効率の積, k はボルツマン定数, T は絶対温度, F_e は電気増幅器の雑音指数, R_L は負荷抵抗, e は電気素量, B は受光系の帯域である. ただし, 自然放出光間の雑音は光フィルタの帯域 Δf を小さくすることで低減できるとして無視した.

光増幅器の出力光が十分強いときに, この(9)式の関係を光ファイバ長を横軸に, S/N を縦軸にとって示したものが, 図 1 である¹³⁾. 図中破線は光増幅器の出力をファイバに入力した場合, 実線はレーザー光を直接ファイバに入力した場合を示している. S/N のファイバ長依存性は次の三つの領域に分けて考えられる.

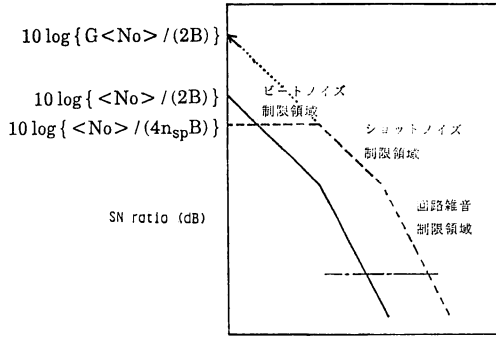
(1) ビート雑音制限領域: 2.1 項で述べたように, 光増幅器の雑音指数の理論限界は(9)式分母第 2 項に示される信号項-自然放出項ビート雑音によって決まる 3 dB であり, 光増幅器の出力端すなわちファイバ入力端における S/N は 3 dB 劣化する. 本領域では S/N は, (9)式から L によらず一定である.

(2) ショット雑音制限領域: ファイバ長が長くなると, L が小さくなって(9)式分母第 1 項のショット雑音が支配的となる. 本領域では S/N は光損失 L に比例する.

(3) 回路雑音制限領域: さらにファイバ長が長くなると(9)式分母第 3 項に示す受光系電気系の回路雑音が支配的となる. 本領域では S/N は L^2 に比例する.

以上から, 光増幅器を光通信システムに用いる際には, 次の点に注意する必要がある.

1) 光増幅器を前置増幅器として用いた場合には, 光



ファイバ伝搬距離 (光強度減衰度)

図1 光損失(ファイバ伝播距離)とS/Nの関係¹³⁾
 -----: 光増幅器出力光が伝播した場合, ———: レーザー光が伝播した場合

増幅器出力の信号光の S/N は少なくとも 3 dB ショット雑音限界よりも劣化するため、受光系にショット雑音限界に近い感度を有するコヒーレント受光器を用いた場合、受光感度は改善されない。光前置増幅器として有用なのは、超広帯域受光系などにおいて、必要な帯域を確保するために回路が低インピーダンスとなって回路雑音のレベルが高くなっている場合である。光増幅器には進

行波型 LD 増幅器など非常に広帯域な利得幅を有しているものがあり、このような光増幅器を用いれば超広帯域受光系の帯域特性を損なうことなく光前置増幅系を構成することが可能である。

2) 光増幅器の出力をファイバに入射して、信号光が損失を受けてショット雑音制限領域に達したときの S/N は、ちょうど無雑音の光増幅器によって増幅された信号光がファイバを伝播したときの S/N と同じとなる。したがって、光増幅器を中継増幅器として用いた場合には、伝送スパンの拡大を図ることが可能である。

3. 光増幅器の光通信システムへの応用

3.1 光増幅器の特性と光通信システムへの適用形態

現在研究が進められている光増幅器の主なものについて、その特性を表1に、また光増幅器が有する特性を利用した光通信システムへの適用例を図2に示す。以下各領域について述べていくことにする。

3.2 光直接増幅伝送系の構成

図3に、光増幅器を用いた光伝送システムの主な構成を示す。図3(a)は、光増幅器を受光回路の前置増幅器回路として用いて、受信感度の改善を図る構成である。

表1 各種光増幅器の特性

	LD 増幅器 (進行波型)	LD 増幅器 (共振器型)	ファイバ・ラマン 増幅器	ブリルアン増幅器	Er ³⁺ ドープ ファイバ増幅器
小信号利得 (dB)	25~35	20~30	~50	~50	~30
飽和出力 (dBm)	~10	~-5	~30(最大出力)	—	~10(最大出力)
周波数帯域 (GHz)	~1000	1~3	~1000	0.01~0.1	~1000
雑音指数 (dB) ()は実測値	3 (5.2)	3(10.7)	3	3	3
ポンプ光強度 (W) (ファイバ長 1 m, 20 dB Gain)	—	—	2×10 ⁵	50	1.6×10 ⁻²
文献	2~4)	2)	5, 6)	7, 8, 14)	10, 15)

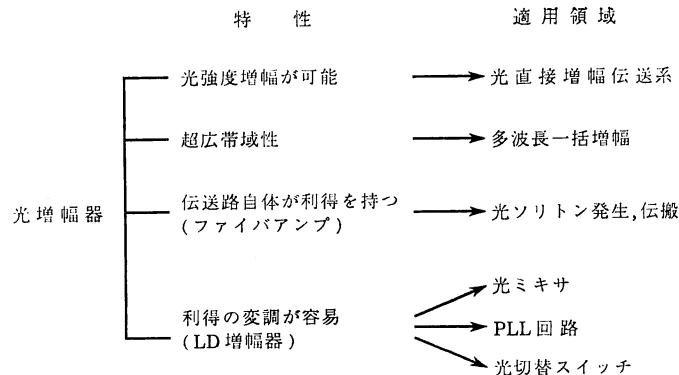


図2 光増幅器の特性と光通信システムでの適用領域

図3(b)は、光増幅器を線形の増幅中継器として用いる構成である。本構成を用いれば、現在光伝送系の中継器で用いられているような光-電気、電気-光変換系や、電気信号処理回路など複雑、高価な構成が不要になり、中継器の経済化・小型化を図ることができる。これと同時に、2.2項で述べたように中継増幅系においては、ビート雑音が損失を受けることによってすみやかに減衰するため、光増幅器は見かけ上無雑音の増幅器として動作する。したがって光増幅器を中継増幅系に使用することによってデジタル再生中継間隔の拡大が可能となる。図3(c)は、光増幅器を光ブースタ増幅器として用いて、送信光出力の増幅を行ったり種々の光回路の素子挿入損失や光分岐損失を補償する構成である。

表2には、各光直接増幅伝送系で用いられる光増幅器に要求される条件を示した。光前置増幅および光中継増幅系は入射する光のレベルが低いため、信号利得が大きい増幅器が望ましいのに対して、ブースタ増幅系におい

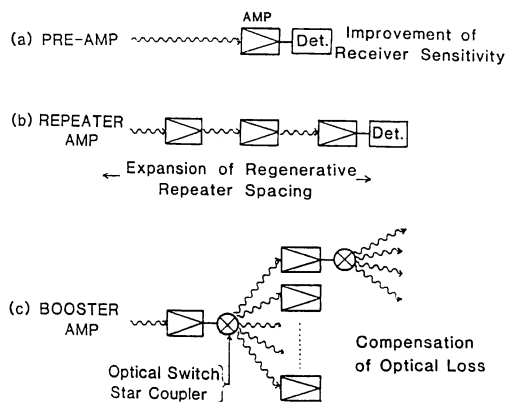


図3 光直接増幅伝送系の構成¹²⁾

表2 各光直接増幅伝送系の光増幅器に対する要求条件

	前置増幅系	中継増幅系	ブースタ増幅系
信号利得	高利得 (~ 20 dB以上)	~ 10 dB以上	~ 10 dB以上
飽和出力	~ -10 dBm	~ -10 dBm	高飽和出力 (~ 20 dBm)
光学フィルタの要・不要	自然放音(5式)を低減するため光学フィルタを用いる必要がある。	光学フィルタは不要	光学フィルタは不要

てはとくに送信側に用いられる場合、増幅器の入射レベルが大きいため飽和出力レベルが大きくなる。また、光前置増幅系については、自然放音間雑音を低減するために狭帯域光学フィルタを併用する必要がある。また、(9)式に示したように、光増幅器の結合効率(η_1)は、直接 S/N に影響する。したがって、とくに入射光のレベルが低い光前置増幅系、光中継増幅系では η_1 は、できるだけ大きいほうが望ましい。以下、図3に示した各構成についての研究の現況を述べていくことにする。

3.2.1 光前置増幅系

光前置増幅系においては、LD増幅器、ファイバラマン増幅器、希土類ドープファイバ増幅器などを用いて、伝送実験が行なわれている。LD増幅器としては、当初は共振器型のもが用いられていたが、無反射コート技術の進歩、狭帯域(~ 3 nm以下)の光学フィルタ技術の進歩などによって、進行波型増幅器が利得、雑音特性の面で有利となり、現在は進行波型が用いられている。

最近の主な報告を表3に示す。表には次項に述べる光中継増幅系の報告も併せて示してある。

3.2.2 光中継増幅系

2.2項で述べたように、光増幅器による光中継増幅系によって、デジタル再生中継スパンの拡大が期待でき、複数の光増幅器を用いて多中継伝送実験が数多く報告されている。使用される光増幅器は、小型で比較的利得が大きい進行波型LD増幅器が主として用いられている。また、進行波型LD増幅器と同程度の利得が得られ、LDの出力光でポンピング可能であり、さらに、進行波型LD増幅器に比べて結合損失を容易に小さくすることが可能な希土類ドープファイバ増幅器を用いた研究も今後盛んになると考えられる。

3.2.3 光ブースタ増幅器

光ブースタ増幅系においては、光源出射直後の強い入射光の増幅を行なう場合、光増幅器には高い飽和出力レベルが要求される。光増幅器としては飽和出力レベルの高いファイバラマン増幅器を用いた伝送実験が報告されている²³⁾。この例では、図4に示すようにファイバラマン増幅器の入射側(B)と、出射側(A)の、どちらかに光減衰器を入れることによって、前置増幅器とブースタ増幅器の切替えを行なって両者の実験を行なっている。

また、光ブースタ増幅器を用いて、スターカップラなどの光分岐損失や挿入損失を補償する系についても、光加入者系への応用などを念頭において研究が進められている^{27,28)}。図5は、進行波型LD増幅器を用いて光分

表3 光直接増幅系伝送実験の報告

光増幅器	波長(μm)	受光系	信号利得(dB)	受光感度 光増幅器なし/あり	伝送速度(Mbit/s)	備考	文献
FP-LD	0.85	Si-APD	30	-40/-48	100		2)
FP-LD	1.5	PIN/FET	17	-33/-45.6	500		16)
TW-LD	1.5	PIN/50Ω amp	17	-20/-35 -18/-32	2000 2000		17) 18)
TW-LD	1.5	InGaAs-APD	15	-29.5/-29.5	2000		19)
TW-LD	1.5	PIN/FET	26/2 中継	-/-42	140	ファイバ長 206 km	20)
TW-LD	1.5	PIN	43.7/4 中継	-/-48.5	400	FSK ファイバ 372 km	21)
TW-LD	1.5	PIN	40.9/4 中継	-/-29.1	1000	ファイバ 313 km	22)
ファイバラマン (3.5 km)	1.4 (信号光) 1.32 (YAG, 0.9 W)	Ge-APD	14	-43.5/-42.5	100		23)
ファイバラマン (45 km)	1.57 (信号光) 1.47 (YAG, 100 mW)	APD	5.8	-/-34.5	1000		24)
ファイバラマン (80 km)	1.56 (信号光) 1.46 (LD, 90 mW)	APD	7.5	-36/-41 (直接検波) -33.5/-41 (ヘテロダイン)	1200 565		25)
ファイバブリル アン(3.5 km)	0.8 (信号光) 0.8 (LD, 12 mW)	Si-APD	30	-/-48	250		9)
Er ³⁺ ドープ ファイバアン (5 m)	1.54 (信号光) 0.8 (dye, 20 mW)	PIN/FET	8	-33/-33	140		26)
Er ³⁺ ドープ ファイバアン (60 m)	1.552(信号光) 1.48 (LD, 40 mW)	APD	20	-32/-36.2	1800	ファイバ 212 km	43)

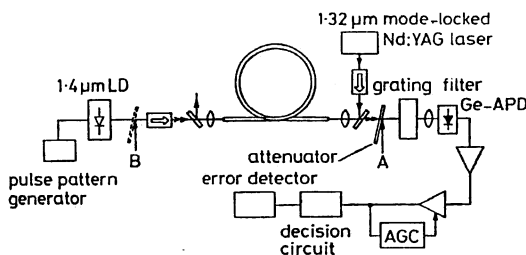


図4 ファイバラマン増幅伝送実験系²³⁾

A点に光アテネータ挿入: 光ブースタ増幅系, B点に光アテネータ挿入: 光前置増幅系

岐回路の損失補償を行なっている例で, 挿入されている光分波器など光部品の損失は全体で 39.7 dB である。

光伝送系の途中に光増幅器を2台配置することによって 24 dB の利得を得ており, レーザー出力パワーが 1 mW 程度でも受信側で PIN-PD で受光可能な入力光パワーが確保されている。本実験では, 電氣的に多重化した 90 チャンネルの FM ビデオ信号で LD を変調し, 光分岐によって 2048 端末に信号の分配を行なっている。

3.3 多波長一括増幅

進行波型 LD 増幅器, ファイバラマン増幅器, 希土類ドープファイバ増幅器などは, 利得帯域が 1 THz 程度と非常に広帯域であるため, 波長多重した光信号を一括して増幅することが可能であり, 6 GHz おきに配置された 10 チャンネルの信号光を進行波型増幅器を用いて, 一括して増幅した実験の報告もされている²⁹⁾。しかしながら, このように FDM 伝送系において LD 光増幅器を多波長一括増幅系として用いた場合には, 増幅器の利得飽和歪によって生じるクロストーク³⁰⁻³²⁾ および複数の入射光によって生じる 4 光子混合によるクロストーク^{33,34)}が伝送特性を劣化させる恐れがあり, システム設計にあたっては, 入射光のレベルやチャンネル間隔などに注意を払う必要がある。

3.4 光ソリトン発生, 伝播

光ソリトン伝送系においては, 比較的高出力の光パルスが必要とされる³⁵⁾。したがって, 半導体レーザーなど比較的低出力の光源からの出力光パルスを増幅してソリトン発生条件を満足するため³⁶⁾や, 光ファイバの損失を補償するため³⁷⁾に光増幅器が用いられる。光増幅器とし

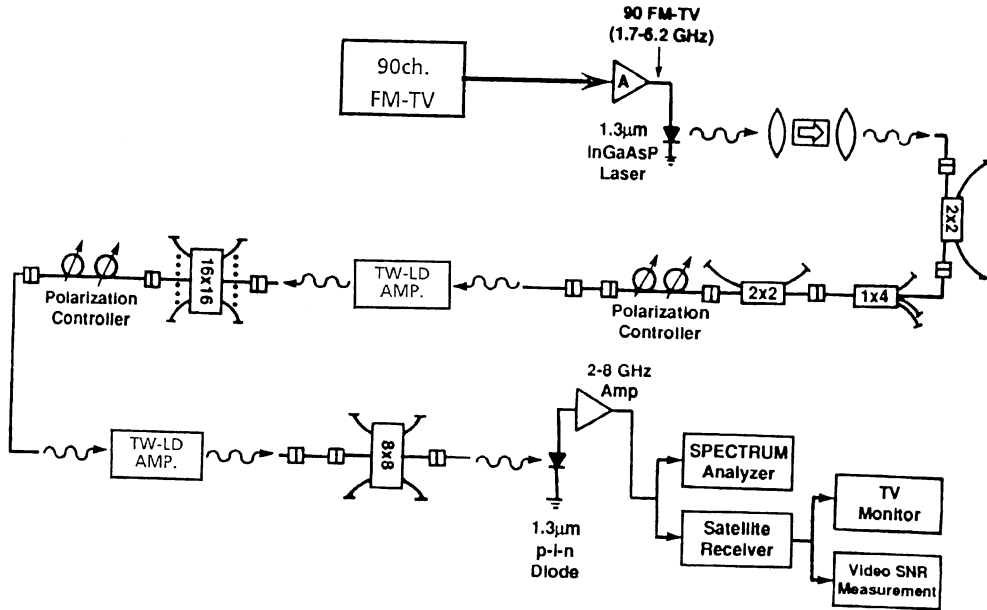


図 5 光ブスタ増幅器による 2048 チャンネル光分岐実験²⁸⁾

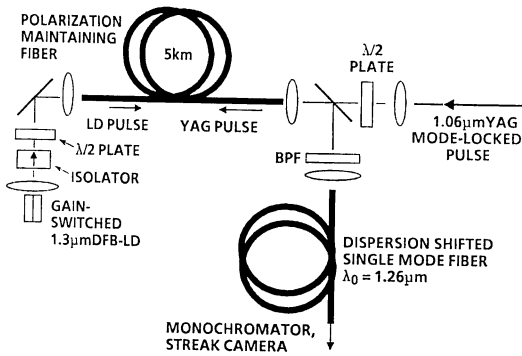


図 6 LD とファイバラマン増幅器を用いた光ソリトン発生実験³⁶⁾

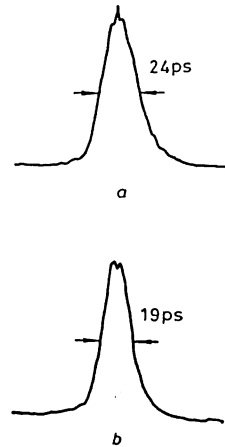


図 7 入射光パルスの強度と光パルス幅の関係³⁶⁾
(a)入射光ピークパワー: 2.9 mW, (b)入射光ピークパワー: 76 mW

では、飽和出力、帯域などの条件から主としてファイバラマン増幅器が用いられている。図 6 は、半導体レーザーから繰り返し 3 GHz の光パルス列を発生させて、ファイバラマン増幅器で増幅した光パルスを分散シフトファイバに入射してソリトンが発生する系である。光増幅器の利得を上げて光パルスのピークパワーを上げていくに従い、分散シフトファイバからの出力パルス幅は入射光パルス幅 (17 ps) に近づき (図 7 (b)), ソリトンの条件がほぼ実現されている。

3.5 光ミキサー

光増幅器において、増幅器の利得に変調を加えることにより入射光信号と利得変調信号のミキシングを行なうことができる^{38,39)}。

入射光信号強度 $L(t)$ と変調された利得 $G(t)$ は次のように表わされる。

$$L(t) = L_0 [1 + \alpha \cos \{2\pi f_s t + \phi(t)\}] \quad (10)$$

$$G(t) = G_0 (1 + \beta \cos 2\pi f_m t) \quad (11)$$

ここに L_0, G_0 は定数, α, β は、それぞれ信号光変調深さおよび利得変調深さ, f_s は信号光変調周波数, $\phi(t)$ は位相, f_m は利得変調周波数である。

入射光信号は光増幅器において $G(t)$ なる増幅を受けるから、増幅器の射出光強度は $L(t) \cdot G(t)$ となり、次のように表わされる。

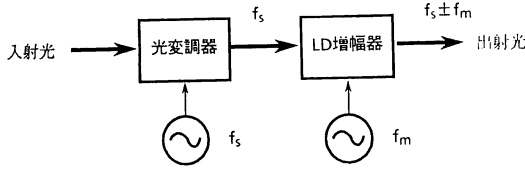


図8 光ミキサの構成

$$L(t)G(t) = L_0G_0 \left[1 + \alpha \cos \{2\pi f_s t + \phi(t)\} + \beta \cos 2\pi f_m t + \frac{1}{2} \alpha \beta \cos \{2\pi (f_s \pm f_m)t + \phi(t)\} \right] \quad (12)$$

(12)式第4項がミキシング出力成分である。

図8は、光ミキサの構成を示す図であり、進行波型LD増幅器のバイアス電流を変調することで利得変調を行なっている。出射光信号成分の測定の結果、 $f_s \pm f_m$ 成分が観測され、光ミキサ動作が確認されている。

3.6 光増幅器を用いた PLL 回路

前式(12)において、ミキシング出力成分の位相 $\phi(t)$ は入力光信号の位相と同じであることから、 $(f_s - f_m)$ 成分を低周波または直流とし、この $(f_s - f_m)$ 成分の位相変化をVCOに帰還することによって、光強度変調信号に対するPLLを構成することが可能である⁴⁰⁾。図9は進行波型LD増幅器を用いたPLLの構成図である。入力光パルスの繰返し周波数 f_s とLD増幅器の利得変調周波数 f_m はほぼ同じとし、位相の初期値 $\Delta\phi$ を図中のP点とQ点の間に設定すれば、位相の変動 $\phi(t)$ はLD増幅器の出力光の変動に一致し、この変動がVCOに負帰還されてPLLが構成されている。 $(f_s - f_m)$ 成分の時間波形が図10であり、PLLを動作させたときにVCOの周波数と光パルスの繰返し周波数が完全に一致して直流となり、PLL動作が確認されている。

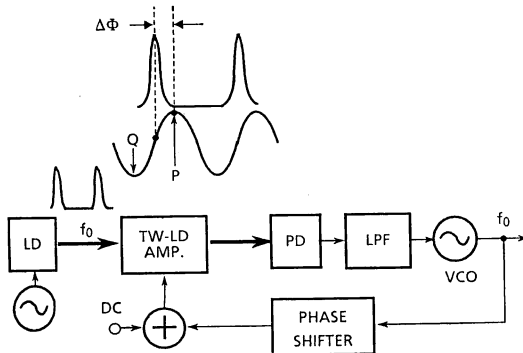


図9 進行波型LD増幅器を用いたPLL回路⁴⁰⁾

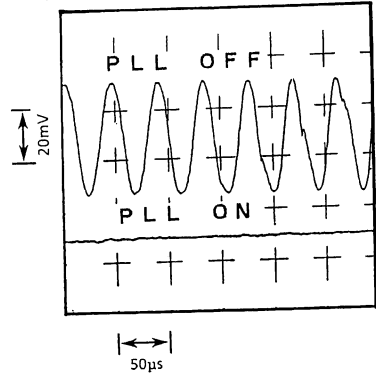


図10 PLL回路の実験結果⁴⁰⁾

本構成で、利得変調成分 β を十分小さくすれば、出力光波形に及ぼす利得変調の影響を抑えることが可能であり、光増幅とタイミング抽出の両者の機能を進行波型LD増幅器だけで実現できるため、光3R中継系に適用できる可能性がある。

3.7 光切替えスイッチ

光増幅器の利得のオン/オフによって信号光の光路の切替えが可能である。図11は、LD増幅器用半導体基板を用いた光スイッチの構成である⁴¹⁾。図の光入射端子 I_1 から光が入力したとき、光増幅器 W_1 または W_2 の電極端子 J_1 または J_2 にバイアス電流を印加して光増幅器をオンにすることによって出力光を O_1 または O_2 に切り替えることが可能である。本光切替えスイッチによって光セルフルーティングスイッチの可能性が示されている。

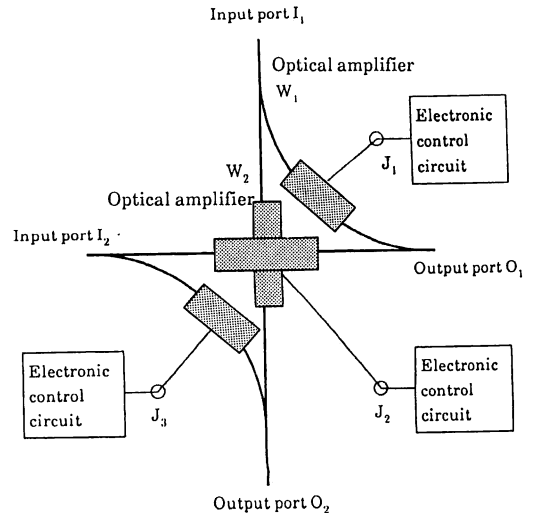


図11 光増幅器を用いた光スイッチ⁴¹⁾

4. 光増幅器の将来

以上述べてきたように、光通信システムにおいて光増幅器は、超広帯域前置増幅器、低雑音中継増幅器およびブースタ増幅器として優れた特性を有するだけでなく、全光処理による装置小型化やソリトン伝送など光非線形効果を利用したシステムへの適用性も有しており、今後各分野で盛んに用いられると考えられるが、光増幅器が実用システムとして使われるためには現時点では次のような点が課題であると考えられる。

(1) LD 光増幅器: LD 増幅器系ではファイバとの結合損失が 5 dB 程度あり、ファイバ-ファイバの実効的利得は約 10 dB 程度にとどまっている⁴²⁾。この結合効率には前置増幅系においては直接 S/N に影響するため、結合効率の改善は今後とも課題と考えられる。また、利得の入射光偏波無依存化なども今後解決されるべき課題である。

(2) ファイバ光増幅器: ファイバ増幅器系のうち、ファイバラマン増幅器については現在のところポンプ光として非常に強い光強度を必要とするため、光源の種類が固体レーザーなど大型のレーザーに限定されている。光通信に用いるためには低ポンプパワー化が課題である。ブリルアン増幅器はポンプ光強度への要求条件は比較的緩いかわりに、利得帯域が数十 MHz と狭く大容量の信号伝送のためには帯域の拡大を図る必要がある。希土類ドープファイバは、広利得帯域を有し、また低ポンプ光強度での動作が可能であるが⁴³⁾、まだシステムの検討が始まったばかりであり、今後最適な伝送系について検討する必要がある。

このように、光通信システムにおいて重要な役割を果たすと考えられる光増幅器の発展に伴って、将来の光通信システム像として、現在電気処理によって行なわれているデジタル再生中継装置を全て光で行なう全光型 3 R 中継系等の研究も活発化してきており⁴⁴⁾、今後の研究の進展が期待される。

文 献

- 1) J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes: "Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH₃," *Phys. Rev.*, **95** (1954) 282-284.
- 2) T. Mukai, Y. Yamamoto and T. Kimura: "Optical amplification by semiconductor lasers," *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 22, ed. W. T. Tsang (Academic Press, 1985) pp. 265-319.
- 3) T. Saitoh and T. Mukai: "Recent progress in semiconductor laser amplifier," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1656-1664.
- 4) T. Mukai and T. Saitoh: "5.2-dB noise figure in a 1.5- μm InGaAsP traveling-wave laser amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 216-218.
- 5) Y. Aoki: "Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability of digital optical communication systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1225-1239.
- 6) K. Mochizuki, N. Edagawa and Y. Iwamoto: "Amplified spontaneous Raman scattering in fiber Raman amplifiers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 1328-1333.
- 7) C. G. Atkins, D. Cotter, D. W. Smith and R. Wyatt: "Application of Brillouin amplification in coherent optical transmission," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 556-558.
- 8) N. A. Olsson and J. P. Van Der Ziel: "Characteristics of a semiconductor laser pumped Brillouin amplifier with electrically controlled bandwidth," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 147-153.
- 9) R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy: "Nonlinear optical star network using tunable narrowband Brillouin filters," *International Conf. on Quantum Electron. (IQEC '88)* (1988) pp. 532-533.
- 10) D. N. Payne and L. Reekie: "Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers," *European Conf. on Optical Commun. (ECOC '88)*, Vol. 1 (1988) pp. 49-53.
- 11) T. K. Shimoda, H. Takahashi and C. H. Townes: "Fluctuations in amplification of quanta with application to master amplifiers," *J. Phys. Soc. Japan*, **12** (1957) 686-700.
- 12) 向井孝彰: "半導レーザー増幅器に関する研究", 学位論文 (1988) pp. 27-31.
- 13) T. Okoshi and K. Kikuchi: *Coherent Optical Fiber Communications*, 1st ed. (KTK Scientific Publishers, Tokyo, and Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, Tokyo, 1988) pp. 157-171.
- 14) N. Shibata, R. G. Waarts and R. P. Braun: "Brillouin-gain spectra for single-mode fibers having pure-silica, GeO₂-doped, and P₂O₅-doped cores," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 269-271.
- 15) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey and D. N. Payne: "Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm ," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1026-1028.
- 16) N. A. Olsson and P. Garbinski: "High-sensitivity direct-detection receiver with a 1.5 μm optical preamplifier," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 1114-1116.
- 17) M. J. O'Mahony, I. W. Marshall, H. J. Westlake and W. G. Stallard: "Wideband 1.5 μm optical receiver using travelling-wave laser amplifier," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 1238-1240.
- 18) I. W. Marshall and M. J. O'Mahony: "10 GHz optical receiver using a travelling-wave semiconductor laser preamplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1052-1053.
- 19) S. Yamamoto, K. Mochizuki, H. Wakabayashi and Y. Iwamoto: "Long-haul high-speed optical communication systems using a semiconductor laser amplifier," *Conf. on Optical Fiber Communication (OFC '88)* (1988) TuD2.
- 20) R. C. Steele and L. W. Marshall: "100 Mbit/s heterodyne experiment using a traveling-wave laser

- amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 296-297.
- 21) N. A. Olsson, M. G. Oberg, L. A. Koszi and G. Przybylek: "400-Mbit/s 372-km coherent transmission experiment using in-line optical amplifiers," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 36-38.
 - 22) M. G. Oberg, N. A. Olsson, L. A. Koszi and G. Przybylek: "313-km transmission experiment at 1 Gbit/s using optical amplifiers and a low chip laser," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 38-39.
 - 23) Y. Aoki, S. Kishida, K. Washio and K. Minemura: "Bit error rate evaluation of optical signals amplified via stimulated Raman process in an optical fiber," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 191-193.
 - 24) J. Hegarty, N. A. Olsson and L. Goldner: "CW-pumped Raman preamplifier in a 45 km long fiber transmission systems operating at 1.5 μm and 1 Gbit/s," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 290-292.
 - 25) 枝川 登, 笠 史郎, 望月清文, 若林博晴: "光ファイバラマン増幅における増幅特性", *信学技報*, OQE 88-33 (1988).
 - 26) T. J. Whitley and T. G. Hodgkinson: "1.54 μm Er³⁺-doped fiber amplifier optically pumped at 807 nm," *European Conf. on Optical Commun. (ECOC '88)*, Vol. 1 (1988) pp. 58-61.
 - 27) R. Olshansky and E. Eichen: "Microwave multiplexed wideband lightwave systems using optical amplifiers for subscriber distribution," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 922-923.
 - 28) W. I. Way, C. E. Zah, S. G. Menocal, C. Caneau and F. Favire: "90-channel FM video transmission to 2048 terminals using two inline traveling-wave laser amplifiers in a 1300 nm subcarrier multiplexed optical system," *European Conf. on Optical Commun. (ECOC '88)*, Vol. 3 (1988) pp. 37-40.
 - 29) R.-P. Braun, R. Ludwig and R. Molt: "Ten-channel optic fiber transmission using an optical traveling wave amplifier," *European Conf. on Optical Commun. (ECOC '86)* Vol. 3 (1986) pp. 29-31.
 - 30) T. Mukai, K. Inoue and T. Saitoh: "Signal gain saturation in two-channel common amplification using a 1.5- μm InGaAsP traveling-wave laser amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 396-397.
 - 31) G. Grosskopf, R. Ludwig and H. G. Weber: "Cross-talk in optical amplifiers for two-channel transmission," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 900-902.
 - 32) R. M. Jopson, K. L. Hall, G. Eisenstein, G. Raybon and M. S. Whalen: "Observation of two-color gain saturation in an optical amplifier," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 510-512.
 - 33) K. Inoue: "Observation of crosstalk due to four-wave mixing in a laser amplifier for FDM transmission," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 1293-1295.
 - 34) T. E. Darcie and R. M. Jopson: "Nonlinear interactions in optical amplifiers for multifrequency lightwave systems," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 638-640.
 - 35) A. Hasegawa and F. Tappert: "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers: I. Anomalous dispersion," *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973) 142-144.
 - 36) K. Iwatsuki, A. Takada and M. Saruwatari: "Optical soliton propagation using 3GHz gain-switched 1.3 μm laser diodes," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1572-1574.
 - 37) L. F. Mollenauer and K. Smith: "Demonstration of soliton transmission over more than 4000 km in fibre with loss compensated by Raman gain," *International Conf. on Quantum Electron. (IQEC '88)* (1988) pp. 460-461.
 - 38) T. E. Darcie, S. O'Brien, G. Raybon and C. A. Burrus: "Optical mixer-preamplifier for lightwave subcarrier systems," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 179-180.
 - 39) 平野嘉仁, 辰巳賢二, 伊東 尚: "進行波型 LD 増幅器を用いたミクサ," *昭和63年電子情報通信学会*, Vol. 1 (1988) C-234.
 - 40) S. Kawanishi and M. Saruwatari: "New-type phase-locked loop using traveling-wave laser-diode optical amplifier for very high-speed optical transmission," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 1452-1453.
 - 41) R. Kishimoto and M. Ikeda: "Optical self-routing switch using integrated laser diode optical switch," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, **SAC-6** (1988) 1248-1254.
 - 42) Y. Tamura and E. Nishimura: "A traveling-wave optical amplifier module," *European Conf. on Optical Commun. (ECOC '88)*, Vol. 1 (1988) pp. 491-494.
 - 43) 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 Er³⁺-doped fiber amplifiers in an IM/direct-detection repeater system," *Conf. on Optical Fiber Communication (OFC '89)* (1989) PD 15-1.
 - 44) M. J. O'Mahony: "Towards an all optical regenerator," *European Conf. on Optical Commun. (ECOC '87)*, Vol. 2 (1987) pp. 11-17.