専門講座：通信用ホトニックデバイス

IV. 光ファイバ増幅器開発の現状と今後

須 藤 昭 一 (NTT 光エレクトロニクス研究所)

大 石 泰 丈 (NTT 光エレクトロニクス研究所)

清 水 誠 (NTT 光エレクトロニクス研究所)

1. はじめに

現在、光技術は光ファイバ通信、光ディスクを中心としてすでに活発な実用化の段階に達している。こうした状況に至るブレイクスルーは、1960～1970年代の半導体レーザおよび低損失光ファイバの開発と1980年代の活発な実用化研究によって達成されたものといえる。しかしながら、光技術のもつ特徴をさらに活用しようとする次世代の光通信技術、例えば、大容量光通信や全光化光通信などを想定した場合、より多くの光機能デバイスが必要となる。

図1は、光通信システムに現在使用されている第一世代の光デバイスと、今後、第二世代、第三世代の光通信で使用されることが予想される主な光デバイスを示している。こうした光デバイスの中で、光増幅器は、光通信の基本デバイスとして今後極めて重要な位置を占めるものである。特に、最近活発に研究開発が展開されている光ファイバ増幅器は、最も有望な光増

幅器の候補であり、本稿では、この光ファイバ増幅器開発の現状と今後について詳細に述べる。

2. 光増幅技術の概要

2.1 光増幅器と電気増幅器の原理と相違点

図2に光増幅器と電気増幅器の原理と相違点を示す。直接の相互作用がほとんどない光（光子）の場合、増幅は電子系を介して行われる。すなわち、あらかじめポンプ光あるいは電流注入により励起された活性イオンなどの電子系に信号光を相互作用させ、励起された電子のエネルギーを光に変換すること（誘導放出など）によって光増幅が行われる。一方、電気の場合、電子と電子は直接の相互作用（クーロン相互作用）があるため、増幅はより簡単な原理で行われる。すなわち、やや古典的になるが、真空管やトランジスタのグリッドやベースに電圧印加や電流注入を行い、これによってプレート・カソード間あるいはエミッタ・コレクタ間の電流量を制御し、グリッドやベース

図1 光通信用デバイスの現状と将来（現在は、第一世代から第二世代への移行期）

Tutorial Series: Photonic Devices.

IV. The Present and Future Development of Optical Fiber Amplifiers.

By Shoichi Sudo, Yasutake Ohishi, Makoto Shimizu (NTT Opto-electronics Laboratories).

キーワード：光ファイバ、光増幅器、光ファイバ増幅器

図 2 光を増幅する原理
(電気信号の増幅との比較)

に入力された微小信号をプレート・カソード間あるいはエミッタ・コレクタ間で増幅するものである。

光の場合は、誘導放出などにより同位相 (コヒーレント) でエネルギーが重畳されるエネルギー増幅であり、電気の場合、入力信号の交流成分のみ、出力側に取り出される等価増幅で、コヒーレントではないことが異なる。

2.2 光増幅技術の種類と動作

光を増幅する検討は、1960 年のレーザー (LASER: Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation) の発明⁽¹⁾直後から開始され、これまでに、半導体レーザーを使用する方法⁽²⁾、固体レーザーを使用する方法⁽³⁾、などさまざまな方法が検討されてきたが、それらは、主として次の三つに分けられる。すなわち、

- ① 誘導放出を利用する方法
- ② 誘導非線形散乱による波長変換を利用した方法
- ③ 光トランジスタによる方法

である。①は、半導体レーザーや固体レーザー技術を基本としたもので、エネルギー準位間の誘導放出遷移を利用して、光信号を増幅するものであり、②は光ファイバ中で顕著に生じる誘導ラマン散乱 (SRS) や誘導ブリルアン散乱 (SBS) などの非線形光学効果を利用して光増幅を行うものである。また、③は①や②とはやや異なった方法であるが、光変調周とフォトコンダクタを組み合わせ、電気トランジスタと類似の光 3 端子動作を行うものである。以下、これらの方法の原理を簡単に述べる。

(1) 誘導放出による光増幅 誘導放出遷移を利用する光増幅器には、前述のように固体レーザーを基本としたものと、半導体レーザーを基本としたものがあるが、現在最も注目を集めているのは、希土類イオンを

添加した光ファイバによる光増幅器である⁽⁴⁾。この光ファイバ増幅器については次項で詳細に説明することとし、本項では、誘導放出による光増幅の原理と、半導体レーザー光増幅器について説明する。

図 3 に、誘導放出による光増幅の原理を示す。半導体材料の場合、反転分布の形成は電流注入によって行われ、結晶やガラス材料の場合、発光イオンを光励起することによって行われる。この反転分布が形成された半導体材料あるいは結晶・ガラス材料に光が入射されると誘導放出が生じて、光増幅が行われる。

半導体レーザーを基本とした光増幅素子の基本構成は半導体レーザーと同じであるが、共振器構造を作らず、活性層の端面には無反射コートが施される点異なる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。増幅波長帯は、誘導放出の波長、すなわち半導体材料の禁制帯エネルギー幅によって決まり、In-GaAsP 材料の場合、1.0 から 1.7 μm の範囲で増幅波長の調整が可能である。また、現在、20~30 dB の増幅利得が得られている⁽⁷⁾。この光増幅素子は、素子長が数 100 μm と極めて短いこと、増幅波長域が広いこと (数 10 nm)、電気エネルギーによって直接光信号を増幅できることなどの利点があり、将来の超小型光増幅器や光集積回路における増幅器として有望である。しかしながら、光ファイバ通信用の増幅器として使用する場合、光ファイバとの結合損失が大きくなりやすいこと、利得が偏波に依存することが課題となっている。

(2) 誘導非線形散乱による光増幅 誘導非線形散乱を利用した光増幅としては、石英系光ファイバ中の誘導ラマン散乱 (SRS)⁽⁸⁾⁽⁹⁾や、誘導ブリルアン散乱 (SBS)⁽¹⁰⁾を利用したものが検討されている。誘導ラマン散乱を利用した光増幅では、 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ 系光ファイバの中に入射された光は GeO_2 によって 430 cm^{-1} 程度の波数シフトを受ける (第 1 ストークス光) ため、このストークス光の波長に対応した信号光を入射すれば、誘導ラマン散乱効果による増幅を行うことができる。これまでに、高出力半導体レーザーより出射した波長 1.47 μm の励起光と波長 1.57~1.58 μm の信号光を $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$ コアファイバ内に入射し、約 5 dB の光増幅を行った例がある⁽⁹⁾。

また、誘導ブリルアン散乱を利用した光増幅も原理はほぼ同じであるが、誘導ブリルアン散乱は音響フォノンによる誘導散乱過程であるため、ストークス光の波長シフトは、1.55 μm の励起光に対して 11 GHz と極めて小さいものとなる。また、ゲイン幅も 17 MHz 程度と極めて狭いため、励起光、信号光ともにスペクトル幅の狭い光源を用いなければならない。この方法

図 3 誘導放出による光増幅

により 28 dB 程度の増幅率が得られている⁽¹⁰⁾。また、誘導ブリルアン散乱の臨界値は、誘導ラマン散乱の臨界値より 3 桁程度小さい値となり、半導体レーザのパワーでも容易に発生させることができる点に特長がある。

(3) 光トランジスタを用いた光増幅 EARS (Exciton Absorption Reflection Switch)⁽¹¹⁾ や SEED (Self-Electro-Optic Effect Devices)⁽¹²⁾ という光トランジスタ的な動作をする光 3 端子素子が提案されている。図 4 は、EARS の基本構造と動作原理の説明図である。EARS の多重量子井戸 (Multi-Quantum Well; MQW) 層内では室温でもエキシトン (電子-正孔対の束縛状態) が存在するため、吸収スペクトルに鋭いピークが現われ、その吸収端は MQW 層に垂直な電界によりシフトし (QCSE 効果)、透過率が変化する。図 4 で、入力光がない場合、ホットコンダクタ

図 4 光トランジスタ (EARS) による増幅

はゼロとなる。このとき、MQW 層の吸収係数は低いのでバイアス光は効率良く反射され高出力状態となる。一方、入力光がある場合、ホットコンダクタは電氣的に短絡状態となるため、MQW 層に電圧がかかり、MQW 層は光吸収層として働く。したがってバイアス光は吸収されて低出力状態となる。この結果、バイアス光は信号光によって変調され、増幅された光信号として得られる。すなわち、EARS は光増幅器として動作する。この種の光増幅器は、電気トランジスタの原理と類似のものであるため、光トランジスタと呼ばれている。

3. 光ファイバ増幅器

3.1 光ファイバ増幅器の概要

(1) 高利得光ファイバ増幅器を実現するための条件 光ファイバ通信用の光増幅器として最も注目を集めているのが、光ファイバ増幅器である。図 5 に光ファイバ増幅器の原理図を示す。光増幅媒体として、コア部に希土類イオンを添加した光ファイバを用いる進行波増幅器で、2.1 項および図 3 で原理を説明したとおり、光ファイバのコアガラス中に添加した希土類活性イオンを光励起し、このイオンの誘導放出遷移を利用して光増幅を行うものである。

この光ファイバ増幅器の増幅利得係数 G^* (増幅効率を表わす指数: 利得/励起光パワー) は、近似的に次の式で表わされる。

$$G^* = 4.3 \times (F / A h \nu_p) \times \sigma \tau \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F は励起光と信号光の重なり積分、 A は実効コア径、 h はプランク定数、 ν_p は励起光の周波数、 σ は誘導放出断面積、 τ は蛍光寿命である。したがって、こうした光ファイバ増幅器で、高い増幅利得を実現するためには、下記の条件を満足する必要がある。すなわち、

- ① 大きな誘導放出断面積 (高い量子効率)、長い蛍光寿命
- ② コア内での高い光強度

図5 光ファイバ増幅器の原理図

図6 1960年代の光ファイバ増幅器の構成図

③ 強く、高効率の励起

④ 低損失なファイバホスト

これら四つの課題は相互に関連してはいるが、①は、主として活性イオンとホストの問題、②は誘導放出を高めるためのファイバ構造の問題、③は活性イオンの励起の問題、④はホストの問題であり、これらの課題をいかに解決するかが、光ファイバ増幅器開発の第一歩である。

(2) 光ファイバ増幅器開発の経緯 希土類イオンを添加した光ファイバを利用して光を増幅するアイデア自体は古く1960年代の初頭まで遡る。1964年、アメリカのSnitzerらはNdイオンを添加したファイバによる1.06 μm の光増幅実験⁽²⁾やYb-Er添加ガラスレーザのパルス発振(1.54 μm)に成功し⁽¹¹⁾、1971年にそれまでの成果をまとめて光ファイバレーザや光ファイバ増幅器に関する先駆的な提案を行った⁽¹²⁾。図6は、1960年代の光ファイバ増幅器の構成図である。励起光は、広いスペクトルのフラッシュランプのため、励起効率は高くなく、またファイバ技術が未成熟であったため、コア内での高い光強度や低損失化も実現できていなかったと考えられる。その後、1974年にアメリカコーニング社から希土類添加ファイバとして液相法の特許⁽¹³⁾が、またNTTから気相添加法の特許⁽¹⁴⁾が出願されたが、現在の光ファイバ増幅器の開発に直接結びつく研究の進展は見られなかった。

石英光ファイバ技術が成熟した1980年代に至って、イギリスのPooleらは、MCVD(Modified Chemical Vapor Deposition; 光ファイバ作製法の一つ)による希土類イオン添加光ファイバ作製法を開発⁽¹⁵⁾するとともに、Nd³⁺添加ファイバによるレーザ発振の実験⁽¹⁶⁾を行った。しかしながら、光ファイバ増幅器技術における最大のインパクトは、1987年イギリスのMearsらによって、Er³⁺イオンを添加した石英ガラ

ス単一モードファイバによる1.55 μm 帯の光増幅実験が報告されたことである⁽⁴⁾。この実験では、フラッシュランプ励起に換えて、スペクトルが狭く励起効率の良いArレーザ励起を行ったこと、また、低損失で小さなコア径(高 Δ)の単一モードファイバホストの作製に成功したことが、高い増幅利得(20 dB)を達成できたポイントであった。この報告が契機となって、光ファイバ増幅器が多くの研究機関で活発に開始されることとなった。また、1987年にSnitzerらによって、半導体レーザが使用可能な1.49 μm の波長でEr³⁺を励起する方法が開発⁽¹⁸⁾されたことも、活発な研究開発にいつそう拍車をかけることとなった。

(3) 光増幅用希土類イオン 光ファイバ増幅器においては、ファイバ中に添加する希土類活性イオンが極めて重要であり、添加する希土類イオンによって、光増幅の波長帯がほぼ決まる。図7は、光通信の波長帯と主な希土類イオン(ガラス中)の発光波長帯の関係を示したものである。この中で、光通信の波長帯との対応で最も重要なのが、1.3 μm 帯に発光スペクトルを有するPr³⁺と1.5 μm 帯に発光スペクトルを有するEr³⁺であり、次節で詳しく述べる。

一般にTm³⁺、Nd³⁺、Pr³⁺、Er³⁺などの希土類イオンは、6s電子が2個、4f電子が1個抜けた電子配置をしており、光励起準位は4f電子(例えば、Pr³⁺の場合2個の4f電子)によって決まる。したがって希土類イオンの発光は、基本的には4f電子のバンド内遷移であり、遷移確率は大きくはない⁽¹⁹⁾。この4f電子の外側には、閉殻を構成する2個の5s電子と6個の5p電子があるため、4f電子は外側からの影響を受けにくい構造となっている。しかしながら、希土類イオンがガラスや結晶中に添加された場合、周囲の結晶場(電界)の影響を受けて、エネルギー準位は分裂する(シュタルク分裂)。図8は、2個の4f電子をもつPr³⁺イオンのエネルギー準位を模式的に示したものである。エネルギー準位は、まず4f電子同士

図7 光通信の波長帯と主な希土類イオン(ガラス中)の発光波長帯

の電気的相互作用によって、次にスピンの軌道相互作用によって分離される。そして、ガラスなどの中に添加された場合、さらにエネルギー準位は結晶場などの影響によって微細に分裂し、エネルギーバンドを形成する。したがって、図 7 に示したように、ガラス中に添加された希土類イオンの発光スペクトルは波長帯を形成する。このガラス中に添加された希土類イオンの増幅波長帯の形成は、光増幅にとっては好都合に働くこととなる。

(4) 実用的光ファイバ増幅器の課題 (1)項に、高利得な光ファイバ増幅器を実現するための条件を示したが、実用的な光ファイバ増幅器を開発するためには、高利得化を含め、さらに次のような課題を解決する必要化がある。

- ① 高利得
- ② 広帯域 (広波長域)
- ③ 高出力
- ④ 低雑音
- ⑤ 高信頼性
- ⑥ 低価格

もちろん、光ファイバ増幅器の用途によって、要求される性能は異なるが、一般的には上記の性能が要求される。したがって、現在、こうした性能を改善するための研究開発が活発に進められている。次の節では、こうした研究開発の一端を紹介する。

3.2 1.5 μm 帯光ファイバ増幅器

(1) Er^{3+} イオンによる $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯光増幅 図 7
に示したように, $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯の希土類活性イオンは

Er^{3+} イオンの増幅上準位である $^4\text{I}_{13/2}$ の寿命は 14 ms 程度と長く、また $^4\text{I}_{13/2}$ – $^4\text{I}_{15/2}$ 準位間遷移の量子効率も良いため、 Er^{3+} イオンは活性イオンに要求される条件①を満足するものである。また、石英ガラスファイバをホストとした場合、④の低損失なファイバホストの条件も満足され、高利得化には有利である。Mears らが、比較的初期段階で 20 dB を超える増幅利得を実現できたのも、この Er^{3+} イオンと石英ガラスファイバホストの素性の良さによるものであるといえる。

そこで、さらに②、③の条件を満足し、高い利得を達成するために、EDFA では、次のような検討が行われている。すなわち、(i)ファイバコアの細径化 ($\sim 3\mu\text{m}$)・高 Δ 化 ($\sim 2\%$) によるコア内光強度の向上⁽²⁰⁾、(ii)0.98 μm 、1.48 μm など吸収効率の良い励起光波長の検討⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ であり、また(iii)イオン間の相互作用による発光の劣化(クエンチング)を防ぐための Er^{3+} イオン添加量および添加方法の検討⁽²²⁾や、(iv) Er^{3+} イオンをコア中心部のみに添加する検討も行われている。図 11 は、こうした検討によって達成された光増幅利得特性であり、0.98 μm 励起では、40 dB の増幅利得が達成されている⁽²⁰⁾。

しかしながら、40 dB を超える増幅利得を得ようとすると、増幅された自然発光(ASE; Amplified Spontaneous Emission)の増加による増幅利得の劣化や図 9 に示した構成の各光部品接続点から光反射などによるレーザ発振などの問題が生じることとなる。そこで、現在では、これらを克服するために、アイソレータを内装する増幅器の構成法などが工夫され^{(23)–(26)}、50 dB を超える増幅利得が達成されている⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

(3) 1.5 μm 帯 EDFA における広帯域化技術

3.1 節(2)項で述べたように、ガラス中に添加された希土類イオンは、結晶場の影響によるエネルギー準位の分裂(シュタルク分裂)のために、その発光スペクトルはバンドを形成する。石英ガラス中に添加された Er^{3+} イオンの 1.53 μm 帯での発光の場合、スペクトル幅は約 3 nm 程度⁽⁴⁾となるが、この増幅波長幅は、EDFA の実用化には必ずしも十分ではない。

そこで、ホストガラス材料を変えて、希土類イオンの周り結晶場を調整し、発光スペクトル(増幅波長特性)を広帯域化する検討が行われている^{(27)–(29)}。図 12 は、ホストガラスを SiO_2 と Al_2O_3 – GeO_2 – SiO_2 とした場合の EDFA の光増幅波長特性である⁽²⁹⁾。 SiO_2 系のガラスをホストとする場合、増幅ピーク波長が 1.536 μm および 1.552 μm で、かつ狭いのに対し、 Al_2O_3 – GeO_2 – SiO_2 系ホストガラスでは、1.533 μm お

(増幅波長: 1.536 μm)

図 11 EDFA の光増幅利得特性

ホストガラスによる相違

図 12 EDFA の光増幅波長特性

および 1.550 μm にシフトするとともに、長波長側のピークはブロードになっており、その半値全幅は約 25 nm となっている。これは、 SiO_2 とは結合状態の異なる Al_2O_3 ホストによって、 Er^{3+} イオンの周り結晶場が変化したことを示しており、 Al_2O_3 – GeO_2 – SiO_2 系ホストガラスが増幅波長の広帯域化に有効であることを示している。

また、最近ではさらに、ホストガラスとしてフッ化物ガラスやフッリン酸ガラスを使用して広帯域化を図る検討⁽²⁷⁾も行われているほか、光フィルタや利得負帰還法⁽³⁰⁾⁽³¹⁾、などによるゲインピークの平坦化なども検討されている。

(4) 1.5 μm 帯 EDFA における高出力化技術

Er^{3+} イオンによる 1.5 μm 帯の光増幅は 3 準位系であるため、増幅用ファイバからの飽和光出力は(2)式で表わされる。

$$P_{\text{sat}} = Ah\nu_s / 2\sigma\tau(1 + P/P_{\text{th}}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ν_s は信号光の周波数、 P は励起光パワー、

P_{in} は反転分布を生じるための励起光を上げれば出力を増加できる。この観点から励起用の $0.98\ \mu\text{m}$, $1.48\ \mu\text{m}$ 半導体レーザの高出力化の検討が進められている。しかし、半導体レーザの高出力化には限界があるため、高い出力の得やすい $1.04\ \mu\text{m}$ の Nd : YLF レーザで励起する検討が行われている。この場合、 $1.04\ \mu\text{m}$ の吸収係数を増加するために、ファイバ中に Er^{3+} イオンとともに Yb^{3+} イオンが添加され⁽¹¹⁾⁽³²⁾、まず Yb^{3+} イオンの強い吸収によって $1.04\ \mu\text{m}$ Nd : YLF レーザ光を吸収し、このエネルギーを Er^{3+} イオンへ移動するエネルギー移動の技術が使用されている。こうした技術によって、現在では、 $24.6\ \text{dBm}$ ($288\ \text{mW}$) の増幅された光出力が得られるに至っている⁽³³⁾。

EDFA においては、以上述べた技術のほかにも、励起光の波長選択や ASE の抑制による低雑音化の検討、光増幅器構成部品の高信頼性化の検討、さらには低価格のための検討など実用化へ向けたさまざまな検討が進められているが、本稿では割愛することとした。

3.3 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器

(1) Nd^{3+} イオンによる $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光増幅 図 7 に示したように、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の希土類活性イオンは Nd^{3+} と Pr^{3+} であり、これを添加したファイバを増幅媒体とする光ファイバ増幅器 (NDFA; Neodymium-Doped Fiber Amplifier, PDFA; Praseodymium-Doped Fiber Amplification) の研究開発が、進められている。

歴史的には、Nd : YAG レーザや Nd : ガラスレーザの研究で長い蓄積のある Nd^{3+} イオンを増幅活性イオンとした NDFA の研究が先行して進められた^{(34)~(38)}。図 13 は、 Nd^{3+} イオンのエネルギー準位図である。 Nd^{3+} イオンの場合、励起は ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 準位間 (波長 $0.80\ \mu\text{m}$)、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の光増幅は ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 準位間の誘導放出遷移を利用して行われるが、 ${}^4\text{G}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{3/2}$ 準位間に、波長 $1.3\ \mu\text{m}$ に対応する励起状態吸収 (ESA; Excited-State-Absorption) があるため、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の発光が吸収されることとなる⁽³⁶⁾。したがって、NDFA の利得スペクトルは、図 14 に示すように、 $1.30\ \mu\text{m}$ 付近で落ち込みを生じ、増幅利得が得られるのは $1.31\ \mu\text{m} \sim 1.36\ \mu\text{m}$ の波長域、利得ピークは $1.34\ \mu\text{m}$ となる⁽³⁶⁾。図 14 の諸特性は、 Nd^{3+} イオンを石英ガラスファイバに添加した場合の特性で、もちろん、ホストガラスをリン酸系ガラスやフッリン酸ガラス、さらにフッ化物ガラスに替え、 Nd^{3+} イオンの周りの結晶場を制御すれば、ESA を抑制して増幅利

図 13 Nd^{3+} イオンのエネルギー準位図

図 14 Nd^{3+} ドープファイバの発光、吸収 (ESA)、光増幅特性

得の落ち込みを幾分かは改善できるが⁽³⁷⁾、 $1.30\ \mu\text{m}$ 付近の ESA を完全に消すことはできない。 $1.30\ \mu\text{m}$ あるいは $1.31\ \mu\text{m}$ は、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光通信の中心波長であり、NDFA のこの波長域での増幅利得の劣化は大きな問題である。このため、現在では、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の研究開発は、次に述べる Pr^{3+} イオンによる $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光増幅 (PDFA) へと移行している。

(2) Pr^{3+} イオンによる $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光増幅

Nd^{3+} にかわる希土類活性イオンとして Pr^{3+} イオンが検討され始めたのは、ごく最近のことである。この Pr^{3+} イオンによる $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光増幅の提案は、著者の一人である大石らによって 1991 年に行われ⁽³⁹⁾、その後、さまざまな研究機関で研究が展開されることとなった。

図 15 は、 Pr^{3+} イオンのエネルギー準位図である。 Pr^{3+} イオンによる $1.3\ \mu\text{m}$ 帯光増幅の場合、増幅は ${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ 準位間の遷移を利用して行われ、励起は波長 $1.017\ \mu\text{m}$ の ${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ 準位間で行われるが、この技術の最大のポイントはホストガラスである。すなわち、 Pr^{3+} イオンを石英ガラスに添加したのでは、石英が

図 15 Pr^{3+} イオンのエネルギー準位図

図 16 Pr^{3+} イオンの発光スペクトル

ラスの Si-O 結合の熱振動エネルギー（フォノンエネルギー）が約 $1,100 \text{ cm}^{-1}$ と大きいために、 $^1\text{G}_4$ 準位に励起されたイオンは、無輻射遷移によって $^3\text{F}_4$ 準位へ緩和されてしまい、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯での光増幅を実現できない。そこで、ホストガラスを石英ガラスよりもフォノンエネルギー低いフッ化物ガラス（約 500 cm^{-1} ）に替えることにより、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の光増幅が可能になった。

図 16 は、 Pr^{3+} イオンをフッ化物ガラス中に添加した場合の発光スペクトルである⁽³⁹⁾。 Nd^{3+} イオンをフッ化物ガラス中に添加した場合の発光スペクトルも参考として示してある。 Pr^{3+} イオンの場合、 $1.30 \mu\text{m}$ あるいは $1.31 \mu\text{m}$ を中心とした広い波長域の発光スペクトルを有しており、 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の光通信波長に良く整合するものとなっている。

(3) $1.3 \mu\text{m}$ 帯 PDFA における高利得化技術

PDFA では、ファイバホストとして、超低損失ファイバ用材料として技術的蓄積のあった ZrF_3 系フッ化物ガラス ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-YF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF-LiF}$ 系) が採用され、EDFA と同様に 3.1 節(1)項の四つの課題を解決べく検討が進められている。すなわち、(i)ファイバコアの細径化 ($1\sim 2 \mu\text{m}$)・高 Δ 化

図 17 $1.3 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器 (PDFA) の写真

(3~4%) によるコア内光強度の向上⁽⁴⁰⁾、(ii) $1.017 \mu\text{m}$ 励起光源の検討⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾、(iii) 低損失な ZBLAN ホストファイバの作製、(iv) Pr^{3+} イオン添加濃度の検討⁽⁴³⁾、などが行われ、 Pr^{3+} イオン添加ファイバの増幅利得係数（増幅能力を表わす指数：利得/励起光パワー）が、 0.2 dB/mW まで向上し、このファイバを使用して約 30 dB の増幅利得を有する PDFA モジュールが作製されている⁽⁴⁴⁾。また、PDFA の最高利得は 38.2 dB に達している⁽⁴⁵⁾。図 17 は、PDFA モジュールの写真であり、図 18 は増幅特性である。このモジュールでは利得係数が 0.2 dB/mW と低いため、励起光源として 4 個の半導体レーザ（発振波長 $1.017 \mu\text{m}$ ）が使用され、ファイバへの励起光は 28 dB 利得のときで 265 mW となっている。増幅波長特性は、図 18(a) からわかるように、 $1.30 \mu\text{m}$ を中心として、約 21 nm (3 dB down) のきれいな増幅帯域となっている。

このように、 $1.30 \mu\text{m}$ 帯 PDFA においても高利得の光ファイバ増幅器が実現されるに至っている。しかしながら、ホストガラスとして、フォノンエネルギー低い ZBLAN 系フッ化物ガラスを使用しても、 $^1\text{G}_4$ 準位の無輻射遷移が多分に残るため、発光遷移の量子効率率は依然低い値（約 3% 程度）に留まり、利得係数も 0.2 dB/mW である。そこで、現在では、さらにフォノンエネルギーの低いファイバホスト材料として、 InF_3 系フッ化物ガラス⁽⁴⁶⁾、カルコゲナイドガラス⁽⁴⁷⁾、ハライドガラス⁽⁴⁸⁾などを用いる検討が行われている。これらの新しいファイバホスト材料を使用した場合の増幅利得係数を、ファイバ構造（コア直径）をパラメータとして見積ると図 19 に示ようになる。 ZrF_3 系フッ化物ガラスホストの場合、3.1 節(1)項の条件を満足しても、利得係数は $0.2\sim 0.3 \text{ dB/mW}$ であるのに対し、 InF_3 系フッ化物ガラスやカルコゲナイドガラスをホストガラスとした場合、利得係数は大幅に改善されることがわかる。

(a) 増幅波長特性

(b) 増幅利得特性

図 18 PDFA の増幅特性

図 19 PDFA における利得係数の推定 (計算)

(4) 1.3 μm 帯 PDFA における広帯域化・高出力化技術 PDFA 技術は歴史が浅いため、EDFA 技術に比べて技術開発が遅れている。加えて、図 18(a) に示したように、増幅波長特性が、1.30 μm を中心波長として、比較きれいな形をしているため、広帯域化については、ほとんど未検討である。

一方、高出力化技術については、いくつかの検討例がある。Pr³⁺ イオンによる 1.3 μm 帯の光増幅は 4 準位系の誘導放出遷移であるため、増幅用ファイバから

の飽和光出力は、(3)式で表わされ、3 準位系の EDFA の場合とは異なる。

$$P_{\text{sat}} = Ah\nu_s/2\sigma \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、4 準位系の PDFA の場合、飽和出力は、励起光強度に依存せず、(3)式で一意的に決まる。しかしながら、ZrF₃系フッ化物ガラスをファイバホストとした現状の PDFA では、量子効率の低くかつ蛍光寿命も短いため、 $\sigma\tau$ は 0.04 (10⁻²⁰ cm²ms) 程度の小さな値 (ちなみに、EDFA は 8.4 程度) となるため、結果として、大きな光出力が得られることとなる。これまでの検討では、Nd:YLF レーザを励起光源とした実験で、最高 250 mW の出力が得られている⁽⁴⁹⁾。

3.4 1.4 μm 帯、1.6 μm 帯用での光ファイバ増幅器

1.5 μm 帯、1.3 μm 帯の光増幅器に加えて、1.4 μm 帯、1.6 μm 帯の光を増幅する検討も行われている。1.4 μm 帯と 1.6 μm 帯の波長帯は、光通信に使用されている波長帯ではないが、将来、光ファイバケーブルの保守・試験用として利用される可能性がある。

図 7 に示したように、1.4 μm 帯の希土類活性イオンは Tm³⁺ で、1.4 μm 帯の誘導遷移は ³F₄-³H₄ 準位間である。この Tm³⁺ イオンをフッ化物ガラスファイバに添加したものが増幅媒体とし、Nd:YAG レーザ (波長 1.06 μm) を励起光源として、1.47 μm の信号波長で 25 dB の増幅利得が得られている⁽⁵⁰⁾。また、Tm³⁺ に加え、Ho³⁺ と Eu³⁺ を共添加した活性イオン系を使用し、半導体レーザ励起が可能な 0.78 μm を励起光として増幅する検討も行われている⁽⁵¹⁾。

1.6 μm 帯の希土類活性イオンとしては、Er³⁺ と Tm³⁺ が検討されている。Er³⁺ の場合、⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} 準位間の発光スペクトルの長波長側の裾が 1.6 μm 帯まで延びており、1.6 μm 帯の信号光の増幅が可能である。特に、図 12 に示したように、ホストガラス系を Al₂O₃-GeO₂-SiO₂ とした場合、増幅波長帯が広がるため、1.6 μm 帯で高利得の増幅が実現できる。これまでの検討で、1.60 μm の信号波長で 24 dB、1.61 μm で 20 dB の増幅利得が達成されている⁽⁵²⁾。一方、Tm³⁺ の場合、1.8 μm 帯に中心をもつ ³H₅-³H₆ 準位間の発光スペクトルの短波長側の裾が 1.6 μm 帯まで延びており、1.6 μm 帯の信号光の増幅が可能である。この系では、GeO₂-SiO₂ をファイバホストとして、1.6~1.7 μm の波長域で 2 dB 程度の増幅利得が得られている⁽⁵³⁾。

また、希土類イオンを添加したファイバを増幅媒体

とした方法ではないが、誘導ラマン散乱 (SRS) を利用した $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 帯光増幅の検討も行われている⁽⁵⁴⁾。

4. 光ファイバ増幅器を使用したシステム検討の現状

冒頭に述べたように、光増幅器は今後の光通信システムのキーデバイスであるために、さまざまなシステム検討が活発に行われている^{(55)~(60)}。主な検討だけでも、

- ① 基幹伝送システムへの応用検討
- ② 加入者伝送系への応用検討
- ③ 海底伝送システムへの応用検討
- ④ 光ソリトン伝送への応用検討

などが行われている。また、こうした応用技術において光ファイバ増幅器が果たす機能は、(i) 信号の再生中継 (1 R)、(ii) 増幅による多分岐、(iii) 増幅による受光感度の向上、などであるが、応用するシステムによって光ファイバ増幅器に求められる主要な特性 [3.1 節 (3) 項で述べた高利得、高出力、低雑音、など] が異なることとなる。例えば、光増幅器によって信号の再生中継を行う①、③の応用技術では、高利得、低雑音特性が特に重要な特性となり、増幅による多分岐を行う②の応用技術では、高出力特性が重要となる。上記のように、光ファイバ増幅器のシステム検討は多方面に及んでいるが、本報告では、このうちの極く一部についてのみ言及し、詳細は参考文献 (55)~(60)などを参照していただくこととしたい。

光ファイバ増幅器による信号の再生中継を行う①、③の応用技術で、特筆すべき検討は、KDD と AT & T によって行われた 10 Gb/s の光信号を $9,000\text{ km}$ 伝送した実験である⁽⁶¹⁾。この実験では、 274 個の EDFA と $9,040\text{ km}$ の低損失 (0.22 dB/km)・低分散 ($0.1\text{ ps/km}\cdot\text{nm}$) ファイバを使用し、 10 Gb/s の NRZ デジタル光信号を平均 33 km の中継間隔で再生 (1 R) 中継伝送した。もちろん、 10 Gb/s の光信号は一度も電気信号に変換されることなく $9,000\text{ km}$ 伝送されている。ちなみに、この検討は、1995 年以降導入が予定されている長距離光海底ケーブル方式 (TPC-5) への適用を目指したものである⁽⁶²⁾。こうした中継器の光化によって、超高速な光信号をより簡便な設備で再生中継できることとなり、長距離伝送システムの性能が飛躍的に向上することとなる^{(63)~(65)}。また、さらに長距離化を目指した検討として、光ソリトン波形を 100 万 km 伝送した実験も報告されている⁽⁶⁶⁾。

加入者伝送系への応用検討の例としては、CATV 映像分配システムの検討がある⁽⁶⁷⁾⁽⁶⁸⁾。 $40\sim 60\text{ ch}$ の

表 1 光ファイバ増幅器の特性
EDFA ($1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯) と PDFA ($1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯) の特性比較

	EDFA ($1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯)		PDFA ($1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯)	
	トップデータ	モジュール	トップデータ	モジュール
増幅利得 (dB)	54 (中間アイソレータ)	~40	38.2	28.3
飽和出力 (dBm)	24.6	~24	24.0	13.0
帯域 (nm)	40 (Si-Al-P 系)	40 (Si-Al-P 系)	38	21
雑音指数 (dB)	3.1 (中間アイソレータ)	~4 ($0.98\text{ }\mu\text{m}$ 励起)	3.4	3.4
利得係数 (dB/mW)	11.0	~5	0.2	~0.15

CATV 映像信号を EDFA で増幅 (ブースタンプとインラインアンプ) し、16 の受信者に分配する実験が報告されている。

5. 今後の展開

以上述べたように、光増幅器は光ファイバ増幅器を中心として、近年、目覚ましい進歩を遂げ、数 100 GHz の高速応答、 50 dB 以上の増幅率、さらに 200 個以上の多段増幅など、増幅特性自体は、電気増幅器をすでにしのぐものとなっている。したがって、今後、次世代光通信のキーデバイスとして、中・長距離光伝送、CATV 光伝送、光 LAN などの光ファイバ通信系への導入が活発に進められるとともに、光計測などへの適用も検討されと考えられる。

一方、光増幅器の開発については、EDFA ($1.5\text{ }\mu\text{m}$) と PDFA ($1.3\text{ }\mu\text{m}$) の光ファイバ増幅器を先頭に、他の波長帯の光ファイバ増幅器、半導体レーザ増幅器、導波路型増幅器⁽⁶⁹⁾などの開発が進められると考えられる。特に、EDFA については、実用化を目前として高信頼化や低価格化の検討が、また PDFA については、さらに特性を向上するための研究開発が活発に進められると考えられる。表 1 は、EDFA と PDFA の現在までに得られている特性をまとめたものであるが、PDFA については、利得係数特性の改善が急務であることがわかる。

半導体レーザ増幅器では、光集積回路への適用も検討されることになると考えられる。また、EARS などの光増幅・光処理素子では、光の並列処理性を生かした光交換などへの適用も予想される。いずれにしても、光増幅器は、今後の光技術の中での重要性をますます増すものと考えられる。

(平成 5 年 8 月 30 日受付)

文 献

- (1) T. H. Maiman: "Stimulated Optical Radiation in Ruby", *Nature*, **187**, 493 (1960)
- (2) J. W. Crow & R. M. Craig: *Appl. Phys. Lett.*, **6**, 45 (1965)
- (3) C. J. Koester & E. Snitzer: "Amplification in a fiber laser", *Appl. Opt.*, **3**, 1182 (1964)
- (4) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, & D. N. Payne: "High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54 μm ", *Technical Digest of OFC/IOOC'87* (Reno Nevada, CA), p. 167 (1987)
- (5) 向井・斎藤・三上: 「1.5 μm 帯 InGaAsP 共振形レーザ増幅器」信学誌, **J69-C**, 421 (昭61)
- (6) T. Saitoh & T. Mukai: "1.5 μm GaInAsP traveling-wave semiconductor laser amplifier", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23**, 1010 (1987)
- (7) M. Koga & T. Matsumoto: "High-gain polarization-insensitive optical amplifier consisting of two serial semiconductor laser amplifier", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9**, 284 (1991)
- (8) N. Edagawa, K. Mochizuki & Y. Iwamoto: "Simultaneous amplification of wavelength-division-multiplexed signals by a highly efficient fiber Raman amplifier pumped by high-power semiconductor lasers", *Electron. Lett.*, **23**, 196 (1987)
- (9) 枝川・望月: 「光ファイバラマン増幅」レーザー研究, **17**, 616 (平元)
- (10) C. G. Atkins, D. Cotter, D. W. Smith, & R. Wyatt: "Application of Brillouin amplification in coherent optical transmission", *Electron. Lett.*, **22**, 556 (1986)
- (9) C. Amano, S. Matsuo, & T. Kurokawa: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3**, 736 (1991)
- (10) D. A. B. Miller, D. S. Chemla, & T. C. Damen: "Novel hybrid optical bistable switch: The quantum well self-electro-optic effect device", *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 13 (1984)
- (11) E. Snitzer & R. Woodcock: "Yb³⁺-Er³⁺ galss laser", *Appl. Phys. Lett.*, **6**, 45 (1965)
- (12) E. Snitzer: *Ceram. Bull.*, **52**, 516 (1971)
- (13) 特願昭50-73908
- (14) 特許第1171723号, 特許第1450629号,
- (15) S. B. Poole, D. N. Payne, & M. E. Fermann: "Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions", *Electron. Lett.*, **21**, 737 (1985)
- (16) R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, & D. N. Payne: "Neodymium-doped silica single-mode fiber lasers", *Electron. Lett.*, **21**, 738 (1985)
- (17) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, & D. N. Payne: "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm ", *Electron. Lett.*, **23**, 1026 (1987)
- (18) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, & B. C. McCollum: "Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μm with pump at 1.49 μm and Yb sensitized oscillator", *Technical digest of OFC'88* (TX, UAS), PD2 (1988)
- (19) 霜田・矢島: 量子エレクトロニクス (昭47) 裳華房
- (20) M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi, T. Takeshita, & M. Okayasu: "Erbium-doped fiber amplifiers with an extremely high gain coefficient of 11.0 dB/mW", *Electron. Lett.*, **26**, 1641 (1990)
- (21) R. I. Laming, S. B. Poole, & E. J. Tarbox: "Pumpexcited-state absorption in erbium-doped fibers", *Opt. Lett.*, **13**, 1084 (1988)
- (22) M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi, & E. Sugita: "Concentration effect on optical amplification characteristics of Er-doped silica single-mode fibers", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **2**, 43 (1990)
- (23) S. Yamashita & T. Okoshi: "Improvement of erbium-doped fiber amplifier characteristics by insertion of a "midway" isolator", *Technical Digest of OEC'92* (Makuhari, Japan), p. 286 (1992)
- (24) M. N. Zervas, R. I. Laming, & D. N. Payne: "Efficient erbium-doped fiber amplifier with an integral isolator", *Technical Digest of OAA'92* (New Mexico, USA), p. 162 (1992)
- (25) R. I. Laming, M. N. Zervas, & D. N. Payne: "Erbium-doped fiber amplifier with 54 dB gain & 3.1 dB noise figure", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **4**, 1345 (1992)
- (26) S. L. Hansen, K. D. Dybdal, & C. C. Lasen: "Gain limit in erbium-doped fiber amplifiers due to internal Rayleigh backscattering", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **4**, 559 (1992)
- (27) W. J. Miniscalco: "Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1500 nm", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9**, 234 (1991)
- (28) M. Yamada, M. Shimizu, M. Horiguchi, M. Okayasu, & E. Sugita: "Gain characteristics of an Er³⁺-doped multicomponent glass single-mode optical fiber", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **2**, 656 (1990)
- (29) 清水・曲・和田・大石: "光アンプの研究", NTT R & D, **41**, 389 (平5)
- (30) M. Tachibana, R. I. Laming, P. R. Morkel, & D. N. Payne: "Gain-shaped erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with broad spectral bandwidth", *Technical digest of OAA'90* (CA, USA), p. 44 (1990)
- (31) V. L. da Silva, Y. Silberberg, J. S. Wang, E. L. Goldstein, & M. J. Andrejco: "Automatic gain flattening in Er-doped-fiber amplifier", *Technical digest of OFC/IOOC'93* (CA, USA), p. 174 (1993)
- (32) W. L. Barnes, S. B. Poole, J. E. Townsend, L. Reekie, D. J. Taylor, & D. N. Payne: "Er³⁺-Yb³⁺ and Er³⁺-doped fiber lasers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **7**, 1461 (1989)
- (33) S. G. Grubb, W. H. Humer, R. S. Cannon, S. W. Vendetta, K. L. Sweeney, P. A. Leilabady, M. R. Keur, J. G. Kwasegroch, T. C. Munks, & D. W. Anthon: "+24.6 dBm output power Er/Yb codoped optical amplifier pumped by diode-pumped Nd: YLF laser", *Electron. Lett.*, **28**, 1275 (1992)
- (34) M. C. Brierley & C. A. Millar: "Amplification and lasing at 1350 nm in a neodymium doped fluorodirconate fiber", *Electron. Lett.*, **24**, 438 (1988)
- (35) Y. Miyajima, T. Komukai & T. Sugawa: "1.36 μm optical amplification in Nd³⁺-doped fluorodirconate fiber", *Electron. Lett.*, **26**, 194 (1990)
- (36) M. C. Brierley, S. Carter, & P. France: "Amplification and in the 1300 nm telecommunication window in a Nd-doped fluoride fiber", *Electron. Lett.*, **26**, 329 (1990)
- (37) Nd³⁺-doped fluoroberyllate glasses for fiber amplifier at 1300 nm", *Technical Digest of OAA'92* (New Mexico, USA), p. 12 (1992)
- (38) G. M. Davis, I. Yokohama, S. Sudo, & K. Kubodera: "1.3 μm Nd: YAG crystal fiber amplifiers", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **3**, 459 (1991)
- (39) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, S. Takahashi, E. Snitzer, & G. H. Sigel, Jr.: "Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operating at 1.31 μm ", *Technical Digest of OFC'91* (CA, USA) PD2 (1991)
- (40) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, S. Takahashi, E. Snitzer, & G. H. Sigel, Jr.: "Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operating at 1.31 μm ", *Opt. Lett.*, **16**, 1747 (1991)
- (41) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Nishi, & S. Takahashi: "A high gain, high output saturation power Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operating at 1.31 μm ", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **3**, 715 (1991)
- (42) Y. Ohishi, T. Kanamori, J. Temmyo, M. Wada, M. Yamada, M. Shimizu, K. Yoshino, H. Hanafusa, M. Horiguchi, & S. Takahashi: "Laser diode pumped Pr³⁺-Yb³⁺-codoped fluoride fiber amplifier operating at 1.3 μm ", *Electron. Lett.*, **27**, 1995 (1991)
- (43) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Nishi, S. Takahashi, & E. Snitzer: "Concentration effect on gain of Pr³⁺-doped fluoride fiber for 1.3 μm amplification", *IEEE Photo.*

- Technol. Lett.*, **4**, 1338 (1992)
- (44) M. Shimizu, T. Kanamori, J. Temmyo, M. Wada, M. TYamada, Y. Terunuma, Y. Ohishi, & S. Sudo: "28.3 dB gain Pr-doped fluoride fiber amplifier module pumped by 1.017 μm InGaAs-Lds", *Technical digest of OFC/IOOC'93* (CA, USA), PD12 (1993)
 - (45) Y. Miyajima, T. Sugawa, and Y. Fukasaku: "38.2 dB amplification at 1.31 μm and possibility of 0.98 μm pumping in Pr³⁺-doped fluoride fiber", *Electron. Lett.*, **27**, 1706 (1991)
 - (46) Y. Nishida, Y. Ohishi, T. Kanamori, Y. Terunuma, K. Kobayashi, & S. Sudo: "Preparation of Pr³⁺-doped InF₃-based fluoride single-mode fibers and demonstration of 1.3 μm amplification", *Technical digest of ECOC'93* (Montreux, Switzerland), TuC3.1, (1993)
 - (47) P. C. Becker, M. M. Broer, V. C. Lambrecht, A. J. Bruce, & C. Nykolak: "Pr³⁺: La-Ga-S glass: A promising material for 1.3 μm fiber amplification", *Technical digest of OAA'92* (New Mexico, USA), PD5 (1992)
 - (48) M. A. Newhouse, R. F. Bartholomew, B. G. Aitken, A. L. Sadd, & N. F. Borrelli: "309 μs Pr excited state lifetime observed in a mixed halide glass", *Technical digest of OAA'92* (New Mexico, USA), PD16 (1992)
 - (49) T. Whitley, R. Wyatt, D. Szebesta, S. Davey, & J. R. Williams: "Quarter watt output at 1.3 μm from an efficient praseodymium doped fluoride fiber amplifier pumped with a diode-pumped Nd: YLF laser", *Technical digest of OAA'92* (New Mexico, USA), PD4 (1992)
 - (50) T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, & Y. Miyajima: "1.47 μm band Tm³⁺ doped fluoride fiber amplifier using a 1.064 μm upconversion pumping scheme", *Electron. Lett.*, **29**, 110 (1993)
 - (51) 阪本・清水・大石・金森・照沼・須藤: "Tm³⁺-Ho³⁺-Eu³⁺ 共添加フッ物光ファイバの1.4 μm 帯光増幅特性", 1993年第54回応用物理学会学術講演会予稿集
 - (52) J. F. Massicot, R. Wyatt, & B. J. Ainslie: "Low noise operation of Er³⁺ doped silica fiber amplifier around 1.6 μm ", *Electron. Lett.*, **28**, 1924 (1992)
 - (53) I. Sankawa, H. Izumita, S. Furukawa, & K. Ishihara: "An optical amplifier for wide-wavelength range around 1.65 μm ", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **2**, 422 (1990)
 - (54) T. Sato, T. Horiguchi, Y. Koyama, & I. Sankawa: "A 1.6 μm band OTDR using a synchronous Raman fiber amplifier", *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **4**, 923 (1992)
 - (55) 石尾 (監修): 「光増幅器とその応用」(平4) オーム社
 - (56) Special Issue on Optical Amplifier, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9**, 2 (1991)
 - (57) *Technical digest of OFC/IOOC'93* (CA, USA)
 - (58) *Technical digest of OFC'92* (CA, USA)
 - (59) *Technical digest of OAA'93* (Yokohama, Japan)
 - (60) *Technical digest of OAA'92* (New Mexico, USA)
 - (61) H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, M. Suzuki, N. S. Bergano, C. R. Davidson, G. M. Homsey, D. J. Kalmus, P. R. Trischitta, D. A. Gray, & R. L. Maybach: "10 Gbit/s, 9000 km IM-DD transmission experiments using 274 Er-doped fiber amplifier repeaters", *Technical digest of OFC/IOOC'93* (CA, USA), PD1 (1993)
 - (62) S. Akiba: "Long-haul optical amplifier system engineering based on EDFA technology", *Technical digest of OAA'93* (Yokohama, Japan), p. 110 (1993)
 - (63) 島田: 「光伝送方式の研究の流れと今後の展開」NTT R & D, **2**, 221 (平2)
 - (64) 上川 (編): 「高度情報化社会の基盤テクノロジー (NTT出版)」p. 242 (平3)
 - (65) M. Nakazawa, E. Yamada, E. Kubota, & K. Suzuki: "10 Gb/s soliton transmission over one million kilometers", *Electron. Lett.*, **27**, 1270 (1991)

- (67) E. Yoneda, K. Kikushima, T. Tsuchiya, & K. Suto: "Erbium-doped amplifier for video distribution networks", *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, **7**, 1249 (1990)
- (68) K. Nakagawa, S. Nishi, K. Aida, & E. Yoneda: "Trunk and distribution network application of erbium-doped fiber amplifier", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **9**, 198 (1991)
- (69) T. Kitagawa, K. Hattori, K. Shuto, M. Yasu, M. Kobayashi, & M. Horiguchi: "Amplification in erbium-doped silica-based planar lightwave circuits", *Electron. Lett.*, **28**, 1818 (1992)

須藤 昭一

昭和49年金沢大学工学部電子工学科卒業。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。主として、光ファイバ製造技術の研究、光非線形デバイスの研究、半導体レーザ波長安定化技術の研究、光ファイバ増幅器の研究に従事。昭和57年工学博士(東京大学)。昭和61年~62年スタンフォード大学客員研究員。現在、NTT光エレクトロニクス研究所、主幹研究員。昭和54年電子通信学会学術奨励賞。昭和56年電子通信学会論文賞。昭和57年日本電信電話公社総裁表彰ならびに梶井賞。電子情報通信学会、応用物理学会、IEEE会員(Senior Member)

大石 泰文

昭和53年東北大理学部物理卒業。昭和55年同大学院修士課程修了。55年日本電信電話公社(現NTT)茨城電気通信研究所入所。以来、赤外光ファイバの研究に従事。現在、NTT光エレクトロニクス研究所光材料研究部主幹研究員。工学博士。電子情報通信学会、応用物理学会、IEEE会員。

清水 誠

昭和56年電気通信大学電気通信学部電子工学卒業。58同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。以来、石英系光ファイバの製造技術、光ファイバ増幅器の開発に従事。現在、NTT光エレクトロニクス研究所主任研究員。電子情報通信学会、応用物理学会、IEEE会員。