

# 光ファイバ増幅器開発の現状

— 原理、歴史から最近の状況まで —

NTT光エレクトロニクス研究所

須藤 昭一

## Current Developments in Optical Fiber Amplifiers

— Principle, Historical Background, and Recent Progress —

Shoichi Sudo

NTT Opto-electronics Laboratories

### Abstract

Since the realization of the EDFA in 1987, rapid and remarkable progress has been made in fiber amplifier technology. This progress has been far beyond almost all estimations. At the same time, the advent of fiber amplifiers has initiated numerous changes in optical communication systems and optical equipment. Such changes continue to be made. This paper describes current developments in optical fiber amplifiers with reference to the principle, historical background, and recent progress of fiber amplifier technology.

### 1. はじめに

最近、長い間の夢であった低雑音で高利得な光増幅器が実現された。光ファイバ増幅器である。また、この光増幅器を使った新しい光通信システムが、ここ数年の間に次々と研究開発され、低損失ファイバや半導体レーザの開発時に匹敵する大きな技術革新を光伝送システムや光計測、等、様々な光技術の分野にもたらしつつある。

こうした急速な光ファイバ増幅器技術の展開は、光ファイバ通信技術の成長で蓄積された光ファイバ技術や半導体レーザ技術などが基本となって達成されたものと言えるが、そこにはまた、パッシブファイバ技術からアクティブファイバ技術への遷移の歴史があり、ホストガラス

と増幅活性イオンの面白い相関関係が見られる。

本稿では、光ファイバ増幅器の原理と特性、簡単な歴史や最新の研究開発状況、さらにホストガラスと光増幅特性の関係などをごく簡単に紹介、解説する。

### 2. 光ファイバ増幅器の原理と歴史

トランジスタや真空管等の電気信号の増幅器では、電子と電子、電子とホールとの直接の相互作用（クーロン相互作用）を利用するため、信号の増幅は比較的簡単な構成で行えるが、電気（電子）と違って、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なわれる。即ち、光入射、等によって励起された活性イオン等の電子系に、増幅したい信号光を作用させ、励起された電子系のエネルギーを光に変換することによって、信号光が増幅さ

れる。この光増幅の具体的方法は2つに大別される。

(1) 誘導放出を利用する方法、

(2) 非線形光学効果を利用する方法、

である。さらに、(1)の方法には、電流注入によって励起する（反転分布を形成する）方法と光によって励起する方法とがあり、(2)の方法には、誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱、光パラメトリック増幅等を利用する方法がある。光ファイバ増幅器は、この中で、誘導放出を利用し、かつ光によって励起する方法に属する。

図1は光ファイバ増幅器の構成と原理図である。図に示す通り、希土類イオンを添加した光ファイバを光増幅媒体として使用し、これに信号光と励起光を入射し、光励起された希土類イオンに信号光を作用させて、誘導放出を起こし、信号光を増幅するものである。構成と原理は、図に示すとおり簡単であるが、実はこうした構成の光ファイバ増幅器が開発されるまでに約20年が経過している。そこで、次に、その経過を簡単に振り返っておきたい。

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年代初頭のレーザ（LASER: Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation）の発明直後まで遡る。1964年、米国のSnitzerらは $\text{Nd}^{3+}$ イオンを添加したファイバ（多成分ガラ

ス）による $1.06\mu\text{m}$ の光増幅実験<sup>(1)</sup>や $\text{Yb}^{3+}$ - $\text{Er}^{3+}$ 添加ガラスレーザのパルス発振（ $1.54\mu\text{m}$ ）に成功<sup>(2)</sup>している。図2は、1960年代の光ファイバ増幅器の構成図である。この構成においては、ファイバ内に添加された $\text{Nd}^{3+}$ イオンの量子効率が悪かったものの、励起光は広いスペクトルのフラッシュランプであったために励起効率は高くなく、またファイバ作製技術が未成熟であったためホストファイバの損失も大きく、結果として、性能のよい光ファイバ増幅器は実現されなかった。その後、約20年間、通信用の光ファイバ技術と光通信技術については目覚ましい研究の進展があったが、一方の光ファイバ増幅技術については、希土類イオンを添加したファイバ作製法についての発明等はあるものの、現在の光ファイバ増幅器の開発に直接結びつく進展は見られなかった。

石英系光ファイバ技術が成熟し、研究の展開が機能性ファイバの方向へ移った1985年、英国サザンプトン大学のSimon Pooleらは、MCVD法（Modified Chemical Vapor Deposition Method, 光ファイバ作製法の1つ）を改良し、希土類イオンを添加した石英系ファイバ作製法を開発<sup>(3)</sup>すると共に $\text{Nd}^{3+}$ 添加ファイバによるレーザ発振の実験を行なった。図3に示すMCVD法を改良した希土類添加ファイバの作製法<sup>(3)</sup>は、ホストファイバの低損失化の点で大変優れた方法であり、パッシブファイバ技術からアクティブファイバ技術への移行を可能にしたまさに画期的な技術開発と言える。そして1987年

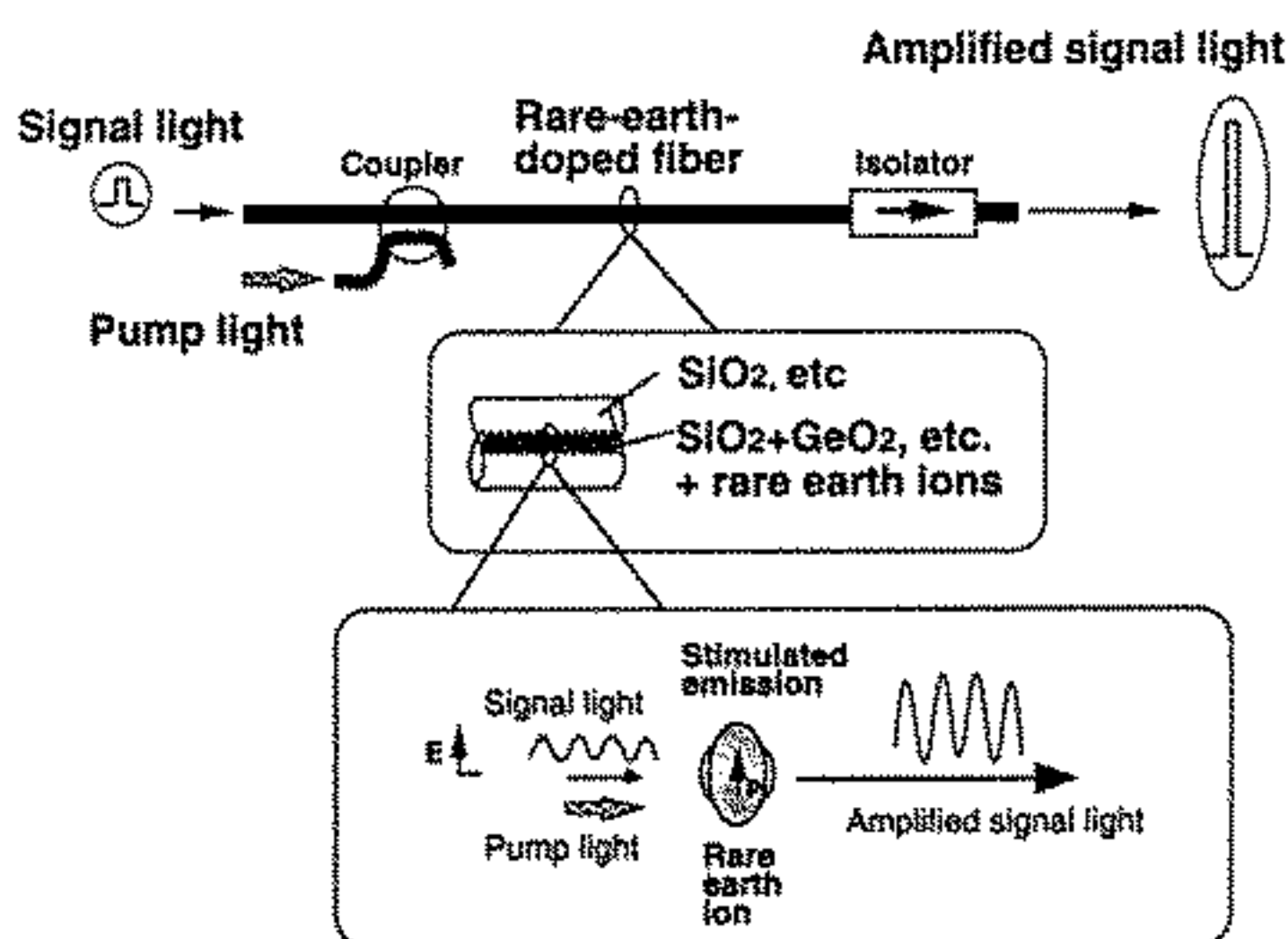


Fig.1 Configuration and principle of optical fiber amplifier

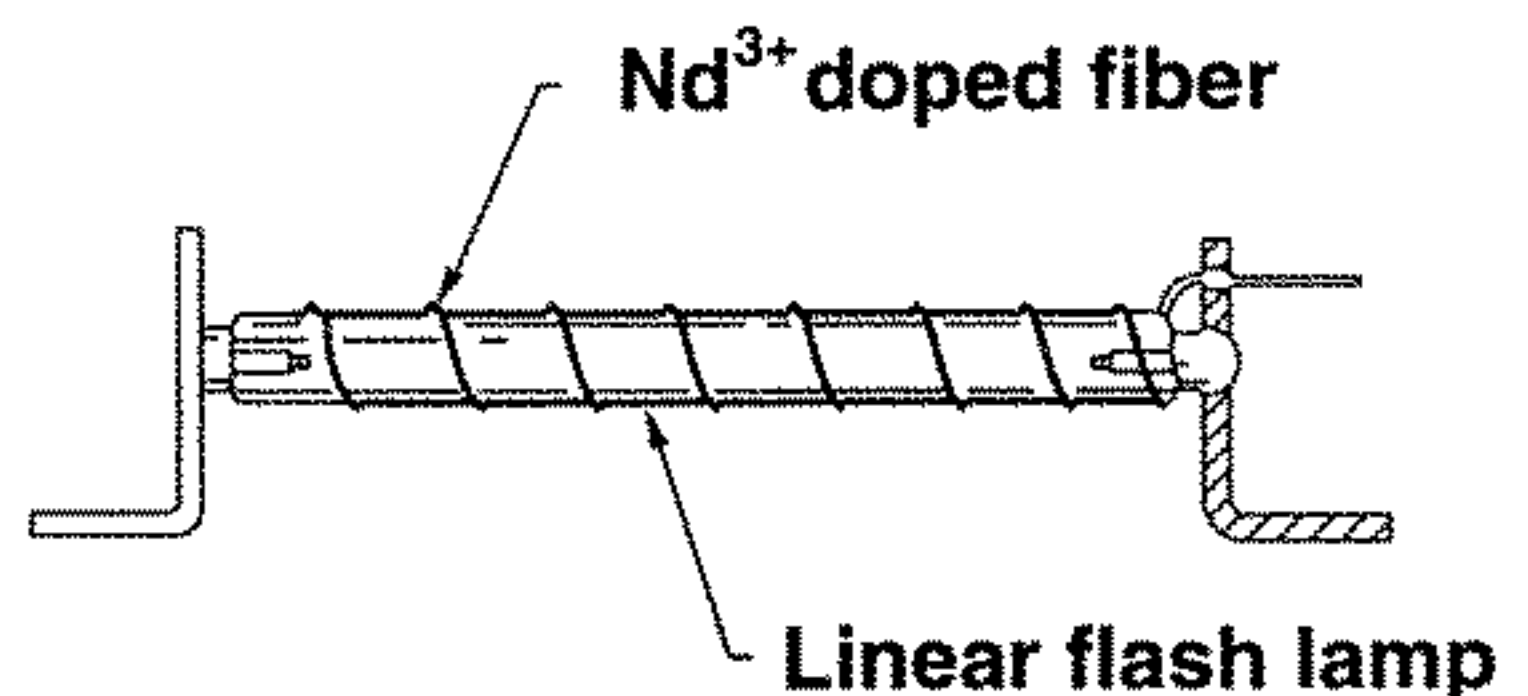


Fig.2 Configuration of optical fiber amplifier in the 1960's

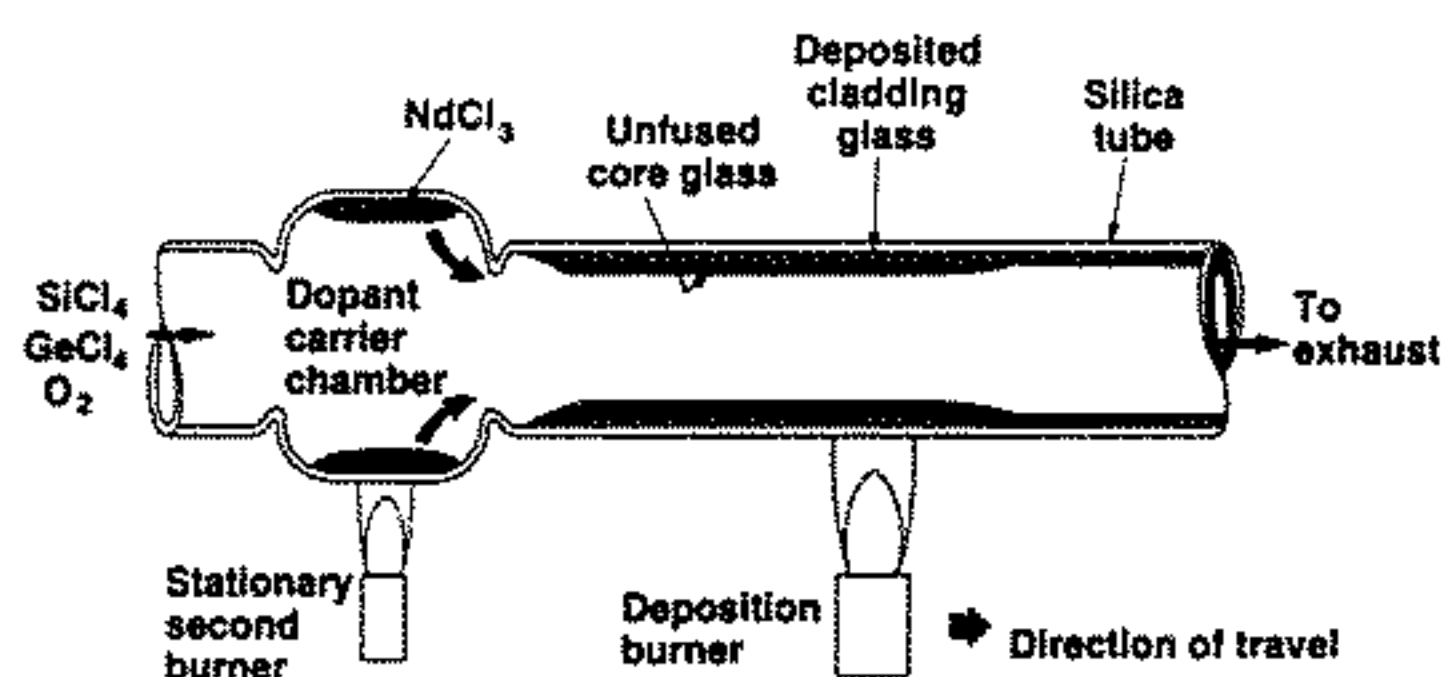


Fig.3 Schematic diagram of rare-earth-ion doped fiber preform fabrication by the MCVD method

Pooleの同僚Mearsらは、この方法によって作製した $\text{Er}^{3+}$ イオン添加ファイバによって $1.55\mu\text{m}$ 帯の光増幅実成功した<sup>(4)</sup>。この成功は、光ファイバ増幅器開発における最大のブレークスルーと言えるものである。筆者は、最近Poole氏と雑談した際、「なぜ初めからErをやらなかったのか」と聞いた。すると、Poole氏は「Erは3準位系で反転分布の形成に大きな励起パワーが必要で、レーザ発振や光増幅が難しく、したがって“Erの研究はa waste of timeである”が専門家の常識であった。我々もこの常識をすぐには乗り越えられなかった。」との説明であった。しかし、Poole氏らによって作製されたEr添加ファイバの優れた特性と狭いスペクトルのレーザ光による効率の良い励起法は、このErの3準位系としてのハンデを完全に埋め合わせるものであった。換言すれば、成熟した光ファイバ技術とレーザ励起法が、“Erは筋が悪い”という固体レーザ技術の常識を完全に覆したのであるとも言え、なかなか教訓的な経緯であると思える。事実、現在、“Erは筋が悪い、Erはa waste of timeである”という意見は、少なくとも光ファイバ増幅器の関係者からはまったく聞かれない。それどころか、“Erは天からの恵み、これほどすばらしい性質の活性イオンはない”という見解が常識となりつつあることは大変興味深い。新たな常識の誕生であると言える。さらに、思い起こせば、経緯はともかく、1960年の最初のレーザ発振も4準位系ではなく、3準位系のルビーレーザで実現されている。何

とも興味深い歴史的めぐり合わせを感じる。

このErによる $1.5\mu\text{m}$ 帯での光増幅の成功が契機となって、光ファイバ増幅器の研究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、1988年にSnitzerらによって、半導体レーザが使用可能な $1.49\mu\text{m}$ の波長で $\text{Er}^{3+}$ を励起する方法が開発されたことも<sup>(5)</sup>、活発な研究開発に一層拍車をかけることとなった。

### 3. 希土類活性イオンと増幅波長

一般に $\text{Tm}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$ 、 $\text{Er}^{3+}$ 、等の希土類イオンは、6s電子が2個、4f電子が1個、合計3個の電子が抜けた電子配置をしており、励起順位は4f電子（例えば、 $\text{Pr}^{3+}$ イオンでは2個の4f電子）によって決まる。図4は、2個の4f電子を持つ $\text{Pr}^{3+}$ イオンのエネルギー準位を模式的に示したものである。図4で左端に示した中心力場の1電子近似の場合のエネルギー準位は、まず2個の4f電子同士の電気的相互作用によって、異なったエネルギー準位に分かれ、スピノー軌道相互作用によってさらに異なったエネルギー準位に分離される。こうして分離された各エネルギー準位は、一般に図に示すような項記

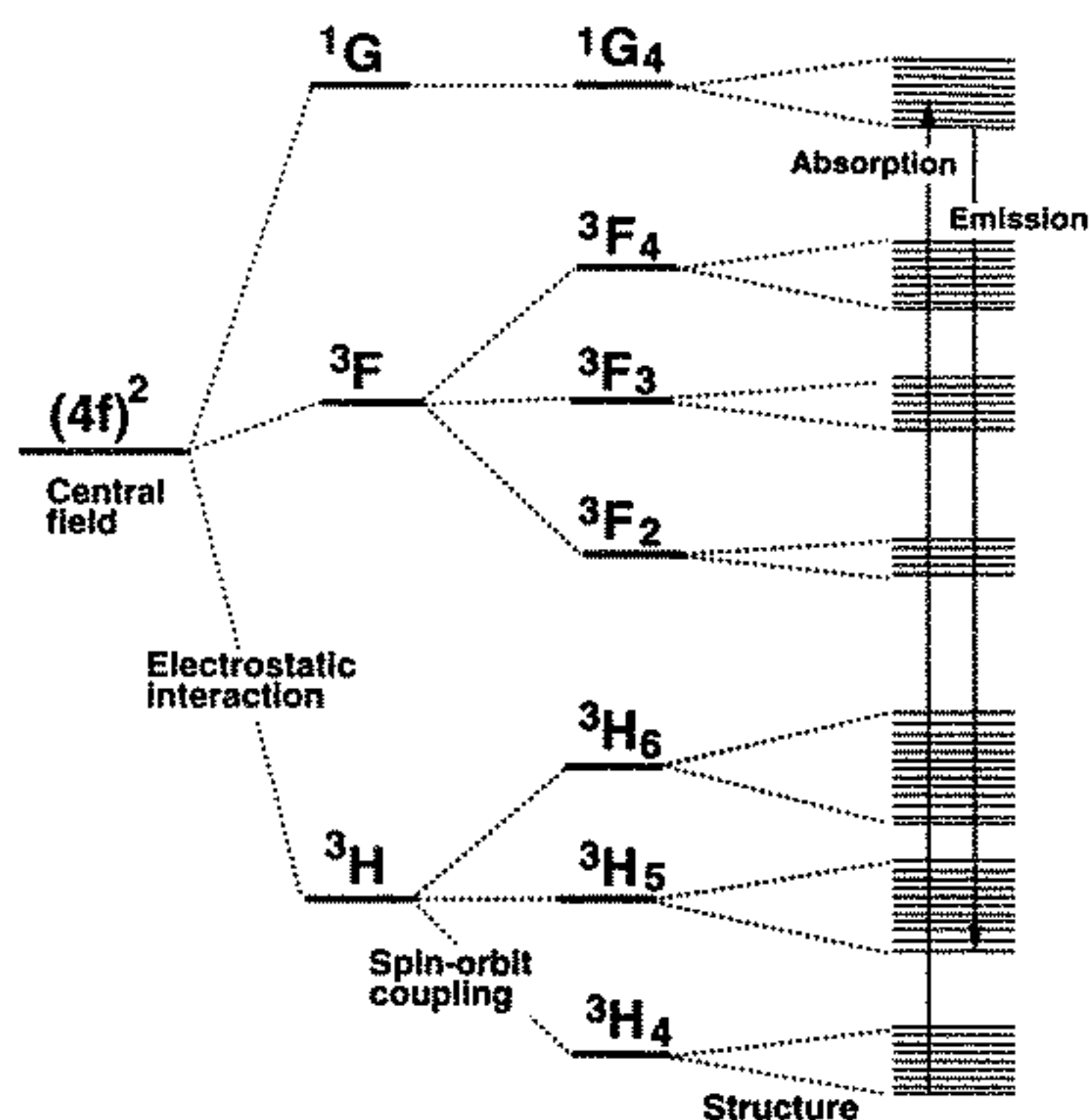


Fig.4 Energy diagram illustration of  $\text{Pr}^{3+}$  ion with two 4f electrons

号で表される。そして、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、さらにエネルギー準位は分裂する（シュタルク分裂）。この場合、シュタルク分裂のレベルはイオンの周囲の電場の強さやホストの原子配列等によってことなり、いわゆる不均一広がりを与える。さらに、原子の熱運動による結晶場の振動等は、エネルギーレベルにいわゆる不均一広がりを与えることとなる。従って、 ${}^1G_4$ 等で示される各エネルギー準位は、重なり合った微細レベルより形成されることとなる。光増幅を可能とする誘導放出遷移はこうしたエネルギー準位間で生じ、従って増幅できる光の波長は遷移するエネルギー準位の間隔で決まることとなる。また、シュタルク分裂や不均一広がり、均一広がり、等によって決まる各エネルギー準位の幅は、増幅波長幅を与えることとなる。

図5は、光ファイバの損失特性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<sup>(6)</sup>。今述べた通り、図5で発光波長帯の位置は誘導放出遷移のエネルギー準位間隔で決まり、発光波長帯の幅はシュタルク分裂や不均一広がり、均一広がりによって決まるものである。したがって、この発光波長帯は、ホストガラスの種類によって異なるものとなると共に、蛍光強度（蛍光寿命）もホストガラスの種類によって変わることとなる。現在、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の光増幅器には $\text{Er}^{3+}$ イオンが、 $1.3\mu\text{m}$

帯の光増幅には $\text{Pr}^{3+}$ イオンが、そして $1.4\mu\text{m}$ 帯と $1.6\mu\text{m}$ 帯の光増幅には $\text{Tm}^{3+}$ イオンが用いられている。

#### 4. 光ファイバ増幅器の諸特性とホスト ガラスファイバ

光ファイバ増幅器を実際に使用する場合、次のような様々な特性、性能が求められる。

- (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。従って、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。本節では、 $\text{Er}^{3+}$ を活性イオンとした $1.5\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器（EDFA；Erbium-Doped Fiber Amplifier）と $\text{Pr}^{3+}$ を活性イオンとした $1.3\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器（PDFA；Praseodymium-Doped Fiber Amplifier）を中心に、研究開発の一端を紹介する。

図6は、 $\text{Er}^{3+}$ イオンと $\text{Pr}^{3+}$ イオンのエネルギー準位図である。 $\text{Er}^{3+}$ イオンの場合、励起は $0.98\mu\text{m}$ または $1.48\mu\text{m}$ の光で行い、 ${}^4I_{13/2}$ 準位から ${}^4I_{15/2}$ 準位への遷移によって $1.5\mu\text{m}$ 帯の

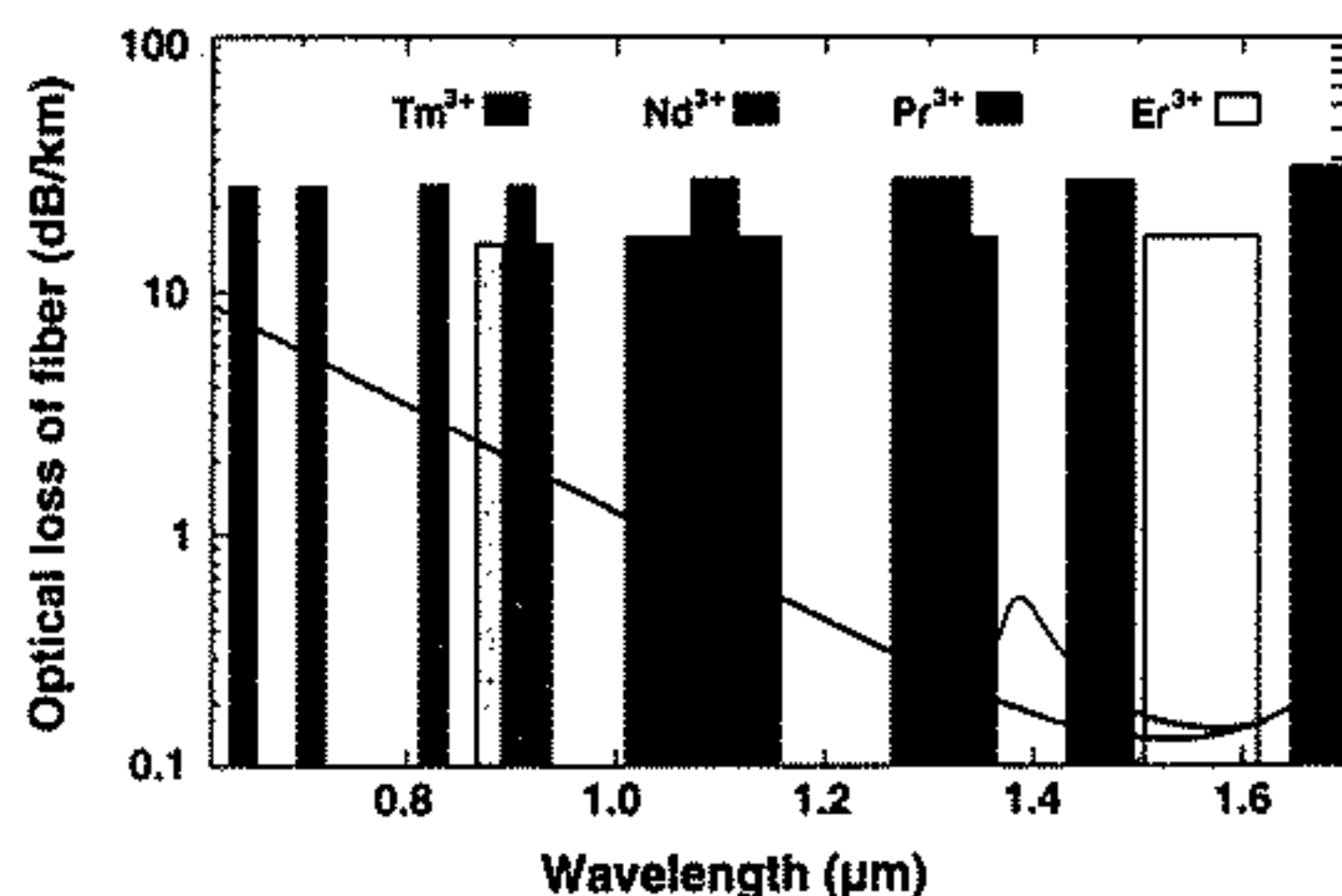


Fig. 5 Loss characteristics of optical fluorescence wavelength bands of main rare earth ions doped in glasses

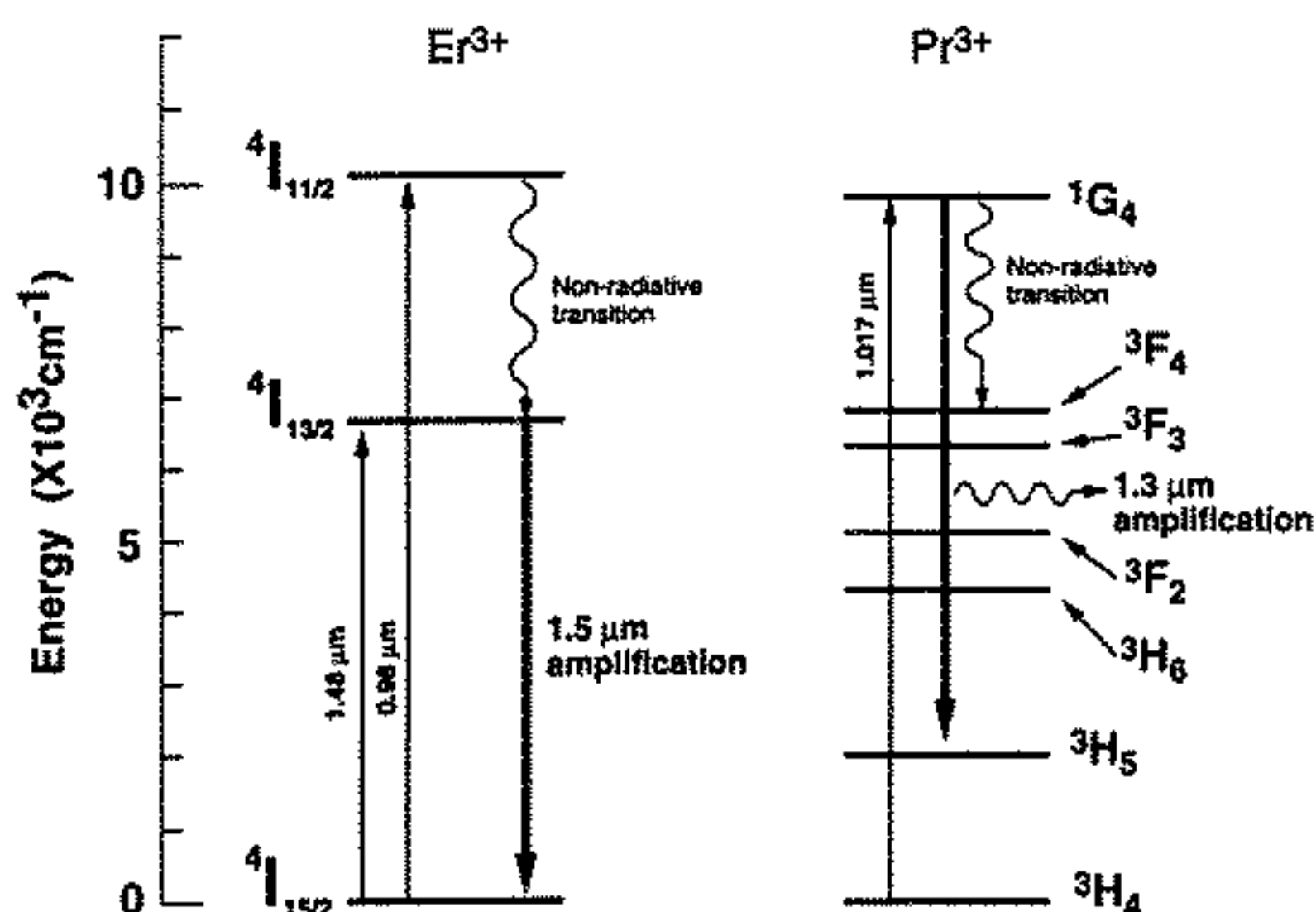


Fig. 6 Energy diagram of  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Pr}^{3+}$  ions



光を増幅するものである。図7は、 $\text{Er}^{3+}$ イオンを添加したフッ化物ガラスファイバを増幅用ファイバとし、 $1.48\mu\text{m}$ で励起した $1.5\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器（EDFA）の増幅波長特性である<sup>(7)</sup>。小信号（ $-40\text{dBm}$ ； $0.1\mu\text{W}$ ）入力の場合の最大利得は $42\text{dB}$ 、大信号（ $-5\text{dBm}$ ）入力の場合は $23\text{dB}$ で、最大出力は $18\text{dBm}$ である。また、高利得が得られる波長域は $1.53\mu\text{m}$ から $1.56\mu\text{m}$ までの $30\text{nm}$ と広く、周波数に換算すると約 $3.77\text{THz}$ となる。また、増幅器全体での雑音指数(NF: Noise Figure)は $5\text{dB}$ ～ $6\text{dB}$ である。さらに、高速光信号に対しては数 $100\text{GHz}$ まで増幅可能である。即ち、光ファイバ増幅器の場合、2節の原理で説明したように、極めて高速で応答する誘導放出（電子遷移）によるコヒーレント（同位相）なエネルギー増幅であるため、低速な光信号から超高速な光信号まで、低い雑音レベルで増幅することが可能である。これは、トランジスタや真空管による電気信号の増幅が、通常、交流信号の等価増幅であるのと基本的に異なる点であると言える。

図8は、 $\text{Pr}^{3+}$ イオンを添加したフッ物ガラスファイバを増幅用ファイバとした $1.3\mu\text{m}$ 帯光

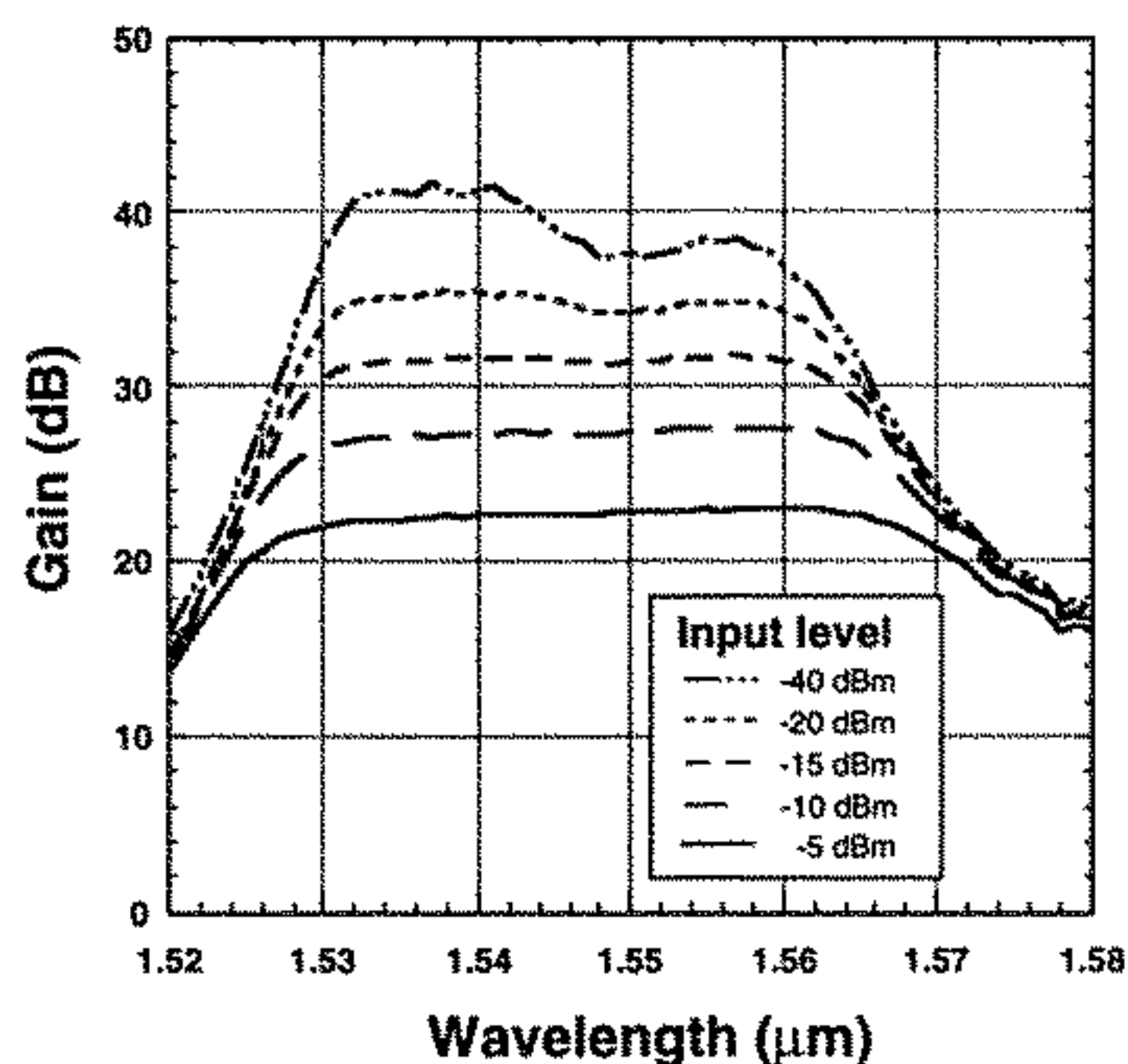


Fig.7 Gain spectra of  $1.5\mu\text{m}$ -band optical fiber amplifier (Fluoride fiber host)

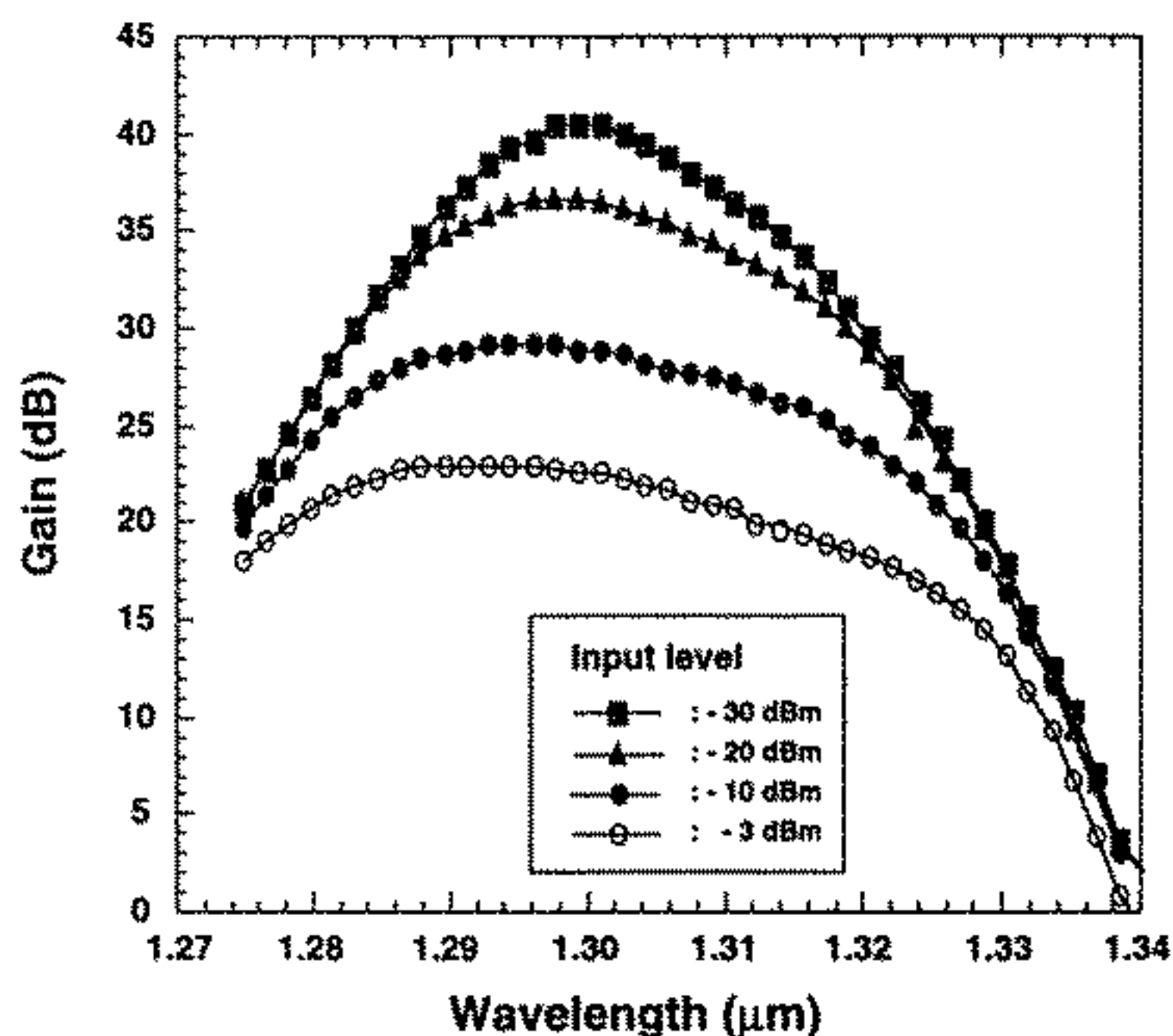


Fig.8 Gain spectra of  $1.3\mu\text{m}$ -band optical fiber amplifier (Fluoride fiber host)

ファイバ増幅器（PDFA）の増幅波長特性である<sup>(8)</sup>。小信号（ $-30\text{dBm}$ ）入力の場合の最大利得は、同じく $42\text{dB}$ 程度であり、大信号（ $-3\text{dBm}$ ）入力の利得は $23\text{dB}$ で、最大出力は $20\text{dBm}$ である。また、高利得が得られる波長域は $1.285\mu\text{m}$ から $1.315\mu\text{m}$ までの約 $30\text{nm}$ である。また、増幅器全体での雑音指数も $5\text{dB}$ ～ $6\text{dB}$ と先の $1.48\mu\text{m}$ 励起EDFAと同等である。もちろん、高速光信号に対する増幅特性についても違いはない。

次に、光ファイバ増幅器の増幅特性とホストガラスファイバの関係で重要なことを、2、3点補足したい。まず、前節でのべたように、ホストガラスの種類によって発光・増幅特性が異なることである。図9は、フッ化物ガラス（ZBLAN）、Al添加石英ガラス（ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）、純粋石英ガラス（ $\text{SiO}_2$ ）の3種類のホストガラスに添加した $\text{Er}^{3+}$ イオンの発光特性である。ホストガラスによって、発光特性が異なり、フッ化物ガラスホストの場合、 $\text{Er}^{3+}$ イオンは広い発光特性を示す。また、Al添加石英ガラスホストと純粋石英ガラスホストでも、発光特性は微妙に異なる。こうした発光特性の違いが、 $1.5\mu\text{m}$ 帯EDFAの増幅波長特性の違い、即ち増

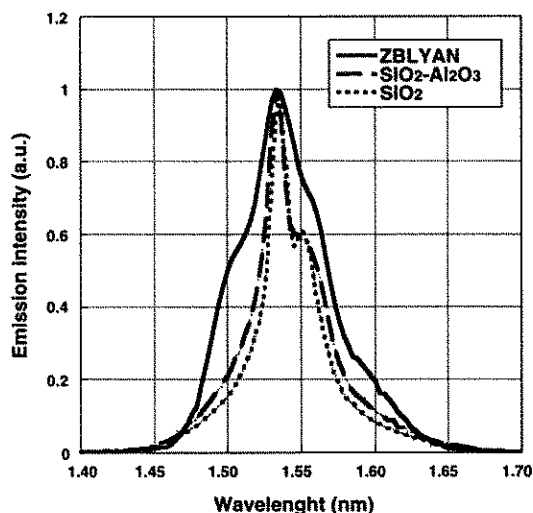


Fig. 9 Host glasses and Fluorescence of  $\text{Br}^{3+}$  ion

幅率の波長依存性の違いとなり、システム応用上重要な要素となる。特に、波長多重伝送システムや多段長距離伝送においては、重要な特性を与えることとなる。

1.3  $\mu\text{m}$ 帯PDF Aにおけるホストガラスと活性イオンの関係は、1.5  $\mu\text{m}$ 帯EDFAの場合よりも重大である。即ち、図6に示したように、 $\text{Br}^{3+}$ の場合、遷移の始単位 $^1\text{I}_{13/2}$ と終単位 $^1\text{I}_{15/2}$ の間に他のエネルギー単位はなく、 $^1\text{I}_{13/2}$ 単位の電子はすべて $^1\text{I}_{15/2}$ 単位へ落ちる (Branching Ratio=1.0) と共に、熱としてエネルギーが失われることもない (量子効率: 100%)。これに対して、 $\text{Pr}^{3+}$ の場合、遷移の始単位 $^1\text{G}_4$ と終単位 $^3\text{H}_5$ の間に複数の単位があるほか、エネルギー単位の間隔も狭い。この結果、 $^1\text{G}_4$ 単位の電子はすべて $^3\text{H}_5$ 単位へ落ちるとは限らない (Branching Ratio $\neq$ 1.0) 他、 $^1\text{G}_4$ 単位の電子の何割かはホストガラスの熱振動 (音子、Phonon) によってエネルギーを失って $^1\text{G}_4$ 単位からすぐ下の $^3\text{F}_4$ 単位へ落ちてしまい (多音子による無輻射遷移)、1.3  $\mu\text{m}$ 帯の光増幅に貢献しなくなる。このためPDF Aにおいては、ホストガラスとして、熱振動エネルギー

の小さいガラス (フッコガラス等) を使用することが必須となる。図10は、各種ホストガラスと $\text{Pr}^{3+}$ イオンの $^1\text{G}_4$ から $^3\text{F}_4$ への多音子による無輻射遷移の確率をまとめたものである<sup>(8)</sup>。図10からわかるように、ホストガラスとしてフォノンエネルギーの大きな石英ガラスを使用した場合とフォノンエネルギーの小さなフッコガラスを使用した場合とでは、 $^1\text{G}_4$ から $^3\text{F}_4$ への無輻射遷移確率 $W_{nr}$ が $10^3$ 倍程異なると共に、石英ガラスホストでは $^1\text{G}_4$ の蛍光寿命がnsecオーダーとなる。この結果、石英ガラスホストの場合、 $\text{Pr}^{3+}$ イオンは増幅活性イオンとしてほとんど動作せず、 $\text{Pr}^{3+}$ イオンを増幅活性イオンとして動作させるためには、フォノンエネルギーが $500\text{cm}^{-1}$ 程度より小さいホストガラスを使用する必要がある。従って、PDF A技術においては、増幅効率を向上するためにより小さなフォノンエネルギーのホストガラス (In系フッコガラスやカルコゲナイドガラス) の検討が進められている<sup>(10)</sup>。

また、1.5  $\mu\text{m}$ 帯EDFA、1.3  $\mu\text{m}$ 帯PDF Aに加えて、0.8  $\mu\text{m}$ 帯、1.4  $\mu\text{m}$ 帯、1.6  $\mu\text{m}$ 帯での光増幅が $\text{Tm}^{3+}$ イオンを使用して検討されており、1.65  $\mu\text{m}$ 帯では35dBの増幅利得が実現されている<sup>(11)</sup>。図11には、フッ化物ガラスホストと石英ガラスホストにおいてレーザ発振が報告されている希土類イオンとその動作波長を示す<sup>(12)</sup>。ホストガラスとして、フォノンエ

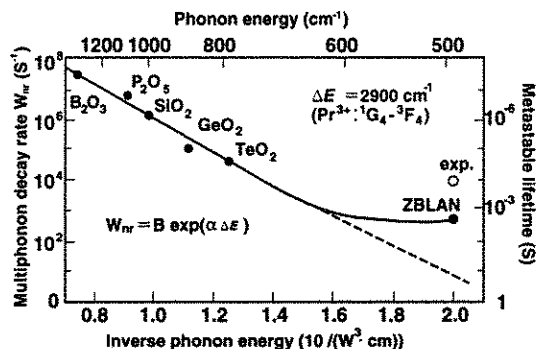


Fig. 10 Host glasses and multiphonon decay rate of  $\text{Pr}^{3+}$  ion from  $^1\text{G}_4$  from  $^3\text{F}_4$

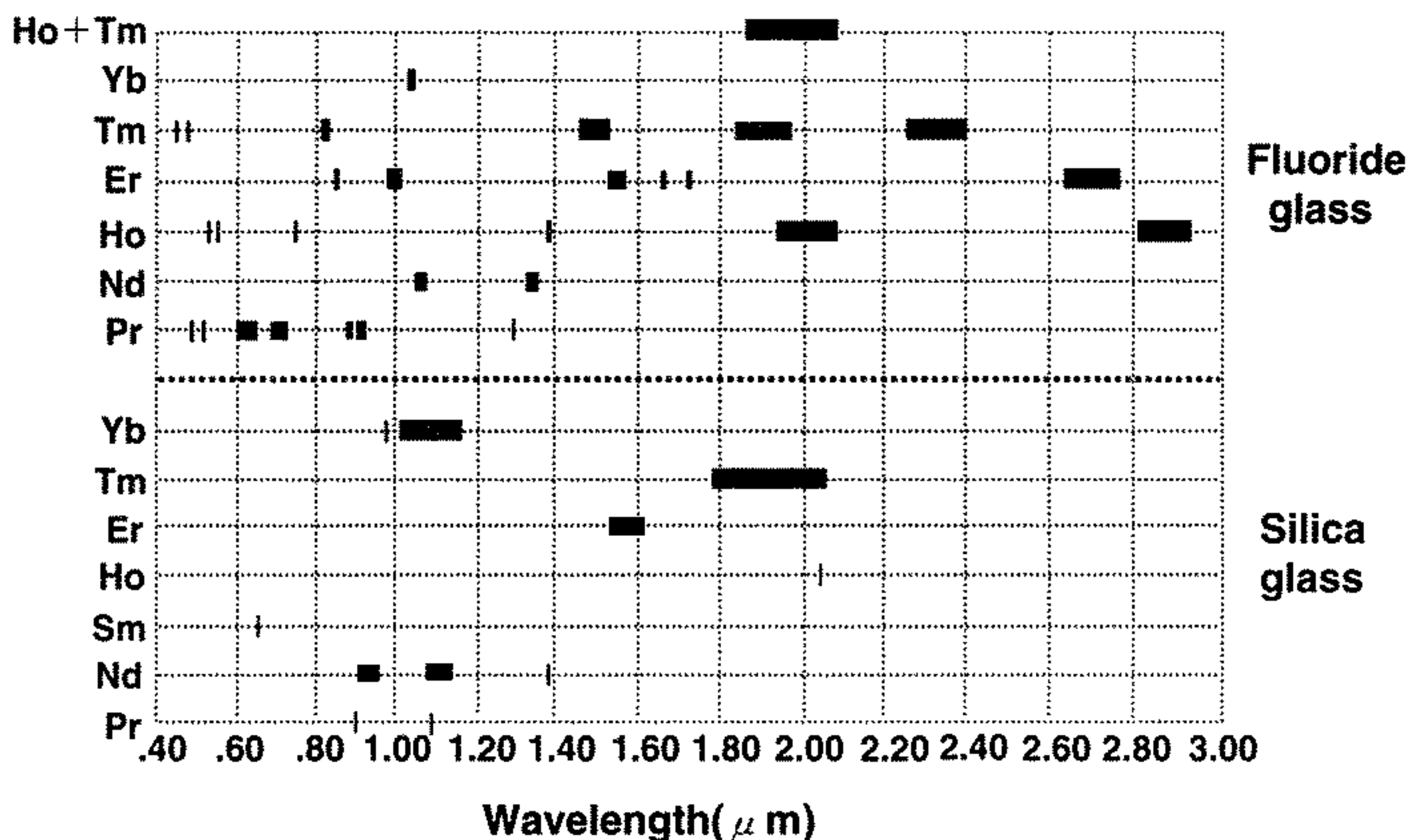


Fig.11 Operation wavelengths of rare earth ions where laser oscillation has been reported in fluoride and silica fiber hosts

エネルギーの大きな石英ガラスより、フォノンエネルギーの小さなフッ化物ガラスを使用した場合、より多くの波長帯でレーザ発振・光増幅が可能となる。フッ化物ガラスファイバは、当初、超低損失ファイバの有力候補として、開発が進められていたフッ化物ガラスファイバが、現在では光増幅技術の分野において、極めて重要な材料となっている。考えてみれば、フッ化物ガラスの物性的特徴である小さいフォノンエネルギーとイオン性結合とは、伝送用の長尺ファイバよりも、希土類イオンのホストガラスファイバの方に、より適しているとも言える。即ち、フッ化物ガラスは原子の結合がイオン性であるため、希土類イオンを添加し易く、またフォノンエネルギーが小さいために、添加された希土類イオンへの熱振動的な影響も低く、活性イオンは光を出しやすい（無輻射遷移が小さい）という優れた特長を有している。

## 5. 光ファイバ増幅器を使用したシステム開発の状況

現在、光ファイバ増幅器は様々なシステムに

適用されているが、使用されている形態から分類すると、次の3つになる。即ち、

- (1) 光源の後段に入れるブースターアンプとしての使用
- (2) 受光器の前段に入れるプリアンプとしての使用
- (3) 光伝送路の途中に入れる中継増幅器としての使用

である。具体的なシステムにおいては、これら3つの使用形態が組み合わされている。図12は、276個の光ファイバ増幅器を使用した9040kmの光中継増幅伝送の実験系である<sup>(13)</sup>。この実験は、光変調器より出力した10Gbit/sのNRZ(Non-Return to Zero)高速光信号が、まずブースターアンプによって増幅され、次に274個の光ファイバ増幅器によって中継増幅されて9040km伝送された後、プリアンプ付きのPIN受光器によって受信されるものである。この実験は1993年にKDDとAT&Tの共同で行われ、1996年に敷設完了予定の太平洋横断光海底ケーブル(TPC-5、光ファイバ増幅器を使用した初めての光海底ケーブル伝送)の基礎実験となったもの



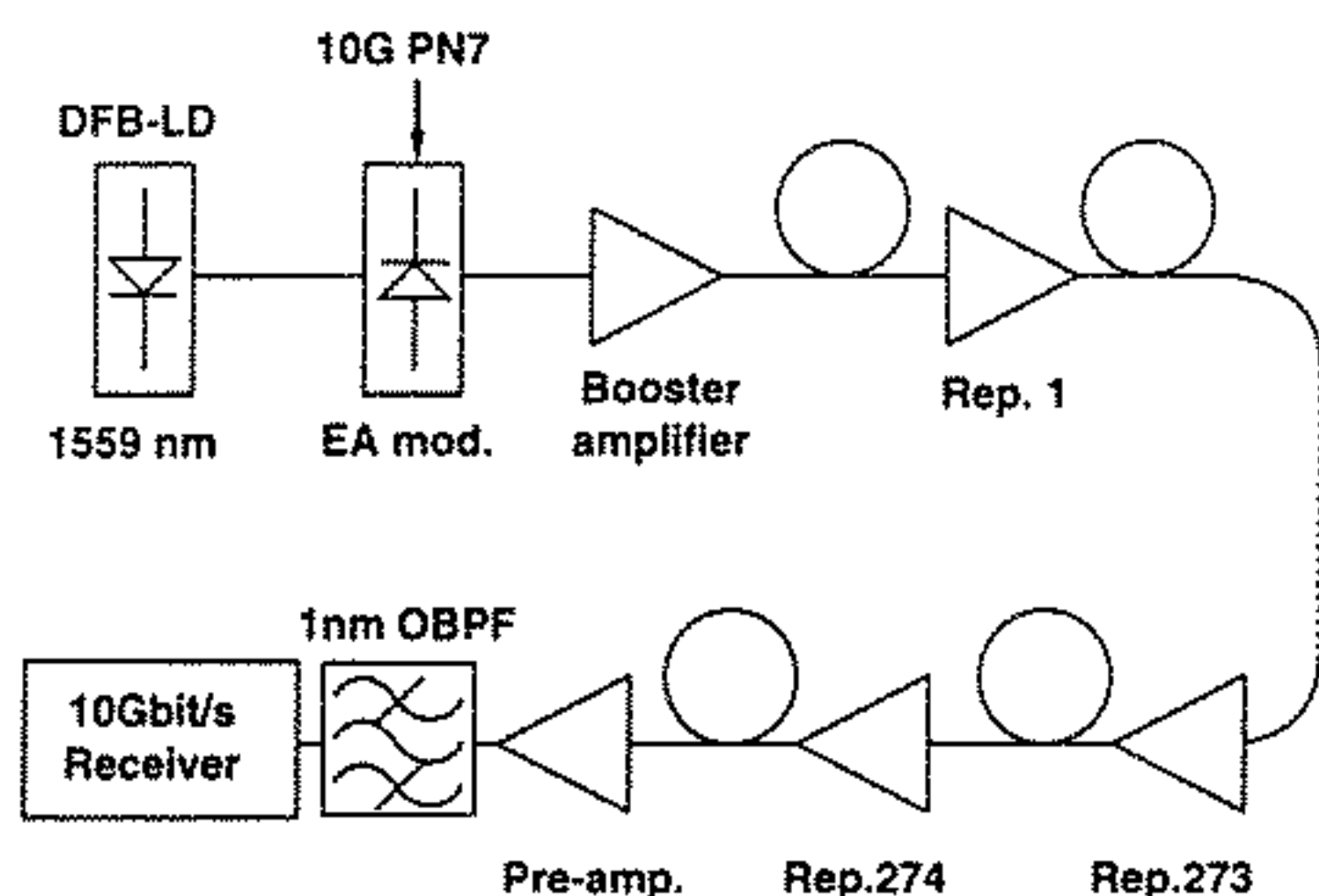


Fig.12 9040km transmission experiment with optically amplified repeaters using 274 optical fiber amplifiers

である。光ファイバ増幅器を使用したシステム検討は、あまりに多種・多数であるため、ここでは紹介しきれないが、代表的なものとして、10Gb/sの光ソリトンの100万km伝送（ループ）<sup>(14)</sup>や200Gb/sのNRZ信号の100km伝送<sup>(15)</sup>、リモートポンプ技術を使った2.5Gb/s信号の529km無再生中継伝送<sup>(16)</sup>などがあげられる。また、最近では、光ファイバ増幅器を使用した波長多重伝送（WDM: Wavelength Division Multiplexing）<sup>(17)</sup>やネットワーク技術<sup>(18)</sup>の検討が活発に行われている。さらに、ごく最近では、1Tbit/sの超大容量光通信も実現されるに至っている<sup>(19) - (21)</sup>。

## 6. 結び

以上、光ファイバ増幅器について簡単に紹介した。長い間の夢であった光増幅器が実現されてまだ10年未満であるが、増幅利得、雑音特性、周波数特性、等は既に電気の増幅器を凌ぐものとなったことはまさに驚異的である。また、膨大な数の光ファイバ増幅器と光増幅システムに関する論文が発表されているが<sup>(22)</sup>、本稿では紙面の制約上、そうした技術の詳細に入れなかったことは残念である。また、非線形光学効果を利用した光増幅器や半導体レーザ増幅器についてもまったく言及できなかった。ほかの文献等を参照頂ければ幸いである<sup>(23)</sup>、<sup>(24)</sup>。

## 参考文献

- 1) C. J. Koester and E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser," Appl. Opt., Vol. 3, pp. 1182-1186, 1964.
- 2) E. Snitzer, and R. Woodcock, "Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> glass laser," Appl. Phys. Lett., Vol. 6, pp. 45-46, 1965.
- 3) S. B. Poole, D. N. Payne, and M. E. Fermann, "Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions," Electron. Lett., Vol. 21, pp. 737-738, 1985.
- 4) R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, D. N. Payne, "High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54  $\mu$ ," Technical Digest of OFC/IOOC'87 (Reno Nevada, CA) p.167, 1987.
- 5) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, "Erbium Fiber Laser Amplifier at 1.55  $\mu$  m with Pump at 1.49  $\mu$  m and Yb Sensitized Er Oscillator," Technol Digest of OFC'88, pp. 447-450, 1988.
- 6) 須藤、大石、清水、"光ファイバ増幅器開発の現状と今後"、電学論C、113巻11号、955頁-966頁、1993。
- 7) 山田、金森、照沼、及川、清水、大石、須藤、"広帯域・利得平坦型Er<sup>3+</sup>添加フッ化物光ファイバ増幅器"、1995年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-221。
- 8) M. Yamada, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, K. Oikawa, H. Yoshinaga, K. Kikushima, Y. Miyamoto, and S. Sudo, "High-power, low-noise praseodymium-doped fluoride-fiber amplifiers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 7, No. 8, 1995, 869-871.
- 9) C. B. Layne, W. H. Lowdermilk, and M. J. Weber, "Multiphonon Relaxation of Rare-Earth ions in Oxide glasses," Physical Review B, Vol. 16, No. 1, 1977, pp. 10-20.
- 10) Y. Ohishi, T. Kanamori, M. Shimizu, M. Yamada, Y. Terunuma, J. Temmyo, M. Wada and S. Sudo; "Praseodymium-doped fiber amplifiers at



- 1.3  $\mu\text{m}$ ", IEICE TRANS. COMMU., vol. E77-B, no. 4, 1994, pp.421-440.
- 11) T. Sakamoto, M. Shimizu, M. Yamada, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, and S. Sudo, "35 dB Gain Tm-Doped ZBLAN Fiber Amplifier Operating at 1.65  $\mu\text{m}$ ," Technical Digest of CLEO/Pacific Rim '95, July 1995, PD2.12.
- 12) M. Monerie, "Status of Fluoride Fiber Lasers," Fiber Laser Sources and Amplifiers III, SPIE Vol. 1581, 1991, pp. 2-13.
- 13) H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Yamamoto, H. Wakabayashi, N.S. Bergano, C.R. Davidson, G.M. Homsy, D.J. Kalmus, P.R. Trischitta, D.A. Gray and R.L. Maybach, "10Gbit/s, 9,000 IM-DD Transmission Experiments Using 274 Er-doped Fiber Amplifiers, Repeaters," Technol Digest of OFC/IOOC '93., Postdeadline Papers, 1993, PD1.
- 14) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota and K. Suzuki, "10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometres," Electron. Lett. Vol.27, 1991, pp. 1270-1272.
- 15) S. Kawanishi, H. Takara, T. Morioka, O. Kamatani and M. Saruwatari, "200 Gbit/s, 100 km TDM Transmission using Supercontinuum Pulses with Prescaled PLL Timing Extraction and All-Optical Demultiplexing," Technol Digest of OFC '95, Postdeadline Papers, 1995, PD28.
- 16) P. B. Hansen, L. Eskildsen, S. G. Grubb, A. M. Vengsarkar, S. K. Korotky, T. A. Strasser, J. E. J. Alphonsus, J. J. Veselka, D. J. DiGiovanni, D. W. Peckham, E. C. Beck, D. Truxal, W. Y. Cheung, S. G. Kosinski, D. Gasper, P. F. Wysocki, V. L. da Silva and J. R. Simpson, "2.488-Gb/s Unrepeated Transmission over 529 km using Remotely Pumped Post- and Pre- Amplifiers, Forward Error Correction, and Dispersion Compensation," Technol Digest of OFC'95, Postdeadline Papers, 1995, PD25.
- 17) S. Yoshida, S. Kuwano, M. Yamada, T. Kanamori, N. Takachio and K. Iwashita, "A 10 Gbit/s x 10 Channel Transmission Experiment Over 600 km with 100 km Repeater Spacing Employing Unequal Channel Spacing and Cascaded Fluoride-based Erbium Doped Fiber amplifiers," Technol Digest of IOOC '95, 1995, PD2-3.
- 18) H. Toba and K. Oda, and K. Inoue, "Wavelength Division Multiplexing Networks," Technical Digest of OAA '95, June 1995, pp.204-207.
- 19) H. Onaka, H. Miyata, G. Ishikawa, K. Otsuka, H. Ooi, Y. Kai, S. Kinoshita, M. Seino, H. Nishimoto, and T. Chikama, "1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3  $\mu\text{m}$  zero-dispersion singlemode fiber," Technical Digest of OFC'96, San Jose, USA, Feb. 1996, PD19.
- 20) A. H. Gnauck, R. W. Tkach, F. Forghieri, R. M. Derosier, A. R. McCormick, A. R. Chraplyvy, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, Y. Sun, R. M. Jopson, and C. Wolf, "One terabit/s transmission experiment," Technical Digest of OFC'96, San Jose, USA, Feb 1996, PD20.
- 21) T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, O. Kamatani, K. Takiguchi, K. Uchiyama, M. Saruwatari, H. Takahashi, M. Yamada, T. Kanamori, and H. Ono, "100 Gbit/s x 10 channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source," Technical Digest of OFC'96, San Jose, USA, Feb 1996, PD21.
- 22) S. Sudo et al, "Optical Fiber Amplifiers," Artech House Publishers (1996 年出版予定)
- 23) 小山、"半導体光増幅器"、応用物理、64 巻、1 号、1995、15 頁—18 頁。
- 24) S. G. Grubb, T. Erdogan, V. Mizrahi, T. Strasser, W. Y. Cheung, W. A. Reed, P. J. Lemaire, A. E. Miller, S. G. Kosinski, G. Nykolak, and P. C. Becker, "1.3  $\mu\text{m}$  Cascaded Raman Amplifier in Germanosilicate Fibers," Technol Digest of OAA'94, 1994, pp. PD3-1-4.