

エルビウムドープ光ファイバーを用いた 光増幅器とその応用

NTT 伝送システム研究所 中沢 正隆

Erbium-doped optical fiber amplifiers and their applications

Masataka Nakazawa

NTT Transmission Systems Laboratories, Lightwave Communication Laboratory

1. まえがき

光ファイバーのコアの部分に Er^{3+} (エルビウム) もしくは Nd^{3+} (ネオジウム) などの希土類イオンをドープすることにより、それらイオンからの誘導放出を用いた光増幅に関する研究が、ここ数年、日本、英国、米国を中心として爆発的な勢いで進んでいる¹⁻⁷⁾。中でもエルビウムイオンをドープしたエルビウム光ファイバー増幅器の出現は、今までの光通信のトップデータをほとんど塗り替え、予測が出来ない程速いスピードで光技術に大きな変革をもたらしつつある。

光ファイバー増幅の研究は以外に古く、1963-1964年にかけて E. Snitzer らを中心として始まり今までに数多くのグループが優れた研究を行なっている⁸⁾。光ファイバー増幅の動作原理は自明であったが、励起光源としては大掛かりな Ar レーザー、YAG の SHG、および色素レーザーを用いていたため実用化には程遠い状況であった。

このような折、エルビウムファイバーを励起するための光源として波長 $1.48 \mu\text{m}$ の InGaAsP 半導体レーザーを用いる方法が提案され、波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯において 12.5 dB の利得が得られることが報告された⁹⁾。これにより電池でも駆動できる小型の広帯域光増幅器が現実のものとなり、その後の色々な光通信への応用が急速に展開する端緒となった。

最近では、光通信システムに従事する多くの研

究者が Er ドープ光ファイバー増幅器の応用について取り組み始め、光通信技術は今や小型光増幅器をその基礎とした第二世代の光通信時代に突入しつつある¹⁰⁾。筆者が長年たずさわってきた光ソリトン通信でさえもエルビウムドープファイバー増幅器により実現しつつある¹¹⁻¹⁴⁾。

本論文では、希土類ドープファイバーの中でも光通信に新しい流れを作りつつあるエルビウムドープ光増幅器とその応用について報告する。

2. 希土類ドープファイバー

コア部に希土類をドープした光ファイバーが光増幅器およびレーザーとして適しているのは、

- (1) コア径が $10 \mu\text{m}$ 以下の細径であるため低い入力で励起密度を高くできること
- (2) 相互作用長が数 10 cm - 数 km と長く取れるため単位長さ当たりの利得が小さくても十分な総合利得が得られること
- (3) MCVD, VAD 法等の優れたファイバー製造技術により低損失な導波路となっていることなどが挙げられる¹¹⁾。

最初のファイバーレーザーは、クラウンガラスに Nd_2O_3 をドープしたものであり Snitzer と Koester により 1964 年に発表されている⁸⁾。その後、Stone と Burrus によって、シリカ系の低損失ファイバーにおいて波長 $0.89 \mu\text{m}$ LED 励起により $1.06 \mu\text{m}$ の発振が報告され¹⁵⁾、今日では数多く

のファイバーレーザーおよび増幅器が出現している。

希土類の3価のイオンを活性物質としたレーザーガラスは波長 $2\mu\text{m}$ 以下のさまざまな波長で遷移線を有する¹⁶⁾。ガラス中の希土類元素はYAGまたはYLF等の結晶の場合と異なり、複雑な結晶場の影響を受けて微細構造を持たない幅広い準位を有する。このため幅広い波長域にわたって光増幅が可能となる。特徴的な物質は Er^{3+} および Nd^{3+} イオンであり、ここで取り扱う Er^{3+} イオンのエネルギー準位をFig.1に示す。図からわかるように、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.6\mu\text{m}$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 、 $0.98\mu\text{m}$ および $1.48\mu\text{m}$ 帯の様々な励起波長が存在する。 Er^{3+} イオン誘導放出の波長としては $1.53\sim 1.55\mu\text{m}$ (${}^4\text{I}_{13/2}\text{--}{}^4\text{I}_{15/2}$)の遷移線とが有名であり、この波長帯が光通信の最低損失波長帯(シリカ系ファイバーにおいては $1.5\mu\text{m}$ 帯)にあるため光通信への応用が積極的に行なわれている。 Nd^{3+} イオンは4準位を構成する波長 $1.08\mu\text{m}$ ($\text{F}_{3/2}\text{--}{}^4\text{I}_{11/2}$)と3準位である $0.9\mu\text{m}$ ($\text{F}_{3/2}\text{--}{}^4\text{I}_{9/2}$)の遷移線がある。

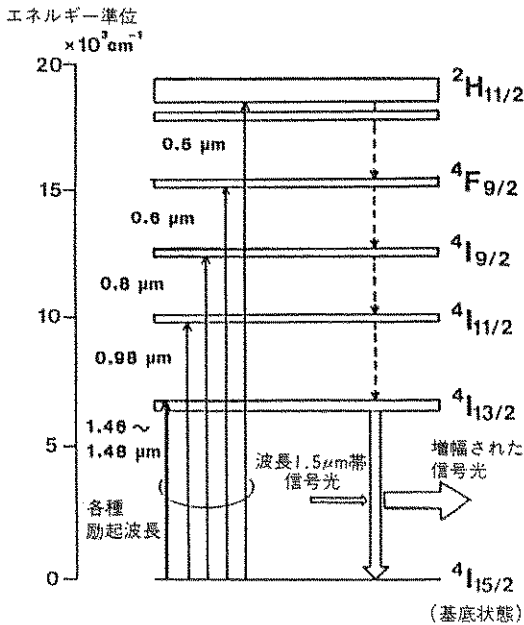


Fig. 1 Er^{3+} イオンのエネルギー準位。 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.6\mu\text{m}$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 、 $0.98\mu\text{m}$ 、および $1.48\mu\text{m}$ 帯の様々な励起波長が存在する。 $1.5\mu\text{m}$ 帯の誘導放出は ${}^4\text{I}_{13/2}$ から ${}^4\text{I}_{15/2}$ への遷移を用いる。

2.1 Er ドープ光ファイバーの作製

VAD法、またはMCVD法を中心にして液浸法と呼ばれるドープ法によりErドープファイバーを作製することができる。このドープ法は、蒸気圧が高いErを極めて容易に石英ガラス中にドープすることができ、かつドープ濃度の均一性が高い、制御性に優れる、また共ドープが可能である等の特徴がある。そのため、Erを含めて希土類元素をドープする主流の方法になっている¹⁷⁾。

2.1.1 VAD法

Fig.2(a)にVAD法と液浸法によるErドープ母材の作製法を示す。まず、VAD法により、 SiO_2 スート(ガラス微粒子)、あるいは GeO_2 、 P_2O_5 を添加したコアスートを作製する。このコアスートにEr塩化物、また特性改良のための各種塩化物(共ドープパント)を加えたアルコール溶液を含ませ

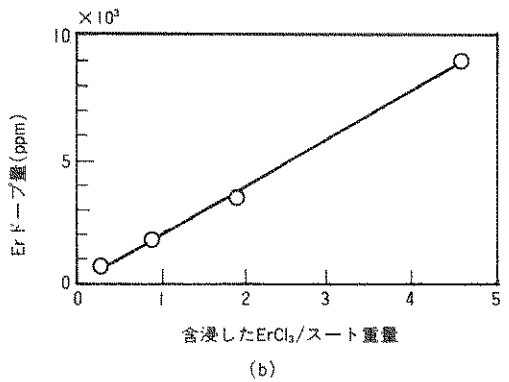
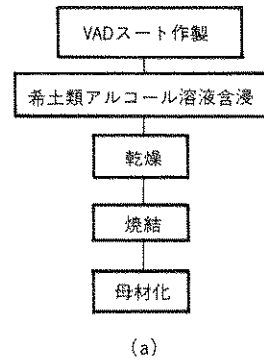


Fig. 2 VAD法と液浸法によるErドープ母材の作製法(a)と ErCl_3 アルコール溶液濃度とErドープ量の相関(b)。 $1\sim 10^4$ ppmの広い範囲にわたりドープ量の正確な制御が可能である。

せた後、空气中で乾燥して塩化物を沈着させる。焼結を He-Cl 雰囲気で行ない Er コアロッドが得られる。さらに、スート法、あるいはロッドインチューブ法によりクラッド部を作製して、母材化を完了する。ファイバー化は通常の線引条件で行なわれる。ErCl₃ アルコール溶液濃度とコアロッド中の Er ドープ量の相関を Fig. 2 (b) に示す。ErCl₃ はアルコールに容易に溶けるため、1~10⁴ ppm の広い範囲にわたりドープ量の正確な制御が可能であることがわかる^{17,18)}。気相法により、希土類化合物を VAD のスートに入れる方法もある¹⁹⁾。この方法では希土類ハロゲン化物の昇華量を制御しながらスートの粒子の間隙に原料を拡散させ、次いで、加熱炉温度を上げて透明ガラス化する。VAD 法は種々の屈折率分布をもつ母材の制作が可能であり、かつ大型化が容易である。

2.1.2 MCVD 法

Fig. 3 に従来用いられてきた気相法による希土類ファイバー作製法を示す²⁾。まず、ガラスの堆積前に希土類原料を適正温度で加熱して完全に結晶水を除去する。次に、クラッドガラスを通常の MCVD 法と全く同じプロセスで堆積する。コアガラスについては、やや低めの堆積温度を設定することによりガラス微粒子を堆積させる。次に、第二バーナーの温度を上げて希土類原材料を昇華させ、コアガラス微粒子の間隙を通じて、ドーピングを行なう。十分に脱水した後、温度を上げて透明ガラス化する。最後に出発石英ガラス管全体を

コラプスしプリフォームを完成させる。

液浸法の場合には、パイプを準備して、その内側に SiO₂/P₂O₅/F 組成のクラッドガラス層を合成し、引き続き、合成温度を下げて SiO₂、あるいは SiO₂/GeO₂/P₂O₅ コアスート層を付ける。この石英パイプを希土類元素の塩化物、また屈折率差を与える塩化物を含む水溶液に浸漬し、塩化物をコアスート層に含浸させる。含浸が完了すると、Cl₂/H₂/O₂ 雰囲気中で脱水-焼結-コラプス工程を経て希土類元素ドープ母材を得る。

2.2 各光増幅器の比較と Er ドープファイバー増幅器の特徴

光増幅器は反転分布媒質からの誘導放出を用いるレーザー増幅器と、ラマン散乱、ブリルアン散乱などの非線形効果による誘導散乱に基づく増幅器に分別される。光増幅器の一般的な種類と特徴の比較を Table 1 に示す。レーザー増幅器には、ここで取り扱う希土類ドープファイバー増幅器と半導体レーザー増幅器²⁰⁾の2つがあり、前者は光励起により、また後者は注入電流励起により光増幅器として動作する。レーザー発振器から増幅作用だけを抜き出して高利得な光増幅を実現するためには、端面反射の除去、光アイソレーターの挿入、ASE (Amplified Spontaneous Emission) の除去等が重要である。非線形光学効果による増幅において重要なことは単位長さ当たりの利得は小さいが相互作用長を 1 km 以上に長くすることにより全体として高利得を実現している点である²¹⁾。

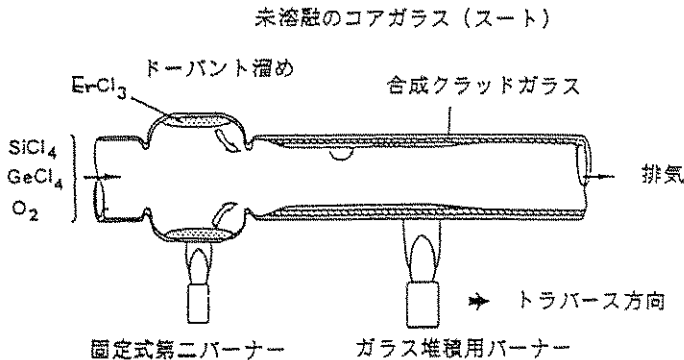


Fig. 3 MCVD 法と気相法による希土類ドープファイバーの作製法。固定式第二バーナーに特徴があり、これにより希土類原料を昇華させドーピングを行なう。

様々な用途が考えられる光増幅器が備えるべき
特徴としては

- (1) 十分大きな小信号利得
- (2) 広い利得帯域

Table 1 光増幅器の種類と特徴

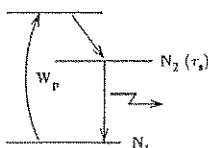
光増幅器	希土類ドープ ファイバー増幅器	半導体レーザー 増幅器	ファイバーラマン 増幅器	ファイバーブリルアン 増幅器
原理	反転分布媒質からの誘導放出		誘導ラマン散乱	誘導ブリルアン散乱
材料	希土類イオン (Er ³⁺ , Nd ³⁺ 等)	半導体 (AlGaAs, InGaAsP)	シリカファイバー 中の GeO ₂	シリカファイバー
動作波長	1.54, 1.06 μm	0.8~1.6 μm	$\nu_{\text{pump}} - \Delta\nu_k$ ($\Delta\nu_k = 450 \text{ cm}^{-1}$)	$\nu_{\text{pump}} - \Delta\nu_k$ ($\Delta\nu_k = 11 \text{ GHz}$)
励起法	光	電流注入	光	光
励起パワー	~百 mW	数十~百 mA	~数 W	~mW
増幅器長	数 m~数十 m	数百 μm	数 km	~10 km

Table 2 Er ドープ光増幅器の特徴

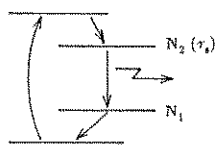
- (1) 高利得 (>40 dB)
- (2) 低い結合損失
- (3) 低い雑音指数 (3~5 dB)
- (4) 偏波に依存しない利得特性
- (5) 広帯域な波長特性 (3700 GHz)
- (6) 高い飽和出力 (>40 mW)

Table 3 3準位系と4準位系のレーザー増幅の相違点

	3準位系	4準位系
終準位	基底状態	中間準位
利得閾値	あり $\Delta N_{\text{th}} = N_2 - N_1$ (基底吸収)	なし $\Delta N_{\text{th}} = N_2$ $N_1 \approx 0$
利得飽和	励起光強度によって変わる $I_{\text{sat}} = \frac{h\nu_k}{2\sigma_s} \left(W_p + \frac{1}{\tau_s} \right)$	一義的に定まる $I_{\text{sat}} = \frac{h\nu_k}{\sigma_s} \frac{1}{\tau_s}$
代表例	Er レーザー, ルビーレーザー — Er ファイバー増幅	Nd:YAG レーザー Nd ファイバー増幅



3準位系



4準位系

- (3)利得の偏波依存性の解消
- (4)大きな飽和出力
- (5)小さな雑音指数

などが挙げられる。Table 2 に Er ドープ光ファイバー増幅器の特徴を示すが、上記の要求条件を満たす項目が殆どである。それらの中でも、伝送用光ファイバーと殆ど無損失で接続できる、チャンネル間のクロストークが小さい、利得の偏波依存性がない、温度変化に対して利得が安定である、などの点が特徴的である。

3準位系と4準位系の増幅の相違点を Table 3 に示す。Er イオンの $1.5\ \mu\text{m}$ 帯での増幅は ${}^4I_{13/2}$ の上準位から ${}^4I_{15/2}$ の基底状態への誘導放出であり、3準位系を構成している。即ち終準位が基底状態であり、このため基底吸収が存在し、励起が弱い場合には信号光は吸収されてしまう。これを越えて、正味の誘導放出を発生させるためにはある程度の励起パワーが必要となってくる。そして、この信号光が減衰しない励起パワーを Pump Threshold と呼んでいる。一方、4準位系では終準位が中間準位にあるため基底吸収がない。

もう一つ両者の相違点は、利得の飽和強度 I_{sat} にある。3準位系の場合には、Table に示したように励起強度 W_p が小さいときには4準位系と同様に I_{sat} が信号光の Cross section σ_s と寿命 τ_s によって決定されるが、励起が強くなると励起に比例して I_{sat} が大きくなる点である。即ち4準位系では材料が決定されれば I_{sat} は一義的に決まるが3準位系では励起パワーの関数となる。このことは Er 光増幅器が微弱信号ばかりではなくパワー増幅が可能であることを示している。

2.3 Er ドープファイバーの構造

2.1節で述べたように VAD 法や MCVD 法により Er ドープファイバーは作製されるが、Er イオンはコアの部分にドープされることになる。その際、大きな利得を得るためには励起光の横モード分布と信号光のそれとができるだけ一致するように設定することが望ましい。その意味で波長 $1.48\ \mu\text{m}$ 帯の励起法は $1.53\sim 1.55\ \mu\text{m}$ でのモードフィールドが励起光のそれとほぼ一致するため優れた特性を示す。

サザンプトン大学により提案された $0.98\ \mu\text{m}$

帯励起の場合にはモードのミスマッチは大きいものの、吸収係数が $0.98\ \mu\text{m}$ 帯の方が $1.48\ \mu\text{m}$ 帯に比べて約2倍程度大きいため大きな利得係数を得ることができている。

高効率な励起を実現するうえでもう1つ重要な点は励起光の強度分布と Er イオンの径方向の分布である。Er イオンは3準位系であるため励起が弱いところでは信号光に対して吸収媒質となる。従って、もし励起光の裾野（パワーの弱い部分）に Er イオンがドープされていると信号光は吸収されてしまい増幅度を高くできない。Fig. 4 に効率の低い構造をしたファイバー(a)と効率の高い構造をしたファイバー(b)を示す。重要な点は励起パワー密度が高い中心部にのみ Er イオンを入れることである。このことは比屈折率差が1%を越す高い $\Delta(=(n_1-n_2)/n_1)$ でかつ小さいコア径にエルビウムをドープする方法、2重コア法等によ

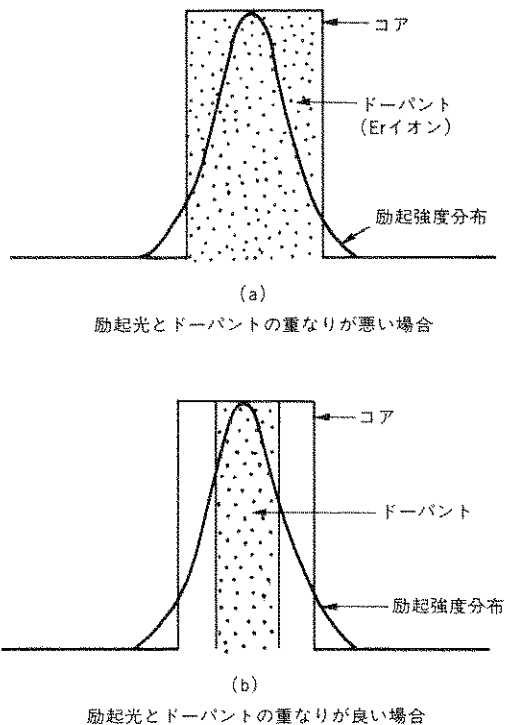


Fig. 4 エルビウムドープファイバーの構造。(a)励起光とドーパントの重なりが悪く、利得の低い構造。(b)励起光の強度の高い部分とドーパントが重なった利得の高い構造。

て実現できる。高い比屈折率をもつファイバーによる高利得特性については3.3節において述べる。

3. Er ドープファイバーの増幅特性

本節では、Er ドープ光ファイバー増幅器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier; EDFA) の構成、ファイバーの吸収特性、利得特性について述べる。

3.1 Er ドープ光ファイバー増幅器

Er³⁺ イオンの ⁴I_{13/2} から ⁴I_{15/2} への誘導放出を利用した 1.5 μm 帯の光ファイバー増幅器の構成を Fig. 5 に示す。以後、Er ドープ光ファイバー増幅器は EDFA と略す。EDFA は LD 励起光源、ファイバーカップラー、無偏波型光アイソレーター、Er ファイバー、光バンドパスフィルターの5つの主要な光部品から構成される。まず、励起光源は波長 1.48 μm⁹⁾、0.98 μm²²⁾、0.82 μm²³⁾ 等の半導体レーザーが用いられる。1.48 μm 帯は InGaAsP 系、0.98 μm 帯は InGaAs 系の歪超格子を用いたもの²²⁾、0.82 μm 帯は GaAlAs 系のレーザーであり、いずれも縦多モードのファブリペロー型のものが用いられる。信号光と励起光を重ね合わせるのはファイバーカップラーもしくは誘電体多層膜型のミラーが利用される。

無偏波型の光アイソレーターは大変重要な役割を果たしている。光ファイバーの中の Er イオンはガラスに溶け込んでいるため、もともとその蛍

光特性、増幅特性に偏波依存性がない。この性質を生かすため、無偏波型のアイソレーター (常光と異常光とを空間的に分離して同一 YIG 中を伝搬させ、出口において逆に両者を重ね合わせて出力とする) を利用することにより任意の入射偏波に対して同一の利得を得る。このアイソレーターの役目は高利得の際発生する発振を抑えるとともに、ASE のフィードバックも除去することにより信号光の利得を増加させるためである。

狭帯域のバンドパスフィルターを Er ファイバーの後に入れることも重要である。これにより ASE を除去して信号光に対する雑音成分の比率を小さくする。通常 1~3 nm のフィルターを用いるが、この EDFA を複数個用いて多中継伝送する場合、信号光のみを通過させるようにできるだけ狭いフィルターを挿入することにより ASE の増幅を抑制することができる。

信号光は Fig. 5 に示すように入力ポートから WDM ファイバーカップラー、光アイソレーターを経て Er ファイバーに導かれる。増幅された信号は光フィルターを経て出力ポートより出力される。

Er イオンのドープ量に関しては、100 ppm で長さ 100 m 程度がよい。当初は、高 Δ 化、もしくは 2 重コア化等が行なわれていなかったため、増幅度は 20 dB 程度と低かった。その後 Bell 研のグループは濃度を数十 ppm と低くし、長さを 100~200 m とすることにより、37.5 dB という高

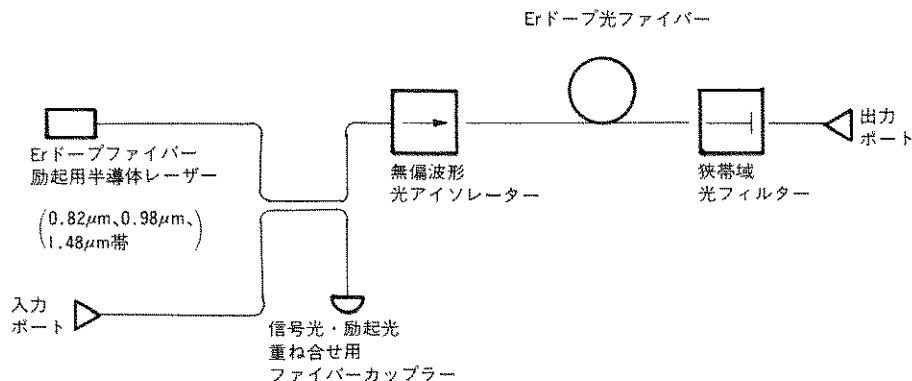


Fig. 5 Er ドープ光ファイバー増幅器 (EDFA), EDFA は、LD 光源、ファイバーカップラー、無偏波型アイソレーター、Er ファイバー、および狭帯域光フィルターの5つの主要な光部品から構成されている。

い利得を報告している²⁴⁾。低濃度化により濃度消光を避けることが、高効率な励起にとって重要である。最近では、300~500 ppm程度の濃度においても高Δ化したAl₂O₃添加ファイバーにより高い利得が得られることがわかっている。注意しなければならないのは、高Δ化により高い利得係数が得られるものの、信号伝送用ファイバーのスポットサイズとErファイバーのスポットサイズが異なると接続損が大きくなることである。

3.2 吸収特性

Fig. 6にErファイバーの吸収係数の波長依存性を示す。1.48 μm (⁴I_{15/2} - ⁴I_{13/2})、0.98 μm (⁴I_{15/2} - ⁴I_{11/2})および0.8 μm (⁴I_{15/2} - ⁴I_{9/2})の吸収ピークが存在し、1.48 μm付近での吸収係数は0.98 μmの吸収係数の1/2~1/3であることがわかる。0.82 μmの吸収は両者に比べるとかなり小さく、0.3 dB/m程度である。0.8 μm帯での吸収係数は0.75 dB/mであるが、この波長ではESA (Excited State Absorption) があり、効率が上がらない

^{25,26)}。また、上準位から基底状態への直接的な自然放出によりErファイバーが緑色に発光する現象をともなうことも特徴である。しかし、最近、波長0.82 μmで励起するとESAが小さいため、吸収の少ない点をファイバー長を長くすることにより高い利得が得られることがわかっている²⁷⁾。

1.48 μm帯での吸収特性はガラスの組成および共ドーパントによって様々に変化する²⁸⁾。例えば、GeO₂/SiO₂の場合には1.535 μmに吸収の鋭いピークがあるがAl₂O₃/SiO₂系では、吸収のピークが短波長側の1.530 μmあたりにわずかに移動すると共にGeO₂/SiO₂系では20 nm程度であった吸収の半値幅が約2倍の40 nm程度に広がることわかっている。一般的にAl₂O₃を共ドーブするとErイオンの配位がGeO₂/SiO₂とは異なりGeO₂/SiO₂系でみられる1.54 μm付近での蛍光のdipが埋まるとともに、長波長、短波長の両側に蛍光強度の分布が広がる²⁹⁾。また、濃度消光もある程度抑えることが出来る。このため多波長信号の

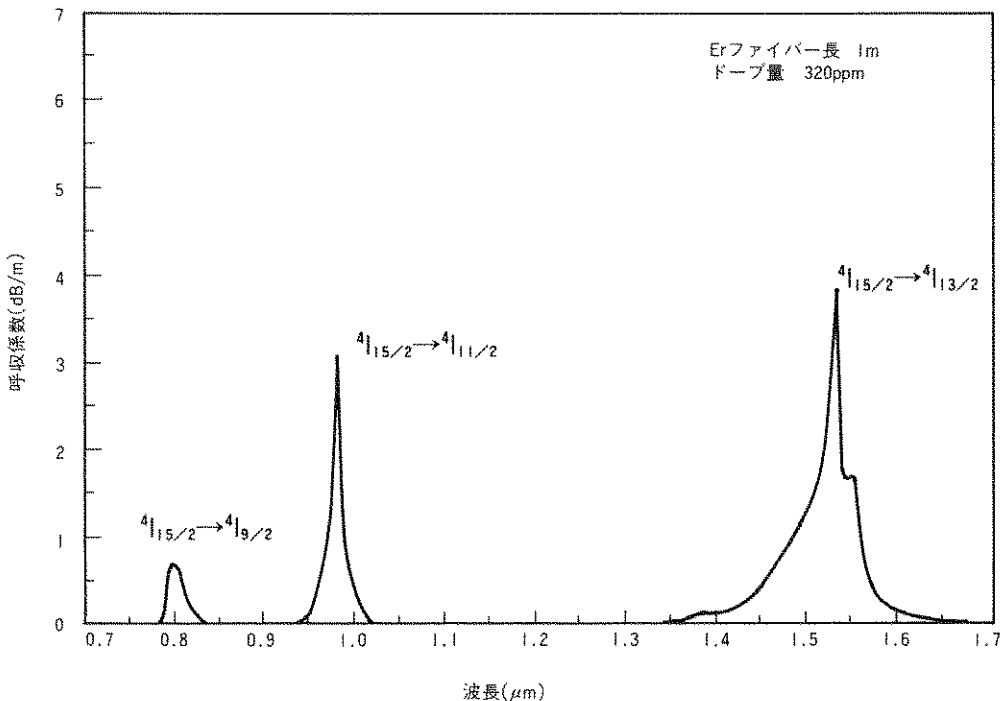


Fig. 6 Erドーブファイバーの吸収係数の波長依存性。共鳴吸収の裾野を用いる波長1.48 μm (⁴I_{15/2} - ⁴I_{13/2})、0.98 μm (⁴I_{15/2} - ⁴I_{11/2}) および0.8 μm (⁴I_{15/2} - ⁴I_{9/2})の吸収ピークが存在する。

一括増幅および超短パルスの増幅には Al_2O_3 を共ドープした Er ファイバーがよく用いられる。

3.3 光増幅特性

一般の光増幅器では光信号の伝播方向に沿って反転分布が一様に形成されていると見なしてよい。しかし、EDFA の場合には励起光が軸方向に伝播することにより反転分布を形成するために、反転分布の大きさが励起光の吸収とともに伝播方向に沿って変化する。このために信号光を順方向入射するか逆方向入射するかにより雑音の発生量が異なること、飽和パラメーターが長手方向に変化することなどの特徴が現われる。

1.48 μm 励起により得られた高い利得特性を Fig. 7 に示す⁵⁾。Er ファイバーのドープ量は 100 ppm、長さ 100 m、 GeO_2/SO_2 組成であり、VAD

液浸法で作られている。Pump Threshold は $P_P=28 \text{ mW}$ であり、 $P_P=130 \text{ mW}$ 、 $P_s^{\text{in}}=-45.6 \text{ dBm}$ の場合、46.5 dB の高利得が得られている。図中に示すスペクトルは使用した 2 波長の励起半導体レーザーのものである。また、 P_{sat} は +11 dBm であり、最大出力は 30 mW に達している。これらのことは EDFA が電力増幅器として動作できることを示している。

利得係数としては当初 1 dB/mW 以下であったが、最近では高 Δ 化および 2 重コア化の技術により 1.48 μm 帯では 5 ~ 6 dB/mW、また、0.98 μm の励起波長においては 10 ~ 11 dB/mW 以上の高利得が得られるようになってきている。Fig. 8(a)と(b)に高利得ファイバーの特性を示す³⁰⁾。比屈折率差を 1.67%，スポットサイズを 4.8 μm と

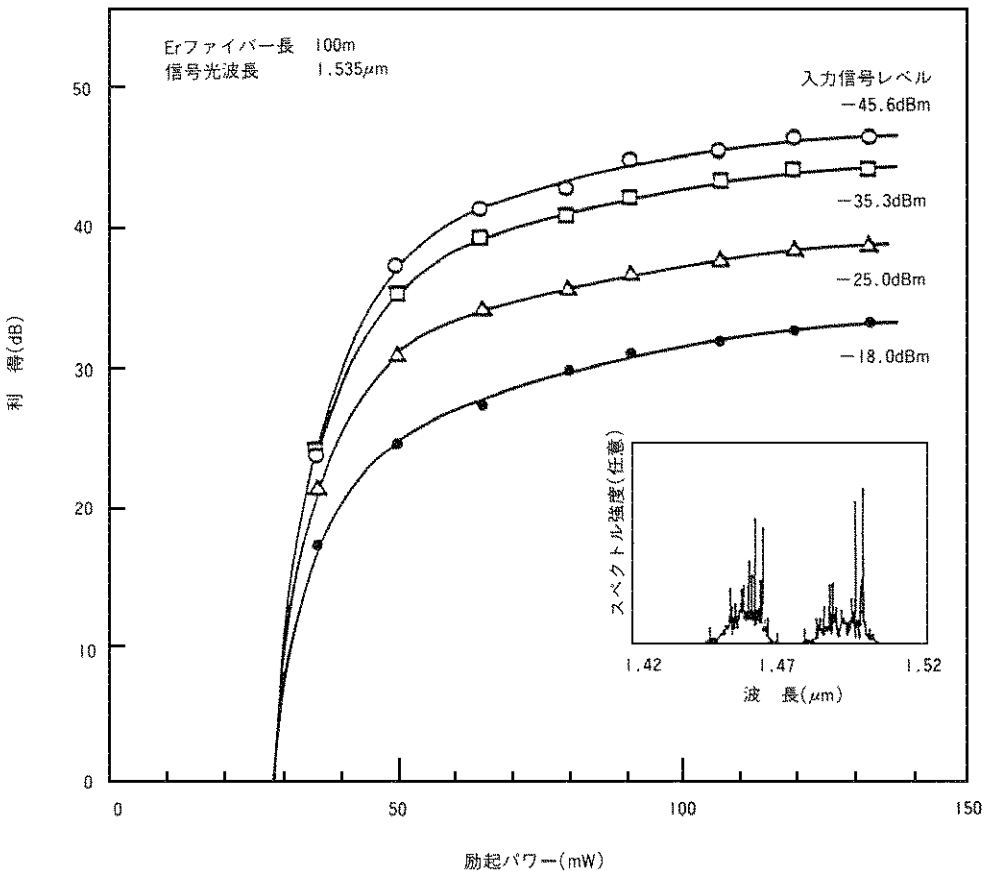


Fig. 7 Er ドープファイバーの高利得特性、励起パワー約 130 mW において 46.5 dB の利得が入力信号レベル -45.6 dBm の場合実現されている。挿入図は二波長励起 LD のスペクトルを示す。Er ファイバー長は 100 m、濃度は 100 ppm である。

して励起効率をあげるにより、励起波長 $0.98 \mu\text{m}$ 、ファイバー長 $10 \sim 23 \text{ m}$ において 10.2 dB/mW の利得係数が得られている。その様子を Fig.

8(a)に示す。また、ファイバー長 30 m 、 9 mW の励起で 39 dB の増幅度が得られている点にも注目したい。同じファイバーを $1.48 \mu\text{m}$ 励起する

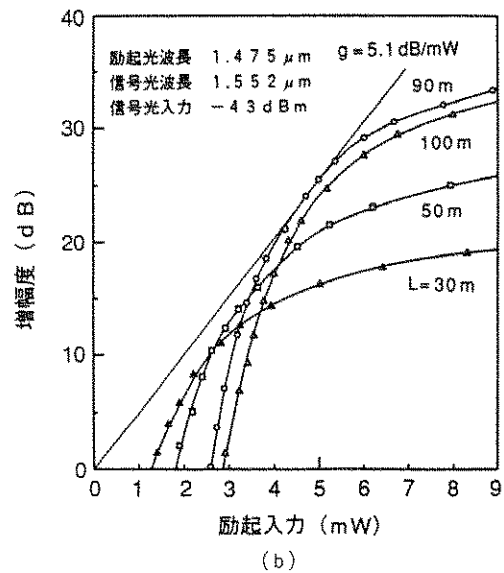
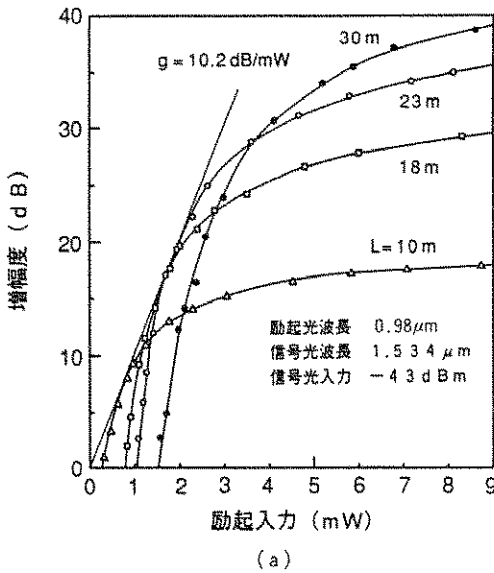


Fig. 8 高い屈折率差をもつエルビウムファイバーによる高利得係数の実現。高屈折率化によりスポットサイズを小さくし、励起効率をあげている。(a)は $0.98 \mu\text{m}$ 励起、(b)は $1.48 \mu\text{m}$ 励起を示す。それぞれの最大利得係数は 10.2 dB/mW 、 5.1 dB/mW である。

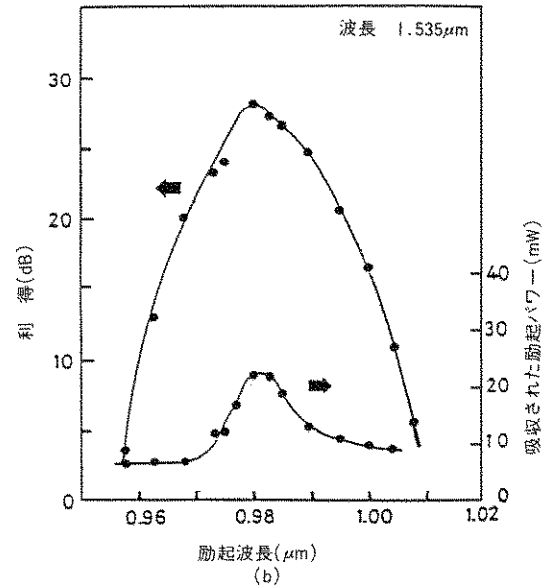
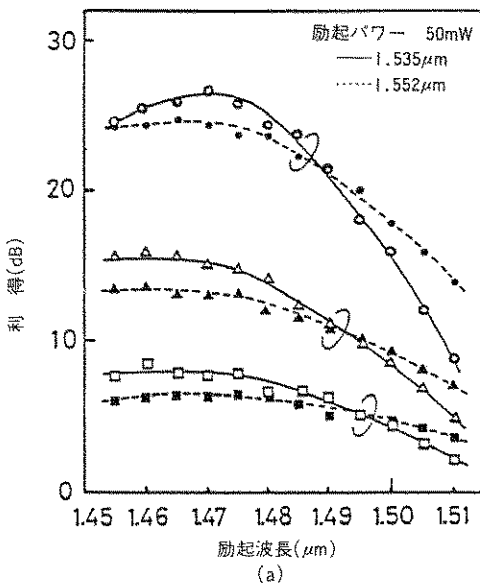


Fig. 9 利得の励起波長依存性。図(a)は、波長 $1.48 \mu\text{m}$ 帯の励起であり、 $1.45 \sim 1.48 \mu\text{m}$ までの比較的広い (30 nm) 励起波長幅を持つ。一方、図(b)に示す波長 $0.98 \mu\text{m}$ 帯での有効な励起幅は $0.98 \mu\text{m}$ のまわりに約 10 nm と狭い。

と、Fig. 8 (b)に示すように5.1 dB/mWの利得係数がファイバー長90 mの場合得られている。

Fig. 9に1.48 μm および0.98 μm 帯における利得の励起波長依存性を示す⁹⁾。(a)は1.48 μm 励起、(b)は0.98 μm 励起である。Fig. 9(a)によると励起波長が1.50~1.51 μm の長波長側に設定された場合には利得が単調に減少している。これは励起波長が誘導放出の波長に近づくにつれて二準位系での共鳴励起問題に帰着され、 $N_2 \cong N_1$ となるためである。一方、励起波長を1.45 μm 以下の短波長に設定すると、Fig. 6に示したように今度は ${}^4I_{13/2}$ での吸収が非常に小さくなるために、利得は零に近づく。この両波長の中心に最適励起波長が存在し、1.475 μm を中心に1.450~1.485 μm の広い波長域において高い利得が実現できる特徴がある。それ故、ファブリペロー型の縦多モード発振(スペクトル幅20 nm)するInGaAsP半導体レーザーが効率のよい励起光源として用いられる⁹⁾。

Fig. 9(b)の利得の励起波長依存性はFig. 9(a)とは明らかな相違点が存在し、0.98 μm を中心にして、0.975 μm ~0.985 μm の約10 nmが有効な励起波長帯である。1.48 μm 帯の励起波長域に比べて有効波長域が狭く、長・短波長の両域で急激に利得が変化している。そして、その変化は、吸収

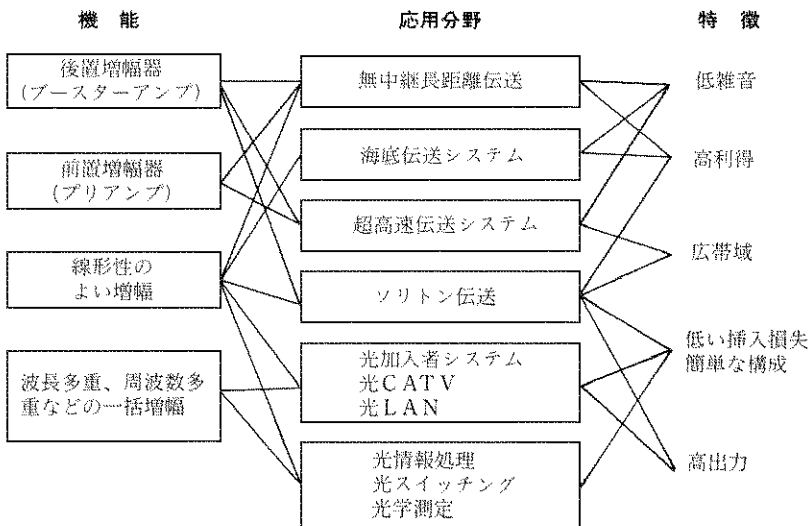
係数の変化をそのまま反映していることがよくわかる。1.48 μm 帯励起に比べて0.98 μm 帯励起の方が励起波長に対する許容度が小さいため、励起半導体レーザーの選択の自由度は小さい。

4. EDFAの光通信への応用

以上説明してきたように、EDFAは数多くの優れた特性を供えているため、様々な分野への応用が期待できる。その応用分野をTable 4に示す。これによると低雑音、高利得、広帯域などの特徴により、超大容量の無中継長距離の光通信システムとして、陸上および海底伝送に大きな効果がある。広帯域でかつ比較的パワーの大きな入力信号に対しても高い利得があることを利用すると、従来、短期間では実現し難いとされてきた光ソリトン通信も応用できる。さらに、光加入者、光CATVおよび光LANなどの分配系への適用も考えられる。

システムへの応用に関しては、1.8 Gbit/sのIM変調方式により212 kmの無中継伝送に成功したのを始めとして³¹⁾、最近では、中継間隔を数100 kmとして500 kmにわたり10 Gbit/sの通信が従来の強度変調方式で実現している³²⁾。また、2200 kmにわたって2.5 Gbit/sのコヒーレント光通信も25個のEDFAを80 km間隔に1個づ

Table 4 Erドープ光ファイバー増幅器の応用分野



つ設置することにより実現されている³³⁾。

ここでは遠い将来の夢の通信と考えられてきた高速・長距離光ソリトン通信が、筆者らが提案してきた EDFA を用いる方法により実現されつつあることに鑑み、サブピコ秒およびフェムト秒ソリトンパルスの増幅とこの新しいソリトン通信を中心に報告する。

光ソリトンとは光ファイバ中の負の群速度分散と自己位相変調効果と呼ばれる非線形効果とが釣り合うことにより発生する安定なパルスであり、1973年にBell研のHasegawaとTappertによって提案されている³⁴⁾。ソリトンによる長距離伝送は光ファイバ中の損失が無い理想の場合であり、現実にはファイバの損失を補償する必要がある。このために、誘導ラマン散乱等を用いたソリトン伝送が行われてきたが、実用的なブレイクスルーは程遠い状態にあった³⁵⁾。ところが、EDFAの出現とともに殆どすべての問題点が一挙に解決し、ソリトン通信が実現したのである¹¹⁻¹⁴⁾。

5. 5Gbit/s~10 Gbit/s ダイナミックソリトン伝送

利得スイッチ法によってLDからTransform-Limitedなパルスを発生させることは、キャリアの密度変調による周波数のダウンチャープが発生するために従来非常に困難であった。分布帰還型

レーザー(DFB LD)であっても、トランジェントな周波数変化が存在し、非線形なチャープによる波形歪が発生する。これらを除去するために利得スイッチしたDFB LDのスペクトルをファブリペロー形の狭帯域光フィルターで選択し、かつEDFAを組み合わせてTransform-Limitedなソリトンパルスを発生させる方法が最近提案されている^{36,37)}。このようにして、最終的にDFB LDからGHz帯でのソリトンパルス列が得られる³⁶⁾。

EDFAおよび上記のソリトン発生法を用いたソリトン伝送の実験構成をFig. 10に示す。分布定数的な利得を発生できる誘導ラマン散乱とは異なる、集中定数的ソリトン伝送法を用いるもので、N=1の代わりにN=1.2~2.0のソリトン、エルビウムファイバによる集中定数的増幅、低損失の光ファイバを組み合わせることが重要である¹²⁻¹⁴⁾。Fig. 10のEDFA 2からの出力ソリトン強度はN=2の領域に設定し、中継間隔 L_c を50 kmとしている。ソリトン光源は波長1.545 μm のDFB LDであり、そのパルス幅は20 psである。このTransform-Limitedなパルスはマッハツェンダー型のLiNbO₃強度変調器により符号化される。変調器からの出力はEDFA 1と2によりソリトンのパワー領域にまで増幅される。

ソリトン伝送用ファイバは零分散波長1.490~1.500 μm 、光損失0.24 dB/km、単長50 kmの分

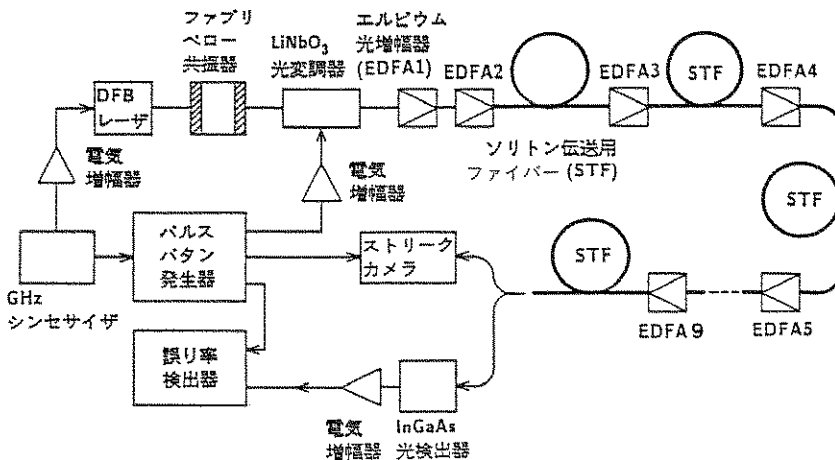


Fig. 10 EDFAを光中継器として用いた新しい光ソリトン通信の構成図。ファブリペロー共振器とEDFA 1,2により理想的なソリトンを用いた作り出ししている。分布定数的なソリトン伝送の代わりにEDFAを集中定数的なソリトン中継器として用いている点が新しい。

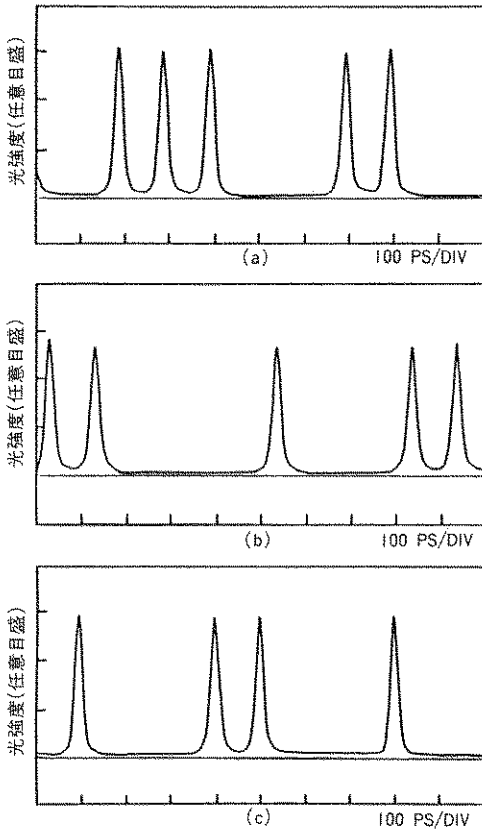


Fig. 11 300 km 地点で受光された 10 Gbit/s の符号化ソリトン列, (a)は $\langle 0111001100 \rangle$, (b)は $\langle 1100010011 \rangle$, (c)は $\langle 1001100100 \rangle$ で符号化されているが, 伝播後もソリトン波形に歪みが生じていない。

散シフトファイバーを 8 本用いている, 20 ps のパルスに対する $N=1$ ソリトンのピーク強度は 6-10 mW と非常に小さい。

伝搬後のソリトンパルスは, 帯域 15 GHz の In-GaAs PIN フォトダイオードで受光し, かつ広帯域な電気増幅器により増幅した後, エラーレートを測定した³⁶⁾。その際, シンクロスキャンのストリークカメラにより, 出力ソリトンの波形も測定している。その結果, 400 km 伝搬しても, パルス幅は広がらない無歪なソリトンパルスが観測されており, エラーレートは 1×10^{-9} 以下である。

10 Gbit/s-300 km のソリトン伝送実験の結果を Fig. 11 に示す³⁸⁾。Fig. 11 (a)~(c) の符号は $\langle 0111001100 \rangle$, $\langle 1100010011 \rangle$, $\langle 1001100100 \rangle$ であ

り, 伝搬したソリトン波形には歪が無いことがわかる。隣り合うソリトンパルスの裾には少し重なりがあるが, 伝搬距離が 300 km と短いためソリトン相互作用による引き込みもしくは反発現象は観測されていない。

6. まとめ

Er ドープ光ファイバー増幅器 (EDFA) について, Er ファイバーの作製法, 励起法, 吸収特性, 増幅特性, およびその応用について述べた。

EDFA は光ファイバーの最低損失波長域 (1.5 μm 帯) において高利得が得られること, In-line 形で挿入損が小さいこと, 低雑音であることなど光増幅器として優れた特性を有している。最近では変換効率が 70% 以上の EDFA が出現しており, ソリトンによる超短パルスの発生とあいまってモード同期, Q スイッチなどのレーザー制御の分野への応用が開けるであろう。またここで示したように EDFA は通常の強度変調によるパルス通信もしくはコヒーレント通信ばかりでなく, 比較的高出力なパルスが必要とするソリトンの発生と伝播にも適していることがわかる。近い将来数十 Gbit/s の伝送速度で 3000 km 以上にわたってソリトン伝送することも可能であろう。

Er³⁺ に限らず Nd³⁺, Sm³⁺, Tu³⁺ などの各種希土類イオンをファイバーにドープすることにより異なった波長において, EDFA のような増幅器を実現することも可能であろう。

小型励起光源の出現と光ファイバーの機能化がうまく整合し, EDFA が実現できたのはついここ 2-3 年であり, 希土類ドープファイバー全体としては今後さらに大きな発展が期待される。

謝 辞

日頃ご指導頂く NTT 伝送システム研究所島田 禎督所長, 石尾秀樹光通信研究部長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole and D. N. Payne: Electron. Lett. **21** (1985) 738.
- 2) S. B. Poole, D. N. Payne and M. E. Fer-

- mann : Electron. Lett. **21**(1985)737.
- 3) E. Desurvire, J. R. Simpson and P. C. Becker : Opt. Lett. **12**(1987)888.
 - 4) E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tuminelli and B. C. MaCollum : *Optical Fiber Communication Conference '88*, Anaheim, U. S. A. (1988)PD 2.
 - 5) Y. Kimura, K. Suzuki and M. Nakazawa : Electron. Lett. **25**(1989)1657.
 - 6) K. Suzuki, Y. Kimura and M. Nakazawa : Appl. Phys. Lett. **55**(1989)2573.
 - 7) H. Tanaka, T. Gozen and M. Yoshida : *Conference on Lasers and Electro-Optics '90*, Invited paper, (IEEE/LEOS and OSA), CFD 1(1990)488.
 - 8) C. J. Koester and E. Snitzer : Appl. Opt. **3**(1964)1182.
 - 9) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki : Appl. Phys. Lett. **54**(1989)295.
 - 10) 島田禎晉 : O plus E, No. 113(1989)75., および S. Shimada : Optics News **1**(1990)6.
 - 11) 中沢正隆 : 光学, 第 18 卷, 6 号(1989)291.
 - 12) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura : IEEE Photonics Technol. Lett. **2**(1990)216.
 - 13) H. Kubota and M. Nakazawa : IEEE J. Quantum Electronics **QE-26**(1990)692.
 - 14) K. Suzuki, M. Nakazawa, E. Yamada and Y. Kimura : Electron. Lett. **26**(1990)552.
 - 15) J. Stone and C. A. Burrus : Appl. Opt. **13**(1974)1256.
 - 16) M. J. Weber : *Handbook of Laser Science and Technology, vol. 1 Lasers and Masers*, CRC Press (1982)Ch. 2.
 - 17) 田中紘幸 : O plus E, No. 122(1990)112.
 - 18) 田中大一部, 酒井哲也, 野沢哲郎, 宮本末広, 山内良三 : 電子情報通信学会秋季全国大会(1989)C-279.
 - 19) M. Shimizu, H. Suda and M. Horiguchi : Electron. Lett. **23**(1987)768.
 - 20) T. Mukai, Y. Yamamoto and T. Kimura : IEEE J. Quantum Electron. **QE-18**(1982)1560.
 - 21) 中沢正隆 : 応用物理**56**(1987)1265.
 - 22) S. Uehara, M. Horiguchi, T. Takeshita, M. Okayasu, M. Yamada, M. Shimizu, O. Kogure and K. Oe : *International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication '89*, Kobe, Japan (1989)20PDB-11.
 - 23) K. Suzuki, Y. Kimura and M. Nakazawa : Electron. Lett. (1990)in press.
 - 24) E. Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson and J. L. Zyskind : *Conference on Lasers and Electro-Optics '89*, Baltimore, U. S. A. (1989)PD20.
 - 25) R. I. Laming, S. B. Poole and E. J. Tarbox : Opt. Lett. **13**(1988)1084.
 - 26) P. R. Morkel and R. I. Laming : Opt. Lett. **14**(1989)1062.
 - 27) M. Nakazawa, Y. Kimura and K. Suzuki : Electron. Lett. **26**(1990)548.
 - 28) H. Fevrier, J. Auge, V. Parlier, Ph. Bousselet, A. Dursin, J. F. Marcerou and B. Jacquier : *European Conference on Optical Communications '89*, Gothenburg, Sweden(1989)TUA5-2.
 - 29) S. B. Poole : *European Conference on Optical Communications '88*, Brighton, U. K. (1988)433.
 - 30) M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, *Optical Amplifiers and Their Applications*, Monterey, CA, PDP 1, (1990).
 - 31) K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, K. Nakagawa and M. Horiguchi : *Optical Communication Conference '89*, Houston, U. S. A. (1989)PD15.
 - 32) K. Nakagawa, K. Hagimoto and S. Nishi : *Optical Fiber Communication Conference '90*, San Francisco, U. S. A. (1990)WC2.
 - 33) S. Saito, T. Imai, T. Sugie, N. Ohkawa, Y. Ichihashi and T. Ito : *Optical Communication Conference '90*, San Francisco, U. S. A. (1990)PD2.

- 34) A. Hasegawa and F. Tappert: Appl. Phys. Lett. **23**(1973)142.
 35) L. F. Mollnauer and K. Smith: Opt. Lett. **13**(1988)675.
 36) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura: Opt. Lett., **15**(1990)588.
 37) M. Nakazawa, K. Suzuki and Y. Kimura: Opt. Lett., **15**(1990)in press.
 38) M. Nakazawa: *Ultrafast Phenomena*, Montrey, U. S. A., (Optical Society of America) (1990)232.

[筆者紹介]



中沢 正隆(なかざわ まさたか)
 昭和55年 東工大大学院博士課程了。
 同 年 電々公社入社。光ファイバー中の非線形光学効果、光ソリトン通信、フェムト秒レーザー技術、光ファイバー増幅器の研究に従事。
 昭和59年~60年 MIT 客員研究員
 現在 NTT 伝送システム研究所光通信研究部グループリーダー。工博。
 昭和54年度 丹羽保次郎記念賞、
 昭和58年 電子通信学会学術奨励賞、
 昭和59年度 光学論文賞、
 平成元年度 桜井健二郎賞、
 1990年度 英国電気学会より最優秀論文賞(IEE Electronics Letters Premium Award)受賞。
 著書「超高速光技術」(共著)など。

[連絡先]

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字白方白根
 162 NTT 伝送システム研究光通信研究部
 TEL 0292-87-7333

Abstract

Recent progress on erbium-doped fiber amplifiers (EDFA) has been very rapid since they have a great potential for opening a new field in high-speed optical communication. Their typical advantages are a high gain of more than 40 dB, low noise, wide bandwidth, polarization insensitive gain, and high saturation output power. They are also advantageous since it operates in the 1.5 μ m region where the fiber loss is minimized in ordinary silica-based single-mode optical fibers. Because of these excellent characteristics, EDFAs are very useful not only for high speed communication, but also optical for subscriber systems and optical soliton communication.

In this paper, we describe a whole feature of EDFAs, by looking at fabrication methods, absorption and gain characteristics, and their applications to optical communications. Especially, soliton transmission using EDFAs is described in detail since the soliton communication has been realized for the first time with these amplifiers.