

光ファイバー増幅器

清水 誠

光通信技術の進展は、波長多重 (WDM) および時分割多重 (TDM) 技術の組合せにより THz にも及ぶ超大容量伝送実験を成功させた¹⁻³⁾。この超大容量光伝送方式の実現を支えた基盤技術のひとつが光増幅器技術である。光増幅器は、光-電気変換することなく光ファイバー伝送時の伝送損失を補償するための技術である。従来の光-電気変換に比べて、変調方式やビットレートに依存しない光中継器が実現できるばかりでなく、波長多重された複数の信号光を一括して増幅できるために、通信の大容量化に必要な不可欠な技術となっている。

光増幅器は、増幅媒体の形態から半導体レーザー増幅器と光ファイバー増幅器とに大別される。光ファイバー増幅器はさらに増幅機構別に、誘導ラマン散乱過程に基づくファイバーラマン増幅器、誘導ブリリアン散乱過程に基づくファイバーブリリアン増幅器、光ファイバー中での四光子混合を利用した光パラメトリック増幅器、コアに添加された希土類元素のもつレーザー遷移を利用した希土類添加光ファイバー増幅器とに分類される。これらのうち、ファイバーラマン増幅器および希土類添加光ファイバー増幅器では伝送実験を含め数多くの研究がなされており、特に希土類添加光ファイバー増幅器ではすでに実際の通信回線への導入が進んでいる⁴⁾。

本解説では、まず始めに光ファイバー増幅器の一般的な構成方法について説明し、次に近年進展が著しい光ファイバー増幅器のうち、ファイバーラマン増幅器および希土類添加光ファイバー増幅器をとりあげ説明する。

1. 光ファイバー増幅器の構成方法

光ファイバー増幅器は、光励起により増幅用ファイバー内での誘導放出あるいは誘導非線形散乱現象を介して信号光を増幅する。増幅用光ファイバーは外部からの強い励起光により励起されるが、その励起光と信号光との伝搬方向別に分類される。図1は、光ファイバー増幅器の構成方法を分類して示した。光ファイバー増幅器は、信号光の伝搬方法より単一通過型と反射型に分けられる。単一通過型では、増幅用ファイバーの両端に偏波無依存型光アイソレーターを接続し、増幅器の発振を抑制している。一方、反射型では増幅用ファイバーの片端に光サーキュレーターを、他端にミラーを接続することで、信号光を増幅用ファイバー内で一往復させる。反射型では、増幅用ファイバー中を信号光が往復することから、小信号動作時では単一通過型のほぼ2台分の利得が得られる⁵⁾。

光ファイバー増幅器では、前述の分類以外に励起光の入射方法により、前方向励起、後方向励起、双方向励起の3種類に分類できる。励起方法は、増幅媒体の増幅機構と関連し、飽和出力および雑音特性に影響を与える。

次に、具体的に誘導ラマン散乱および希土類元素の誘導放出遷移を利用したファイバー増幅器について説明する。

2. ファイバーラマン増幅器

ファイバーラマン増幅器 (fiber Raman amplifier: FRA) では、光ファイバー中に強い励起光を入射させることにより、三次の非線形光学効果のひとつである光ファイバー内で誘導ラマン散乱 (stimulated Raman scattering: SRS) を介して信号光を増幅する⁶⁾。FRA

Fiber amplifiers (1996年8月13日受理)
Makoto SHIMIZU NTT エレクトロニクステクノロジー(株)
光デバイス事業部 (〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根162)

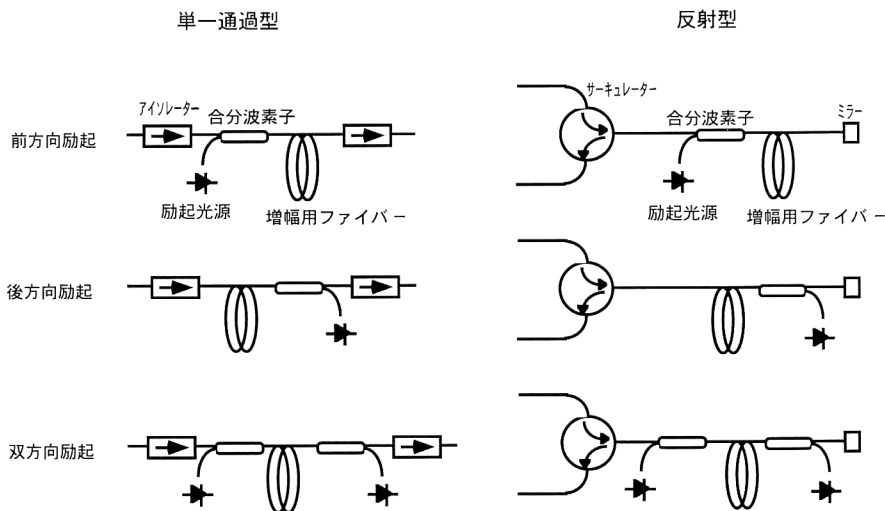


図1 光ファイバ増幅器の基本的な構成.

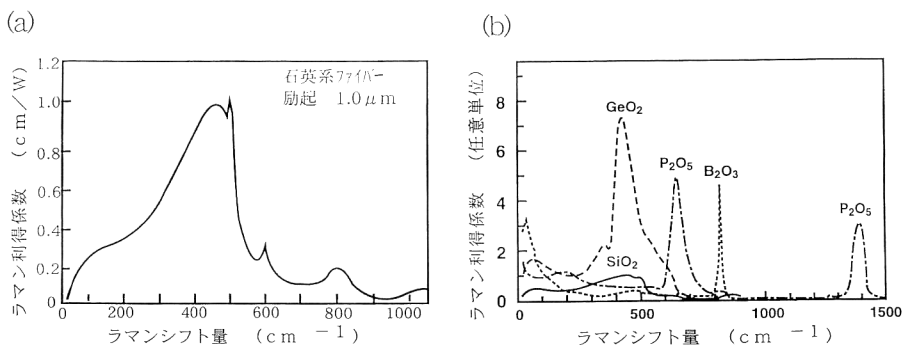


図2 各種ガラスにおけるラマン利得スペクトル. (a): 1.0 μm 励起による石英系ガラスファイバでのラマン利得⁷⁾, (b): 各種酸化物ガラスでのラマン利得スペクトル (石英ガラスのピーク値を1として規格化)⁸⁾.

の場合、信号光と励起光とは自動的に位相整合条件が満足されており、励起光の入射方向は、信号光と同一方向（前方向励起）および反対方向（後方向励起）が可能である。FRAの特徴は、増幅媒体として通常の石英ファイバが使用可能であること、励起波長を選択することにより任意の波長の信号光が増幅できること、利得は励起光の偏波方向に一致した方向で得られること、km以上の長尺のファイバを増幅媒体とする必要があることなどである。以下に、まずFRAの原理を説明した後に、最近開発が進んでいるカスケード型FRAについて解説する。

図2は、石英ガラスのラマン利得スペクトル⁷⁾、および光ファイバの屈折率制御用に添加する各種酸化物ガラスにおけるラマン利得スペクトルである⁸⁾。横軸はガラス中で発生したラマン光と励起光とのエネルギー差

(ラマンシフト量)であり、各ガラスの有する光学フォノンのエネルギーに対応している。図2(b)の縦軸は、石英ガラスのラマン利得のピーク値により規格化して表示してある。石英ガラスにおける誘導ラマン散乱スペクトルの特徴は、ガラス構造のランダム性に起因し100 cm^{-1} 程度の比較的ブロードなピークを有することである。このことは、FRAが20 nm以上の実用上十分な増幅信号波長帯域をもつことを意味している。一方、ラマンスペクトルは図2よりわかるようにガラス組成に強く依存している。屈折率制御用に石英ファイバに添加される酸化物のうち一般的に使用されている二酸化ゲルマニウム (GeO_2) では、400~500 cm^{-1} の範囲におけるラマン利得が石英ガラスの約9倍と高い値を有している。このことは、高濃度に GeO_2 を添加した光ファイバではFRAの効率が向上することを意味している⁹⁾。

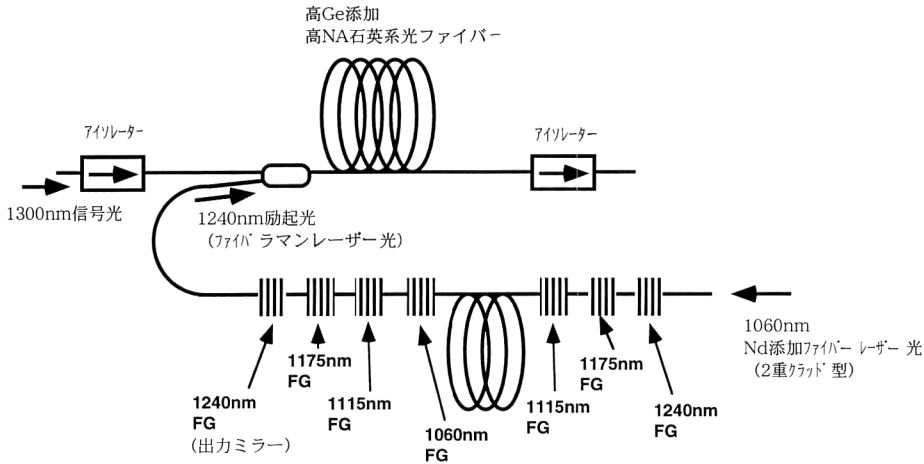


図3 カスケード型ファイバーラマン増幅器の構成¹⁰⁾。FG：ファイバグレーティング。

1.3 μm 信号増幅を考える場合、20 dB 程度の利得を得るためには通常 1 W 程度の励起光量が必要となる。高効率 FRA を実現するうえで励起光源に対する必要条件は、発振波長が信号光より短波長側に約 460 cm^{-1} 離れていること、単一モード光ファイバーへの入射光量として 1 W 程度が得られること、である。このような条件を満足する光源を LD で実現することが困難であったために、通信用光増幅器としての実用化は進んでいなかった。最近になり、この励起光源の問題を解決する有力な技術として、カスケード型 FRA が開発された。

カスケード型 FRA は、最初に 1.3 μm 帯光増幅器として開発された¹⁰⁾。1.3 μm 帯増幅のためには、励起光として約 1.24 μm の高出力光源が必要である。カスケード型 FRA では、高出力 GaAs アレイ LD 励起 Nd 添加ファイバーレーザーを励起光源として使用し、ファイバグレーティング (fiber grating: FG) により共振器型ファイバーラマンレーザーを構成することで、ファイバーレーザーからの励起光を高い効率で 1.24 μm に波長変換している。

図3は、1.3 μm 帯増幅用カスケード型 FRA の構成を示している。ファイバーレーザーからの励起光を、FG を用いた入れ子構成のファイバーラマン共振器により高効率で三次ストークス光 (1.24 μm) に変換している。この三次ストークス光は、増幅用高 NA ファイバーに入射し信号光の増幅を行う。励起波長の変換部で、FG を利用し共振器内損失を低減化したこと、共振器内の強い n 次ストークス発振光を励起として $(n+1)$ 次ストークス光を発振させること、最終段での信号光の増幅に高 GeO_2 濃度のファイバーを使用すること、等で増

幅器全体の高効率動作を実現している。このカスケード型 FRA により、1.3 μm 帯増幅器として、30 dB 以上の小信号利得、20 dBm 程度の飽和出力が実現されており、また雑音・歪み特性が最も厳しい AM-VSB-SCM (サブキャリアー多重・残留側帯波・振幅変調) 方式での映像伝送の成功が報告されている。

3. 希土類添加光ファイバー増幅器

希土類添加光ファイバー増幅器 (rare-earth doped fiber amplifier: RFA) では、光ファイバーのコアの一部あるいは全体に希土類元素を微量添加した光ファイバーを増幅媒体として使用する。希土類元素では、可視から近赤外にかけて多くの誘導放出遷移が確認されている。図4に、主要な希土類元素のエネルギー準位図を示す。通信波長帯での増幅動作を前提とすると、1.5 μm 帯増幅では Er (エルビウム)、1.3 μm 帯では Pr (プラセオジウム) あるいは Nd (ネオジウム)、1.4 μm 帯あるいは 1.6 μm 帯では Tm (ツリウム) が主として使用される。RFA の特徴は、光ファイバーを増幅媒体として用いるために伝送路と低損失で接続できる、利得の偏波依存性が生じない (あるいは無視し得るほど小さい)、誘導放出始準位の寿命が μs 以上と比較的長いために信号光のパターン効果が生じない、などである。

RFA では、無輻射遷移を抑制し誘導放出遷移の割合を最大限高めるためにホストガラスの選択が重要である。図5は、代表的なガラス組成に対して多重フォノンによる緩和率を示している。ガラス中の格子振動に基づく多重フォノン緩和は、無輻射遷移の原因であり、ガラス組成に強く依存している。当然であるが、エネルギー

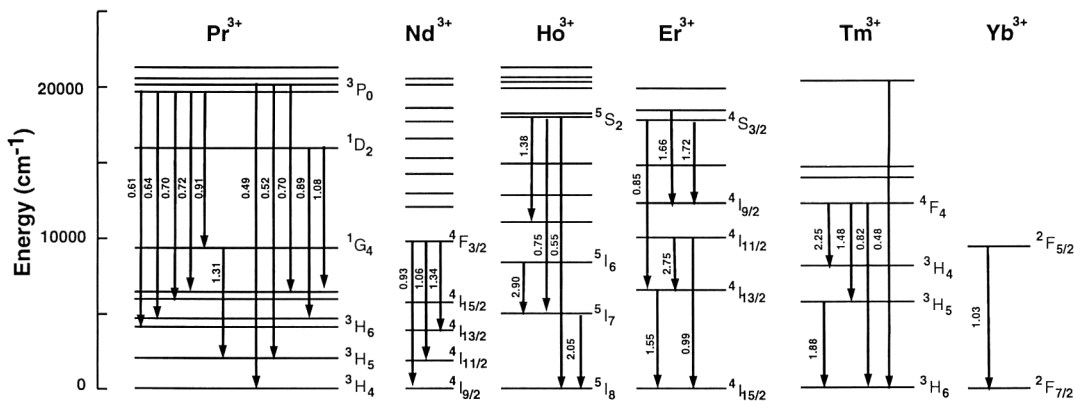


図4 主要3価希土類イオンのエネルギー準位とガラス中での主要レーザー遷移。図中の矢印はすでに報告されているレーザー遷移。矢印の数字はレーザー遷移の中心波長 (μm)。

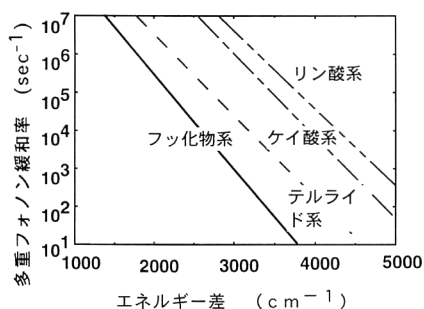


図5 各種ガラスの多重フォノン緩和率。

差の小さい準位間での緩和過程は多重フォノン緩和により無輻射遷移が支配的となる。酸化物系ガラスに比べて、フッ化物系ガラス、カルコゲナイド系ガラスでは多重フォノン緩和確率が低く、この結果エネルギー差の小さな複数の準位を含む遷移においても無輻射遷移が抑制され高効率な誘導放出が実現できる。このため、使用する希土類元素の種類に応じて、高効率動作を可能とするホストガラスの選択について考慮する必要がある。

次に、1.5 μm 帯および1.3 μm 帯光ファイバー増幅器として、Er 添加ファイバー増幅器 (Er-doped fiber amplifier: EDFA) と Pr 添加ファイバー増幅器 (Pr-doped fiber amplifier: PDFA) について説明する。

3.1 Er 添加ファイバー増幅器

EDFA は3準位系の誘導放出遷移である⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} 準位間の誘導放出遷移を利用して1.5 μm 帯光増幅を行う¹¹⁻¹³。⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} 遷移が最低励起準位から基底準位への遷移であること、エネルギー差が6500 cm⁻¹ と大きいことから、酸化物ガラスを含むあらゆるガラス系で増幅動作が期待できる。

励起は⁴I_{15/2}-⁴I_{13/2} 遷移 (1480 nm 励起)、⁴I_{15/2}-⁴I_{11/2} 遷移 (980 nm 励起)、⁴I_{15/2}-⁴I_{9/2} 遷移 (800 nm 励起)、⁴I_{15/2}-⁴F_{9/2} 遷移 (660 nm 励起) 等が可能であるが、800 nm 帯および660 nm 励起では励起準位吸収 (⁴I_{13/2}-⁴F_{9/2}, ⁴I_{13/2}-⁴S_{3/2}) を避けた波長を設定する必要がある¹⁴。このため、実用的な EDFA では励起波長は980 nm あるいは1480 nm のどちらかとなる。この両者の差異は、980 nm 励起では⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} 準位間で完全な反転状態が実現できるのに対し、1480 nm では⁴I_{13/2} 準位内への励起のために完全な反転状態が実現できない点にある。この結果、980 nm 励起 EDFA では量子限界に迫る低い雑音指数が得られる。一方、励起光から信号光へのエネルギーの変換効率に関しては1480 nm 励起の方が980 nm 励起より優れている。半導体レーザー技術の進展により、980 nm および1480 nm とともに100 mW 以上の出力のLD モジュールが実用化されており、これらを使用した小型で高効率な EDFA が実用化されている。

EDFA の高効率動作を実現するためには、励起光に対する励起準位間吸収以外にも、Er の高濃度添加により生じる濃度消光 (具体的には pair-induced quenching や co-operative up-conversion など) も考慮する必要がある。一方、ファイバー構造の面でも高 NA・細径コア構造による光強度の向上¹⁵、添加濃度の最適化による濃度消光の低減化¹⁶、コア中心のみに Er 添加する構造¹⁷、等が検討されてきた。図6は、石英系 EDFA において高 NA・細径コア構造と添加濃度の最適化により達成された増幅特性であり、40 dB 以上の高利得を10 mW と低い励起光量で達成している¹⁵。

光増幅器における重要な技術課題である広帯域化に関しては、WDM 伝送での適用も踏まえ多くの研究が行

われている。広帯域化の手法としては、ホストガラス材料の検討¹⁸⁾、利得制御用光フィルターの検討¹⁹⁾、利得負帰還法の検討²⁰⁾等があげられる。これらの中で、最近特に注目されているホストガラス材料に関する検討結果について述べる。

EDFA ではすでに述べたように、酸化物からカルコゲナイドガラスにわたるほぼすべてのガラス系で増幅動作が期待できる。しかしながら実際に増幅器として使用できるためには低損失ファイバーの製造技術の確立が不可欠であり、現状ではEDFAのホストガラスとしては石英系光ファイバーおよびフッ化物系光ファイバーに絞られる。

図7は、Al/Ge共添加石英系EDFAとZr系フッ化物EDFAのASEスペクトルである。図7より、ホストガラス組成に依存してEDFAのASEスペクトルが変わること、広増幅帯域EDFAとして一般的に用いられているAl/Ge共添加石英系EDFAに比べてフッ化物EDFAがさらに広帯域化に有効なことがわかる。両者

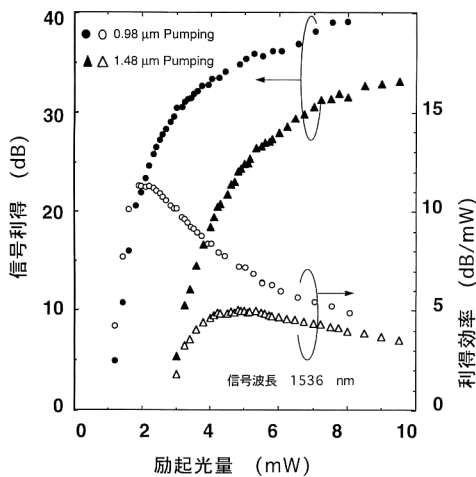


図6 Er添加石英系ファイバー増幅器の小信号利得特性¹⁵⁾。

の差異は、実際に利得スペクトルを比較することにより、より明確となる。

図8は、1.48 μm 励起における両者の小信号動作時での利得スペクトルを比較した図である。1.55 μm 近傍での1 dB以下の利得偏差を問題にする場合には石英系EDFAの方が適しているのに対し、1.53 μm から1.56 μm にわたる広波長域での利得偏差を問題にする場合には、石英系では1.54 μm での利得の谷が存在するため、フッ化物系の方が適していることがわかる。フッ化物系での問題点としては、 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 準位の寿命が長く励起ESAが顕著となる結果、0.98 μm 励起が行えないことがあった。しかしながら、0.98 μm 励起石英系EDFAと1.48 μm 励起フッ化物EDFAをカスケードに接続した構成により、低雑音でかつ広帯域なハイブリッド構成のEDFAも開発されており、WDM伝送による大容量光通信実験も精力的に進められている¹⁾。

3.2 Pr添加ファイバー増幅器

図9に、Prのエネルギー準位を示した。Prでは、基底準位 ${}^3\text{H}_4$ から ${}^1\text{G}_4$ 準位に対応する光励起により ${}^1\text{G}_4$ 準位に電子を遷移させることで、 ${}^1\text{G}_4$ 準位と ${}^3\text{H}_5$ 準位間で

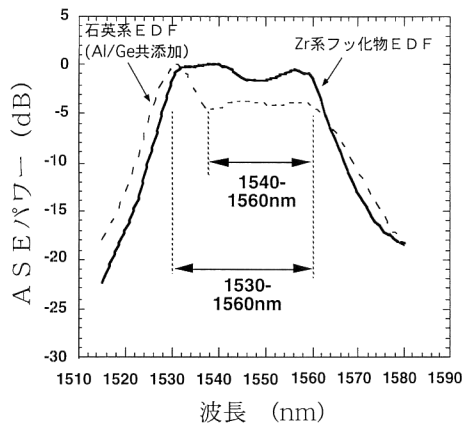


図7 石英系EDFAとフッ化物系EDFAのASEスペクトルの比較²⁵⁾。

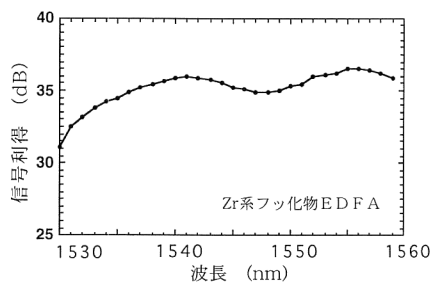
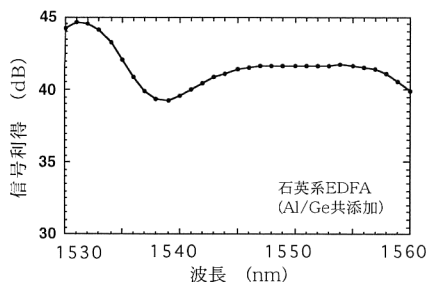


図8 石英系EDFAとフッ化物系EDFAの小信号利得スペクトルの比較。

反転分布を形成し、誘導放出遷移により光増幅を行う²¹⁾。この、 1G_4 準位と 3H_5 準位間のエネルギー差は波長に換算するとほぼ $1.3\mu\text{m}$ であり、光通信で使用される通信波長帯と一致する。一方、 3H_4 から 3F_4 へのGSA、信号光および励起光に対するESA、アップコンバージョン過程等により $1.3\mu\text{m}$ 帯の利得は低下する。

高効率PDFAを実現するにあたり重要な技術的課題は、以下の3点である。

- (1) 励起は 1G_4 準位を直接光励起する必要がある
- (2) 1G_4 から 3F_4 準位への無輻射遷移を抑える
- (3) コアの細径化・高NA化によるコア内光強度の向上

第1点目は、励起光源に対する選定条件を与える。第2点目は、効率の良いPDFAを実現するためのホストガラス選定条件を示している。実際、光通信用として使用している石英系ファイバーでは $1.3\mu\text{m}$ 帯での蛍光は観測できず、フッ化物ガラス、ハライド系ガラス、カルコゲナイド系ガラスの使用が必要となる。これらのなかで、低損失光ファイバー製造技術の確立しているZr系フッ化物ガラスが現在のところPDFAのホストガラス

としては最有力候補であるが、その励起および蛍光スペクトルを図10に示した。吸収ピーク波長は $1.017\mu\text{m}$ である。一方、蛍光ピークは $1.31\mu\text{m}$ である。Pr添加Zr系フッ化物ガラスでの、蛍光寿命は濃度消光が無視できる低濃度添加領域で $110\mu\text{s}$ であり、発光の量子効率率は約4%である。このために、PDFAの高利得・高効率化のためには光ファイバーの高NA・細径コア化が重要であり、併せて高出力励起光源の使用が必要となる。

以上述べた検討結果を基に、PDFAモジュールが開発され、伝送実験の結果も報告されている。実際に伝送実験に供されたPDFAの例として、Nd:YLFレーザー励起Zr系PDFAについて簡単に特性を示す。

図11は、Nd:YLFレーザーを2台使用したカスケード型PDFAの構成図である²²⁾。この特徴は、前段部を前方向励起により低雑音動作させ、後段部を後方高励起により高出力動作させることで、低雑音でかつ高出力増幅器を構成できる点にある。中間部に挿入した光アイソレーターは、後段部で発生するASEが前段部に注入され特性が劣化することを防いでいる。Pr添加フッ化

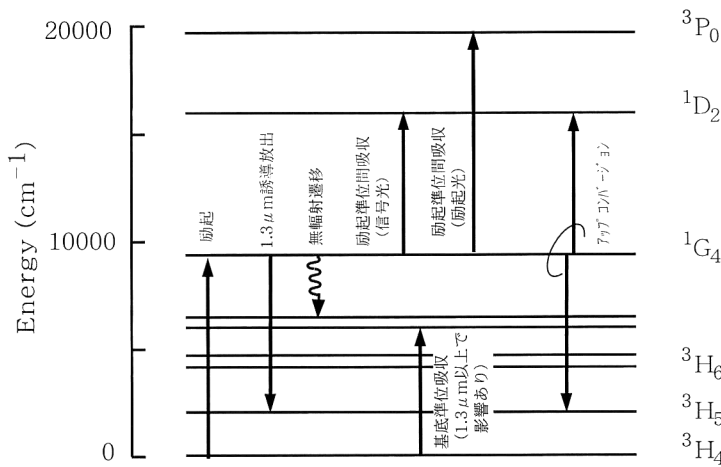


図9 Pr イオンのエネルギー準位と主要遷移。

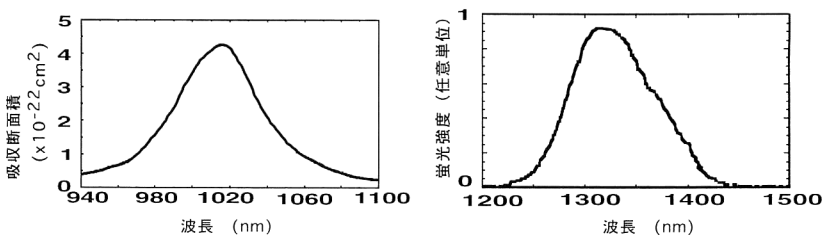


図10 Zr系フッ化物PDFの励起および蛍光スペクトル。

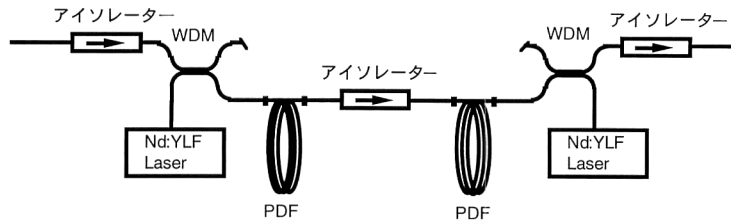


図 11 カスケード型 PDFA (Nd:YLF 励起) の構成²²⁾.

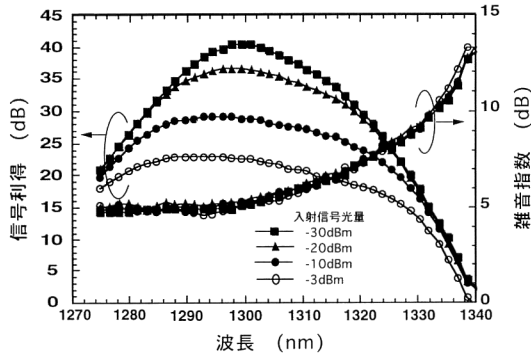


図 12 カスケード型 PDFA (Nd:YLF 励起) の増幅特性²²⁾.

物光ファイバーのパラメーターは、比屈折率差 2.5%，Pr 添加濃度 1000 ppm，カットオフ波長約 0.95 μm であり、ファイバー長は 14 m および 22 m である。

図 12 は、信号光入力光量をパラメーターとして測定した利得と雑音指数の信号光波長依存性である。励起光量は、各々 550 mW である。入力信号光量が増加するに従い、増幅器の飽和により最大利得が低下していくとともに、3 dB 利得が低下する波長幅で定義される増幅帯域が広がっていくことがわかる。小信号動作時での利得のピーク波長は 1.30 μm である。

雑音指数に関しては、4 準位系レーザー遷移であることに起因し、入力信号光量に対する依存性は小さくほぼ無視できる。一方、信号光波長が長波長になるほど雑音指数が増加する傾向にあるが、これは前述の $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 遷移に対応した吸収の裾による影響である。

Nd:YLF 励起 PDFA では、10 GHz-NRZ 伝送実験あるいは AM-VSB-CATV 伝送の成功が報告されており、加えて実際に敷設された光ファイバーを使用した伝送実験にも成功している²³⁾。

PDFA の高効率化に向けた研究としては、In 系ホストガラスの開発が精力的に進められており、励起用半導体 LD の高出力化と相まって小型で高出力なモジュールの開発も報告されている²⁴⁾。

本稿では、光ファイバー増幅器としてファイバーラマン増幅器および希土類添加光ファイバー増幅器について解説した。特に希土類添加光ファイバー増幅器は、EDFA を中心に近年めざましい進展を遂げ、その特性はすでに電気増幅器を使用したベースバンド増幅方式より格段に優れた特性を実現した。大容量光伝送方式として有力な WDM 伝送方式では、光ファイバー増幅器の使用が必要不可欠となっている。今後、光通信におけるキーデバイスとして伝送システムへの導入が加速されるとともに、光計測等の分野にも光ファイバー増幅器技術が適用されていくものと考えられる。

文 献

- 1) T. Norioka, T. Takara, S. Kawanishi, O. Kamatani, K. Takiguchi, K. Uchiyama, M. Saruwatari, H. Takahashi, M. Yamada, T. Kanamori and H. Ono: "100 Gbit/s \times 10 channel OTDM/WDM transmission using a single-supercontinuum WDM source," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD 21 (1996).
- 2) 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 μm zero-dispersion single-mode fiber," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD 19 (1996).
- 3) A. H. Gbauck, 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 Optical Fiber Communication Conference (OFC) '96*, PD 20 (1996).
- 4) J. Fee: "EDFA application in the terrestrial network and future directions," *Technical Digest of Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '96*, (1996) pp. 26-29.
- 5) S. Nishi, K. Aida and K. Nakagawa: "High efficient configuration of erbium-doped fiber amplifier," *Technical Digest of European Conference on Optical Communication (ECOC) '90*, MoG 4. 4 (1996).
- 6) Y. Aoki: "Fiber Raman amplifier properties for applications to long-distance optical communications," *Opt. Quantum Electron.*, **21** (1989) S89-S104.
- 7) R. H. Stolen and E. P. Ippen: "Raman gain in glass optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, **22** (1973) 276-278.

- 8) F. L. Galeener, J. C. Mikkelsen, Jr. R. H. Geils and W. J. Mosby: "The relative Raman cross sections of vitreous SiO₂, GeO₂, B₂O₃ and P₂O₅," *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978) 34-36.
- 9) T. Nakashima, S. Seikai, M. Nakazawa and Y. Negishi: "Theoretical limit of repeater spacing in an optical transmission line utilizing Raman amplification," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 1267-1272.
- 10) 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 μm cascaded Raman amplifier in germanosilicate fibers," *Technical Digest of Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '93*, PD-3 (1996).
- 11) E. Snitzer and R. Woodcock: "Yb³⁺-Er³⁺ glass laser," *Appl. Phys. Lett.*, **21** (1985) 737.
- 12) R. J. Mears, L. Reelie, I. M. Jauncey and D. N. Payne: "High-gain rare-earth-doped fiber amplifier at 1.54 μm," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference/Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/IOOC) '87* (1987) p. 167.
- 13) E. Desurvire: *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications* (Wiely, New York, 1994).
- 14) R. I. Laming, S. B. Poole and E. J. Terbox: "Pump excited-state absorption in erbium-doped fibers," *Opt. Lett.*, **26** (1988) 1084-1086.
- 15) M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi, T. Takeshita and M. Okayasu: "Erbium-doped fiber amplifiers with an extremely high gain coefficient of 11.0 dB/mW," *Electron. Lett.*, **26** (1990) 1641-1642.
- 16) M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi and E. Sugita: "Concentration effect on optical amplification characteristics of Er-doped silica single-mode fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 43-45.
- 17) B. J. Ainslie, J. R. Armitage, S. P. Craig and B. Wakefield: "Fabrication and optimisation of the erbium distribution in silica based doped fibers," *Technical Digest of European Conference on Optical Communication (ECOC) '88* (1988) pp. 62-65.
- 18) W. J. Miniscalco: "Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1550 nm," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-9** (1991) 234-250.
- 19) M. Tachibana, R. I. Laming, P. R. Morkel and D. N. Payne: "Gain-shaped erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with broad spectral bandwidth," *Technical Digest of Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '90* (1990) pp. 44-47.
- 20) V. L. DaSilva, Y. Silberberg, J. S. Wang, E. L. Goldstein and M. J. Andrejco: "Automatic gain flattening in Er-doped-fiber amplifier," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference/Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/IOOC) '93* (1993) p. 174.
- 21) Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, S. Takahashi, E. Snitzer and G. H. Sigel: "Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operating at 1.31 μm," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference (OFC) '91, PD2* (1991).
- 22) M. Yamada, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, K. Oikawa, H. Yoshinaga, K. Kikushima, Y. Miyamoto and S. Sudo: "Low-noise and high-power Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7** (1995) 869-871.
- 23) T. Whitley, R. Lobbett, R. Wyatt and D. Szebst: "5 Gbps transmission over 100 km of optical fiber using a directly modulated DFB laser and an engineered 1.3 μm Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier," *Technical Digest of Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '94, WB1* (1994).
- 24) Y. Nishida, T. Kanamori, Y. Ohishi, M. Yamada, K. Kobayashi and S. Sudo: "Efficient PDFA module using PbF₂/InF₃-based fluoride fiber," *Technical Digest of Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '96, PD3* (1996).
- 25) M. Yamada, T. Kanamori, Y. Terunuma, K. Oikawa, M. Shimizu, S. Sudo and K. Sagawa: "Fluoride-based erbium-doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8** (1996) 882-884.