

光ファイバ増幅器

豊田工業大学大学院 工学研究科
先端フォトンテクノロジー研究センター

大石 泰 丈

Optical fiber amplifiers

Yasutake Ohishi

Research Center for Advanced Photon Technology Graduate School of Engineering Toyota Technological Institute

1. はじめに

インターネット技術の発展は目覚ましく、世界全体で数十億台を超えるコンピュータが相互に接続されデータや画像等いろいろな情報を人々が交換して生活するようになってきている。今後予想される良質な動画像の送受信には基幹伝送網でテラビットからペタビット級の大容量光通信技術が必要になる。そのような大容量光通信を実現するために WDM (Wavelength Division Multiplexing) 伝送技術の開発が進められてきた。EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) を用いると WDM 信号が一括増幅できるため中継器コストの大幅な低減が可能となるため、WDM システムのキーデバイスとなっている。WDM 伝送で大容量化するには、一波当たりの通信速度を上げるとともに信号の波長数を増やす必要があり、そのため光増幅器の広帯域化が不可欠である。また、 $1.3\mu\text{m}$ 帯から $1.65\mu\text{m}$ 帯にわたる光ファイバの低損失波長域は 50THz 近くあり、それをすべて利用できれば通信容量を一挙に大規模化できるため、ファイバラマン増幅器などの EDFA 以外の光フ

ァイバ増幅器を用いた増幅波長域拡大の研究も精力的なされてきた。また、光ファイバの増幅機能は、単に信号増幅だけではなく、光信号の制御にも積極的に応用されようとしている。本稿では、光ファイバーアンプの基礎を紹介する。

2. 光ファイバ増幅器の原理

ここでは最も開発の進んだ希土類添加光ファイバ増幅器とファイバラマン増幅器について動作原理を述べる [1]。

(1) 希土類添加光ファイバ増幅器

希土類添加光ファイバ増幅器は希土類イオンの $4f$ エネルギー準位間の誘導放出遷移を利用して光の増幅を行う。これまでに開発された希土類添加光ファイバ増幅器は EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), PDFA (Praseodymium-Doped Fiber Amplifier) などである。Er, Tm, Pr のエネルギー準位ダイアグラムを図 1 に示す。Er では、 $^4I_{13/2}$ 準位と $^4I_{15/2}$ 準位間の誘導放出により $1.5\mu\text{m}$ 帯の光増幅がなされ、Tm では、 3H_4 準位と 3F_4 準位間の誘導放出により、また、Pr では 1G_4 準位と 3H 準位間の誘導放出によりそれぞれ $1.46\mu\text{m}$ 帯および $1.3\mu\text{m}$ 帯等の光通信波長帯での光増幅が可能になる。これまでに開発された光ファイバ増幅器の増幅帯域を図 2 にまとめる。

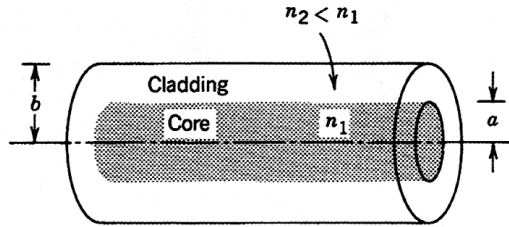


図3 光ファイバの構造

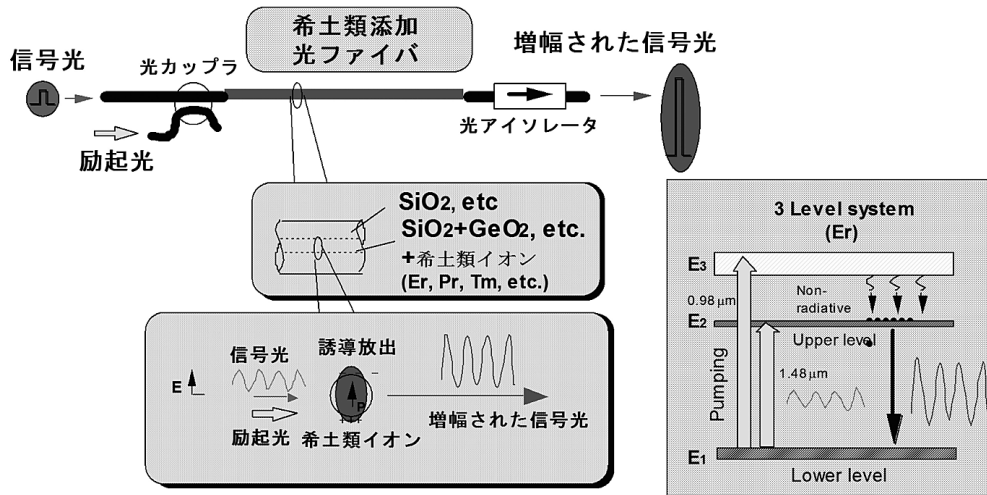


図4 希土類添加光ファイバ増幅器の構成図

に沿ってこの遷移が連続的に起こり、増幅作用が積分されて大きな利得が得られることになる。光ファイバは、コアとクラッドからなり（図3 [2]）、クラッドより高い屈折率を持ったコア内をコア・クラッド界面での全反射を繰り返しながら、伝搬する。コアとクラッドとの屈折率の差を大きくとれば、コア径はより小さくすることができ、コア内での光のパワー密度を大きくすることができるので、励起効率を上げることができる。したがって、光ファイバをErのホストに使うもう一つの利点は、小さなコア内（直径： $\sim 4\ \mu\text{m}$ ）に励起光を閉じこめるため高い励起光密度が得られ、励起効率が非常に上げられる点である。その結果、 $0.98\ \mu\text{m}$ 帯励起では $10\ \text{dB/mW}$ 以上、 $1.48\ \mu\text{m}$ 帯励起では $6\ \text{dB/mW}$ 以上の利得効率が実現されている。

具体的な希土類添加光ファイバ増幅器の構成

は、図4のようになる。励起光と信号光とを光カップラにより合流して希土類添加光ファイバに入射させる。励起光によりコアに添加された希土類イオンは励起され、誘導放出により信号光を増幅する。光アイソレータはレーザー発振を抑えて利得を高く保持するために使われる。

(2) ファイバラマン増幅器

ラマン散乱は、物質の光学フォノンと光の相互作用によって生じる。図5に示すように、入射光により物質が仮想状態に励起され脱励起する際物質の光学フォノンが励起されそのエネルギーに対応したストークスシフト分だけ周波数の低い光（ストークス光）が生成される。ストークス光の波長と同じ波長を有する光が同時に入射すると誘導ラマン散乱によって利得を得る。ファイバラマン増幅器はこの誘導過程を利用し

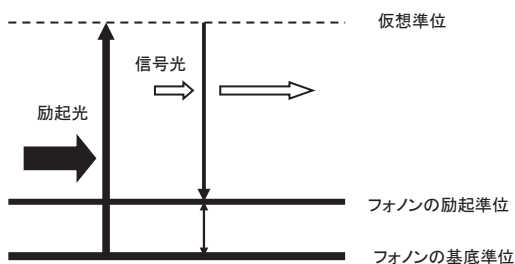


図5 ラマン増幅過程

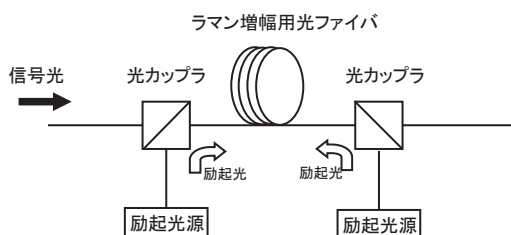


図6 ファイバラマン増幅器の構成図

た光増幅器である。すなわち、ファイバラマン増幅器を実現するには、増幅したい信号光からストークスシフト分短い波長を持つ励起光を用意し、利得媒質である光ファイバ中で誘導ラマン散乱が起きるように、EDFAのように励起光と信号光を光カップラによって合波しこれらの光が同時に増幅用光ファイバを伝搬するように構成する（図6）。誘導ラマン散乱は光学フォノンの等方性によってその散乱断面積が励起光と信号光の伝搬方向にあまりよらないという特徴がある。したがって、ファイバラマン増幅

器では励起光が信号光に対して同方向に伝搬しても反対方向でもほぼ同じ利得を生じる。

ラマン増幅スペクトルは媒質を構成する分子に依存する。したがって、媒質の構成分子を変えることにより、増幅特性を制御することができる。これまでに石英光ファイバではドーパントとラマン増幅特性の相関が研究されてきた。また、最近では、石英光ファイバ以外のテルライトファイバやシリコン導波路や半導体による新規な利得媒質を用いたラマン光増幅器の研究も行われるようになり、新たな可能性も検討されている。

5. むすび

希土類添加光ファイバ増幅器とファイバラマン増幅器について述べた。その応用可能な分野は非常に広い。新しい素材による光増幅器研究の進展および応用が今後も期待される。

参考文献

1. たとえば, Emmanuel Desurvire, Dominique Bayart, Bertrand Desthieux and Sebastien Bigo, "Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and Applications", A John Wiley & Sons, Inc., 2002.
2. Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, John Wiley & Sons, Inc., 1991.