

広帯域光ファイバ増幅技術

NTTフォトリクス研究所

やまだ まこと しみず まこと
山田 誠 / 清水 誠

光ファイバ増幅器の帯域拡大は、フォトニックネットワーク等の光通信システムの大規模化および高機能化を進めるうえで重要です。NTTフォトリクス研究所で研究開発を行っているS帯希土類ファイバ増幅技術による希土類添加ファイバ増幅器の広帯域化と、広帯域化に優れるテルライトガラスを用いたテルライトファイバ・ラマン増幅技術による広帯域ファイバラマン増幅技術について解説します。

広帯域光ファイバ増幅器の重要性

PCに代表される情報端末とインターネットをはじめとするマルチメディア技術の普及は、通信ネットワークを大規模・複雑にするとともにトラフィック量を着実に増大させています。そこで波長多重技術によって伝送容量の増大を図るとともに、光ノード機能の付加によりシステムの柔軟性向上・多機能化が実現

可能なフォトニックネットワークの開発が進められています⁽¹⁾。

光ファイバ増幅器は、伝送用光ファイバやネットワークを構成する光デバイスの損失を補償するもので、ネットワークの大規模化・長距離化を推し進めるうえで重要なシステム構成要素であり、その増幅帯域は、システム運用波長帯を決定するといっても過言ではありません^{(2),(3)}。

広帯域化の概要

光ファイバ増幅器には、 Er^{3+} 添加ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)に代表とされる希土類添加ファイバ増幅器と、誘導ラマン散乱現象を用いて光増幅を行うファイバラマン増幅器(FRA: Fiber Raman Amplifier)があります。

各増幅器の増幅帯域と伝送光ファイバの損失特性を図1に示します。

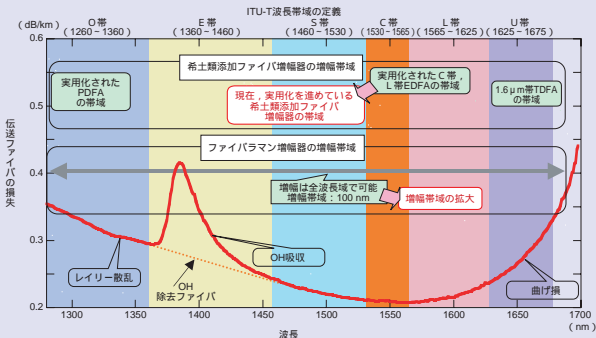


図1 光ファイバ増幅器の増幅帯域と伝送用ファイバの損失特性

NTTフォトリソ研究では、両増幅器の広帯域化を進めており、希土類添加ファイバ増幅器では、これまで開発したC帯EDFA（増幅域：1530～1565 nm）、L帯EDFA（増幅域：1565～1615 nm）に次いで、S帯希土類ファイバ増幅器の開発を進めています。また、FRAでは、広帯域化に優れたテルライトガラスを用いたテルライトファイバを新規に開発して帯域特性の改善を図っています。

S帯希土類ファイバ増幅器の原理および特性

S帯希土類ファイバ増幅器を実現する方法としては、図2左上に示すように、増幅媒体に Tm^{3+} 添加ファイバ（TDF: Thulium Doped Fiber）を用いた Tm^{3+} 添加ファイバ増幅器（TDF: Thulium Doped Fiber Amplifier）と、 Er^{3+} 添加ファイバ（EDF: Erbium

doped Fiber）の増幅帯域をS帯増幅域へ拡張したS帯EDFAがあります。

TDF

TDFは、増幅媒体としてTDFを用います。図2右上の Tm^{3+} のエネルギー単位図に示すように、S帯増幅は 3H_4 、 3F_4 準位間の誘導放出を利用します。また高効率で同増幅を実現するために、フッ化物ガラスを用います（石英系ファイバに Tm^{3+} を添加した例もありますが励起効率上課題があります）。さらに、増幅始準位： 3H_4 の蛍光寿命が終準位に比べて短いため、 3H_4 、 3F_4 準位間の反転分布は、基底準位： 3H_6 から増幅終準位： 3F_4 に励起する第1励起過程と、増幅終準位： 3F_4 にたまったイオンを増幅始準位： 3H_4 に励起する第2励起過程により形成されず^{(4),(5)}。TDFの利得スペクトルでは、高い反転分布状態においての利得ピークが1460 nmに現れますが、反転分布状態を約40%程度

にすることにより、S帯にピークを持つ増幅帯域が実現できます。このため、S帯で動作するTDFはGS-TDF（Gain Shifted TDF）と呼ばれます。

現在、この反転分布状態を実現するため、高濃度の Tm^{3+} をフッ化物ファイバに添加（6000 ppm）することによって Tm^{3+} 間でクロス緩和を発生させ、増幅終準位： 3F_4 のイオン数を増加することによりS帯で動作するTDFが実現しています。この方法では、第1励起および第2励起過程共に1.4 μm 半導体レーザーでの励起が可能です。実現したS帯TDFの増幅特性を図3に示します⁽⁶⁾。利得等価器を用い、1480～1510 nm帯において優れた利得平坦特性を実現しました。また、TDFは Tm^{3+} 添加濃度を低濃度化する、あるいは励起波長を1.047 μm 等に変更することによってTDFの反転分布状態を高くし、増幅帯域S帯の短波長側（1450～1480 nm

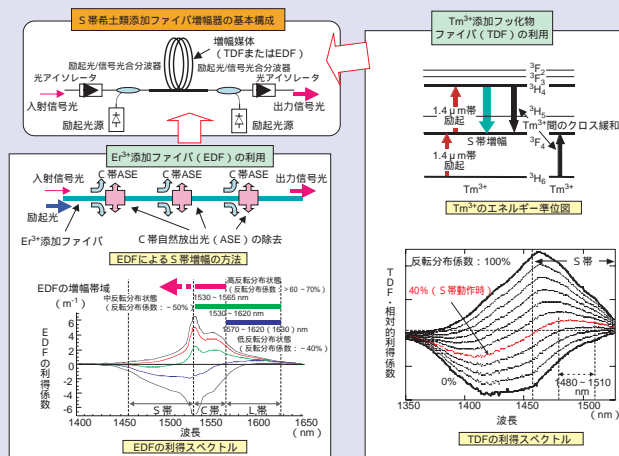


図2 S帯希土類添加ファイバ増幅器・実現方法

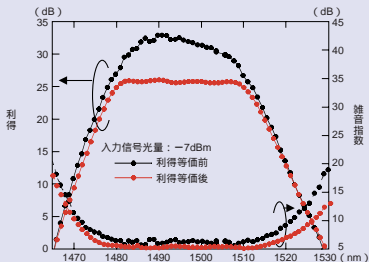


図3 TDFEAの増幅特性

課題はありますが、C帯、L帯EDFAと基本的と同じで構成部品で実現できるという特徴があり、今後、精力的に研究開発を進め前述の課題の改善を進めていきます。

テルライトファイバ・ラマン増幅による広帯域化

FRAは希土類添加ファイバ増幅器と比較して、伝送路を増幅媒体として利用可能（分布増幅）、増幅したい波長あるいは波長帯の短波長側（石英系ファイバでは1.5 μm 帯で約100 nm）に励起光を入射することによって、任意の波長の信号を増幅可能、などの特徴があります。この分布増幅動作が可能という特徴は、高いIS/N比が求められる40Gbit/s伝送などの高速な通信システムにおいて問題となっていた伝送ファイバの非線形に起因する信号劣化を抑えるに有効です。

現在、FRAは分布増幅だけではなく希土類添加ファイバ増幅器と同様の集中増幅としての応用も検討され、広帯域化と高効率化が望まれています。テルライトファイバを用いたFRAは、従来の石英系ファイバを用いたFRAに比べ、高

帯）に容易に変更が可能です。

S帯EDFA

図2右下に示すように、EDFを用いたS帯増幅は、同ファイバへの励起を強めてEDFを高い反転分布状態（反転分布係数を60～70%以上）にしたときにC帯とともに現れるS帯増幅域を利用します。さらにS帯増幅を実現するために、EDF内のC帯に発生するASE（Amplified Spontaneous Emission）を除去してEDF全長で反転分布状態を

維持するとともに、長尺のEDFを用います。また、ASEの除去としては、EDF内にASE除去用フィルタを挿入する方法等を用います^{(7),(8)}。現在、本S帯EDFA増幅技術により、1490～1520 nm帯で信号利得20 dB以上で利得平坦特性（利得等価器を利用）を実現しています⁽⁹⁾。

なお、S帯EDFAは、短波長帯（1590 nm以下）の増幅特性の改善や変換効率（現在、約10%）の改善等の

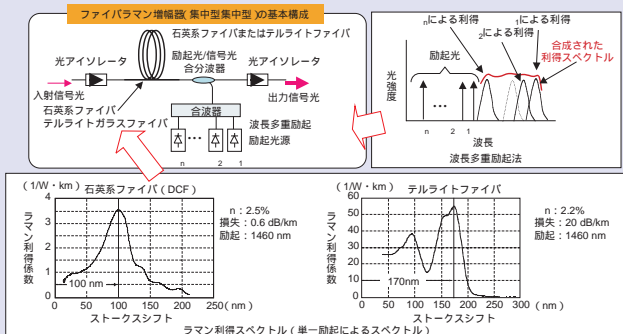


図4 ファイバラマン増幅器の構成および広帯域化の方法

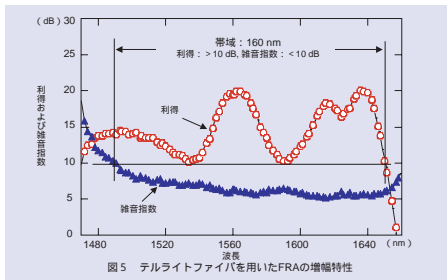


図5 テルライトファイバを用いたFRAの増幅特性

効動作が可能で帯域特性に優れています。

FRAは、光ファイバ中に強い励起光を入射することにより、3次の非線形光学効果の1つである誘導ラマン散乱(SRS: Stimulated Raman Scattering)を介して光信号を増幅します。このラマン散乱による利得スペクトル(ラマン利得スペクトル)はファイバのガラス組成により大きく異なり、前頁図4に示すように、石英系ファイバの1つである分散補償ファイバ(DCF: Dispersion Compensate Fiber)の場合、1.5 μm 帯においてラマンシフト量は100 nm程度、利得ピークの半値全幅は30 nm程度です。

一方、テルライトファイバは、スペクトルが図4の右下に示すようにツインピーク形状を持ち、石英系ファイバに比べて利得係数が6倍であるとともにラマンシフト量も170 nmと1.7倍です⁽⁹⁾。

また、FRAでは、その広帯域増幅動作のために、波長多重励起技術が適用されています⁽¹⁰⁾。この技術は、異なる複数の波長の励起光を合波してラマン増幅用の光ファイバに入射することで生ずるラマン利得スペクトルの重なりを利用して広帯域化を実現するとともに、各励起波長の励起光量を調整することで利得平坦性を実現できるという特徴があります。波長多重励起法による利得帯域拡大の限界は、ラマンシフト量により決

定されるため、石英系ファイバを用いたFRAの最大増幅帯域は約100 nmであるのに対して、テルライトファイバは、そのラマンシフト量が大きいため本質的に広帯域増幅が可能です。現在、テルライトファイバを用いたFRAで、増幅帯域160 nmという広帯域増幅動作が実現できることを確認しています(図5)⁽⁹⁾。しかし、高効率化に関しては、テルライトファイバの損失が若干高く、その高効率性を十分生かして切っていないため、同ファイバの低損失化を精力的に進めており、高効率で広帯域特性を併せ持つテルライトファイバ・ラマン増幅技術の確立を図っています。

広帯域増幅技術の適用

今回紹介したS帯希土類添加ファイバ増幅技術と広帯域テルライトファイバ・ラマン増幅技術と、これまでに開発されたC帯、L帯希土類ファイバ増幅技術、希土類添加ファイバ増幅器の1つである1300 nm帯Pr添加ファイバ増幅技術や1650 nm帯T DFA、さらに石英系ファイバ・ラマンファイバ増幅技術を効率良く組み合わせることにより1300 nmから1650 nm帯までの広い波長域で増幅動作が可能です。このすべての光ファイバ増幅技術を有効に活用し、大規模かつ高機能なフォトニックネットワークの実現に貢献できるものと考えます。

参考文献

- (1) 青山: "フォトニックネットワークの展望," 信学誌, Vol.82, No.7, pp.704-712, 1999.
- (2) 清水: "次世代光通信用光ファイバ増幅器," Material Stage, Vol.12, 2001.
- (3) 増田: "波長広帯域化と光増幅器," 光学, Vol.29, No.3, pp.136-142, 2000.
- (4) T. Komukai, et al.: "Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm ," IEEE J. Quantum Electron., Vol.31, No.11, pp.1880-1889, 1995.
- (5) T. Sakamoto, et al.: "1.4 μm -band gain characteristics of a Tm-Ho-doped ZBLAN fiber amplifier pumped in the 0.8 μm band," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol.7, No.9, pp.983-985, 1995.
- (6) S. Aozasa, et al.: "1480-1510 nm-band Tm doped fiber amplifier (TDFA) with a high power conversion efficiency of 42 %," in Proc. OFC '01, PD1, 2001.
- (7) E. Ishikawa, et al.: "Novel 1500 nm-band EDFA with discrete raman amplification," in Proc. ECOC '01, Vol.6, pp.48-49, 2001.
- (8) H. Ono, et al.: "S-band erbium-doped silica fibre amplifier with flattened-gain of over 21 dB," Electron. Lett., Vol.33, No.19, pp.1084-1086, 2002.
- (9) A. Mori, et al.: "Ultra-wideband tellurite-based Raman fiber amplifier," Electron. Lett., Vol. 37, No.24, pp.1442-1443, 2001.
- (10) 鈴木: "光ファイバラマン増幅器の最新動向," 応用物理, 第70巻, 第11号, pp.1299-1303, 2001.



(左から) 山田 誠/ 清水 誠

光ファイバ増幅器の広帯域化は光通信の大規模化、高機能化に不可欠な研究課題です。この課題の改善に引き続き精力的に取り組むとともに、光ファイバ増幅器の汎用化のために小型化、経済化の側面からも研究を進めたいと考えています。

問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
複合光子デバイス研究部
TEL 046-240-4373
FAX 046-240-4526
E-mail myamada@aecl.ntt.co.jp