

# 新波長帯光ファイバ増幅器の開発状況

豊田工業大学

大石 泰丈

## Development Status of Novel Optical Fiber Amplifier Technology

Yasutake Ohishi

Toyota Technological Institute

### 1. はじめに

最近のインターネット技術の発展は目覚ましく、世界全体で10億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ろうとしている。今後予想される良質な動画の送受信には数10 Mbit/s以上の通信容量が要するようになり、それが多重化されて送られる基幹伝送網ではテラ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いる。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50 THz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、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いる。

本稿では、最近の光ファイバ増幅器研究開発の状況について報告する。

### 2. WDM用光ファイバ増幅器の研究開発の経緯

WDM用光ファイバ増幅器に要求される性能は、(1)より多くの光信号波長を増幅するための利得の広帯域性と(2)増幅された各波長の信号レベルが揃うようにするための利得の平坦性である。利得の広帯域性は、光ファイバの波長資源を有効に利用して大容量化を図るために必要なことは言うまでもないことであるが、利得の平坦性は、信号レベルをそろえ効率良く伝送するために必要である。WDM用光ファイバ増幅器の研究はこの利得の広帯域・平坦性を追及するものと言える。

EDFAの研究開発経緯を表1にまとめる。EDFAの利得には波長依存性があり、当初EDFAの1.55  $\mu\text{m}$  帯 (1540–1560 nm 帯) (C-バンドと呼ばれている。)における利得平坦化がEr添加石英系ファイバ(石英系EDF)への

〒468-8511 名古屋市天白区久方2-12-1  
豊田工業大学大学院工学研究科  
TEL 052-809-1860 (ダイヤルイン)  
FAX 052-809-1869  
E-mail: ohishi@toyota-ti.ac.jp

表 1 波長多重用 EDFA 開発の歩み

世代	増幅帯域	要素技術
第一世代	1540~1560 nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石英ファイバへのAl、P添加</li> <li>・利得等化器の使用</li> <li>・ハイブリッド構成EDFA (Al 添加EDF+P添加EDF)</li> </ul>
第二世代	1525~1564 nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>・利得等化器の高性能化</li> <li>・長周期ファイバブラッググレーティング</li> <li>・ファブリーペローフィルター等</li> <li>・フッ化物EDFA</li> </ul>
第三世代	1530~1610 nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>・L-バンド (1.58 <math>\mu</math>m帯) EDFA</li> <li>・C&amp;L-バンドの並列増幅</li> <li>・テルライトEDFAによる一括増幅</li> </ul>
第四世代	1440~1610 nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>・TDFAとEDFAとの複合化</li> <li>・TDFA、C&amp;L-バンドの並列増幅</li> <li>・TDFAとテルライトEDFAの並列増幅</li> <li>・ファイバラマン増幅器とEDFAとの複合化</li> </ul>

Al や P の共添加，利得等化器の付与，Al 添加石英系 EDF と P 添加石英系 EDF のハイブリッド構成などにより行われた（第 1 世代）。次に 1530–1560 nm の C-バンド全域の利得平坦化がすすめられた（第 2 世代）。石英系 EDF の 1530 nm 帯の利得ピークをファイバブラッググレーティングや Mach-Zehnder フィルターで落とし平坦化する技術が精力的に開発され，40 nm の帯域で利得偏差が 1 dB 以下の EDFA も開発されている<sup>1)</sup>。また，1530 nm 帯に利得ピークを持たないフッ化物 EDF を用い利得等化器を付与することなしに利得平坦性の改善された EDFA も実現されている。

次に C-バンドよりも長波長域における光増幅が研究された（第 3 世代）。伝送路である石英光ファイバの低損失な波長域は 1.55  $\mu$ m よりも長波長域に伸びており 1.6  $\mu$ m 帯に達する。この 1.58  $\mu$ m を中心とする波長域（L-バンドと呼ばれている。）でも光増幅ができると WDM 伝送で送れるチャンネル数を増加させ伝送容量を一挙に増やすことができる。また，EDFA による 1.55  $\mu$ m 帯から 1.6  $\mu$ m 帯の増幅に加えて TDFA (Tm-doped fiber amplifier) やファイバラマン増幅器による増幅をも加えさら

なる増幅域の拡張が研究されている（第 4 世代）。

### 3. L-バンド EDFA

EDFA は 3 準位系の増幅器であるので，増幅帯域は反転分布の状態，具体的には EDF の長さや励起パワーを変えることにより制御できる。低い反転分布状態では，L-バンドで利得係数に正の値を取らせることができる。つまり，ファイバ長と励起量を選択することによりこの波長帯で増幅度の波長依存性の小さい増幅が可能になる。しかし，利得係数は小さいので，C-バンドでの増幅よりファイバを長くして，増幅利得を稼ぐことになる<sup>2)</sup>。

図 1 は，テルライト EDFA の L-バンドの増幅特性を示した図である<sup>3)</sup>。テルライト EDF を用いることにより L-バンドの増幅帯域を拡大することができる。すなわち，石英 EDFA では，1570–1600 nm の 30 nm の増幅帯域が得られるが，テルライト EDFA では，1560–1610 nm の 50 nm の帯域が実現できる。図は，ファイバブラッググレーティングにより利得を平坦化したものの特性を示している。

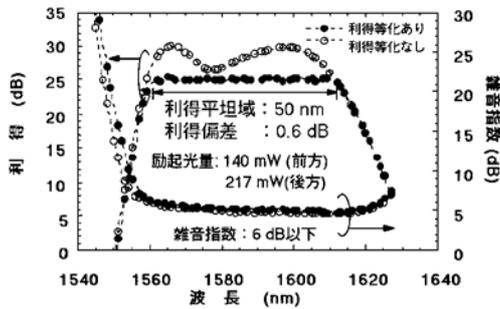


図1 L-バンドテルライト EDFA の増幅特性

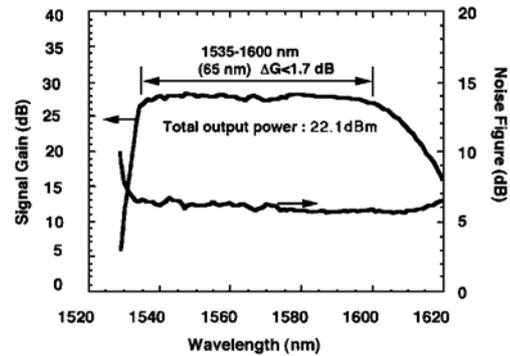


図3 テルライト EDFA の広帯域増幅特性

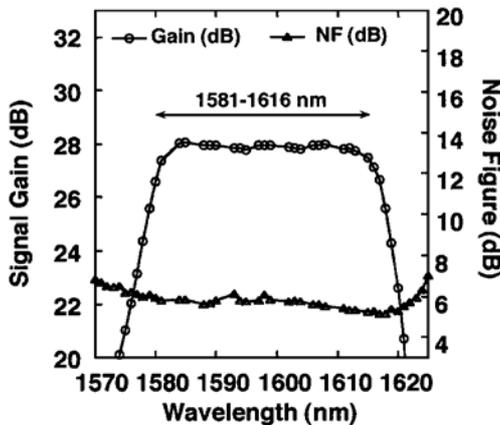


図2 増幅帯域を長波長域にシフトさせたL-バンドテルライト EDFA の増幅特性

1561–1611 nm の 50 nm 帯で利得偏差 0.6 dB の平坦性が実現されている。

さらにテルライト EDF 長を調整して動作帯域を 1616 nm にまで延ばした L-バンド EDFA も実現されている<sup>4)</sup>。図 2 にその利得スペクトルを示す。波長 1581–1616 nm の帯域で平均利得が 28 dB で利得偏差が 1 dB 以下、雑音指数 6 dB 以下の特性が得られている。テルライトファイバを Er のホストにすると長波長域の増幅特性の優れた L-バンド EDFA を実現することができる。

#### 4. テルライト EDFA による (C+L)-バンド一括増幅

テルライト EDFA は C-バンドおよび L-バンドの両増幅帯をカバーする 1530–1610 nm の波長域の一括増幅ができる<sup>5)</sup>。テルライト EDFA の特徴は、広帯域動作したとき、1575 から 1600 nm の波長域の利得スペクトルの波長依存性が石英 EDFA に比べずっと平坦となることである。したがって、利得を平坦化するためのフィルターの損失値を小さくできることである。利得等化器の損失による雑音指数の増大を抑制するために増幅部を多段に分割し、利得等化器も分割して各増幅部に割り当てることが行われている。図 3 には、利得の平坦化が図られた増幅特性を示す。増幅部を 3 分割し、利得等化はその間 2 ヶ所に挿入されている。1535–1600 nm の帯域 65 nm で 1.7 dB の利得平坦性が実現されている。また、雑音指数も 7 dB 以下となっており、利得等化器挿入による増大が抑えられている。

#### 5. S-バンド TDFA

C-バンドの短波長域には、L-バンド同様低損失な波長領域が存在する。この波長域も WDM 伝送のチャンネル数を増やす有効な波長資源と言える。S-バンド用光ファイバ増幅器

としてラマンアンプ, EDFA, Tm 添加光ファイバ増幅器 (TDFA) が研究されている。ラマンアンプは励起波長を変えることにより増幅帯域を変えられるので, S-バンド用としても有力な候補である。Er は 1480 から 1520 nm においても誘導放出断面積を持つので, この波長域で基底状態吸収がなければ, EDFA においても S-バンドの増幅が可能になる。しかし, 1530 nm 帯の ASE (Amplified Spontaneous Emission) により反転分布状態が悪くなり, 基底状態吸収強度が増加する。したがって, 1530 nm 帯の ASE を抑制する構造をとることにより, EDFA の S-バンド動作が可能になる。ASE 除去のためフィルターの挿入<sup>6)</sup>やディプレストクラッド構造による基底伝播モードのカットオフ現象を利用した手法が提案されており, 1510 から 1520 nm の波長域で 30 dB 以上の小信号利得が得られることも報告されている<sup>7)</sup>。

TDFA は S-バンド用アンプとして増幅媒体および増幅器構成について幅広く研究されている。Tm の  $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$  遷移を利用すると S-バンドの光増幅が可能になる。表 2<sup>8)</sup> に TDFA の主な特性を示す。 $^3H_4$  準位を励起するのにアップコンバージョン励起, 2 波長励起が用いられてきたが, 1.4  $\mu\text{m}$  の単一波長励起で 40% 以上

の変換効率で高効率に励起できる。変換効率 10% 以下のラマンアンプ, 構成が複雑なる 2 波長励起に比べると大きな優位性があると言える。図 4 は, 1.4  $\mu\text{m}$  励起の TDFA の利得特性を示したものである。入力信号光パワーを -7 dBm とし励起光量を 500 mW のときの特性である。1480-1510 nm の波長域で利得 26 dB 以上, 雑音指数 7 dB 以下, 全光出力 23.9 dBm の特性が得られている。出力信号光量と励起光量から求められる変換効率は, L-バンド EDFA と同程度の 42% である<sup>9)</sup>。

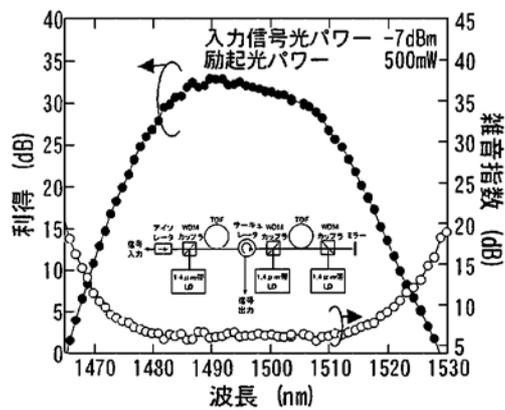


図 4 1.4  $\mu\text{m}$  励起 TDFA の利得スペクトル

表 2 TDFA の励起方法と特性

励起方法		増幅帯域	変換効率	ホストガラス
1 波 長 励 起	1.064 $\mu\text{m}$ (YAGレーザー)	1460~1490 nm	15 %	フッ化物ガラス
	1.047 $\mu\text{m}$ (YLFレーザー) (Tm高濃度添加)	1480~1510 nm	10 %	フッ化物ガラス
	1.4 $\mu\text{m}$ (LD) (Tm高濃度添加)	1480~1510 nm	42 %	フッ化物ガラス
2 波 長 励 起	1.55 $\mu\text{m}$ /1.064 $\mu\text{m}$	1480~1510 nm	10 %	フッ化物ガラス
	1.55 $\mu\text{m}$ /1.4 $\mu\text{m}$	1480~1510 nm	29 %	フッ化物ガラス
	1.2 $\mu\text{m}$ /1.4 $\mu\text{m}$	1480~1510 nm	48 %	フッ化物ガラス
	0.8 $\mu\text{m}$ /1.4 $\mu\text{m}$	1480~1510 nm	50 %	フッ化物ガラス
	1.55 $\mu\text{m}$ /1.4 $\mu\text{m}$	1480~1530 nm	15 %	Sb添加石英ガラス

### 6. テルライトファイバラマン増幅器

分布型ファイバラマン増幅器を用いると信号対雑音比が改善できることから長距離海底伝送システムへの適用が進められている。また、ファイバラマン増幅器は励起波長を選択することにより、その増幅帯域設定できることから集中定数型ファイバ増幅器としてもEDFAでカバーできない波長帯の増幅器として注目されており、石英光ファイバを用い集中および分布併用型の構成で132 nmにわたる増幅帯域<sup>10)</sup>も実現されている。

テルライト光ファイバを用い、ラマン増幅帯域の拡大が行われている<sup>11)</sup>。図5は、テルラ

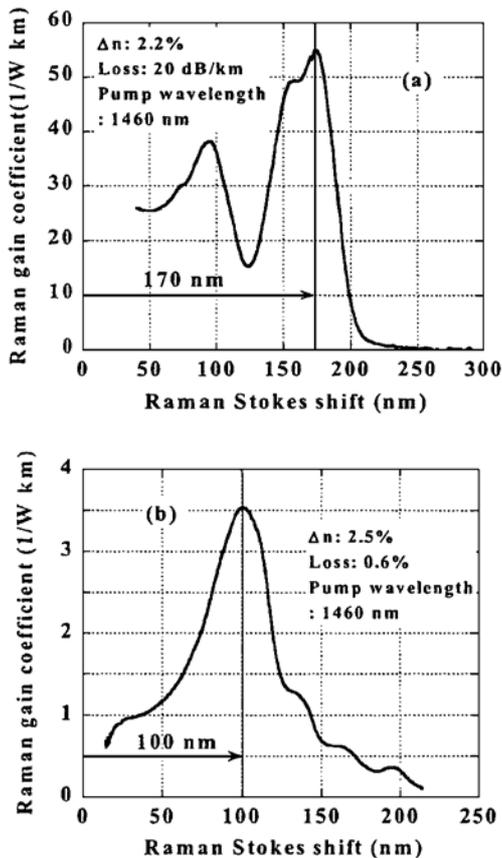


図5 テルライトファイバ(a)および石英ファイバ(b)のラマン利得スペクトル

イト光ファイバと石英光ファイバのラマン利得係数スペクトルを示したものである。ストークスシフトが石英光ファイバでは、100 nmほどであるがテルライト光ファイバでは、170 nmに広がり、また、90 nmの波数位置にもピークが現れる双峰のラマンスペクトルとなっている。

また、石英光ファイバの利得係数が  $3.5 (\text{Wkm})^{-1}$  であるのに対し、テルライト光ファイバの利得係数は  $55 (\text{Wkm})^{-1}$  と約16倍大きい値を有する。したがって、テルライト光ファイバをラマン増幅媒体をすると励起波長数が少なく、また、比較的短いファイバ長で広帯域ファイバラマン増幅が実現できることが期待できる。

図6は、テルライトファイバラマン増幅器の特性を示す。図7はその構成である。1410, 1420, 1430, 1460 nmの4波長で合計1.09 W

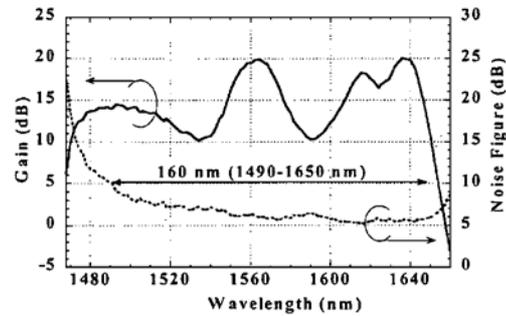


図6 テルライトファイバラマン増幅器の特性

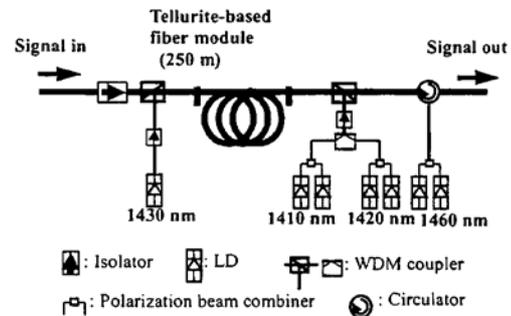


図7 テルライトファイバラマン増幅器の構成

のパワーで励起されている。250 m 長のテルライト光ファイバをラマン増幅媒体としている。1470 から 1650 nm の 180 nm で 10 dB 以上の小信号利得が得られている。雑音指数は 1560 から 1650 nm の波長帯で 6 dB 以下である。利得が 10 dB 以上、雑音指数が 10 dB 以下の波長帯域は 1490 から 1650 nm の 160 nm であり、石英光ファイバを用いたときの 1.6 倍の帯域となっている。

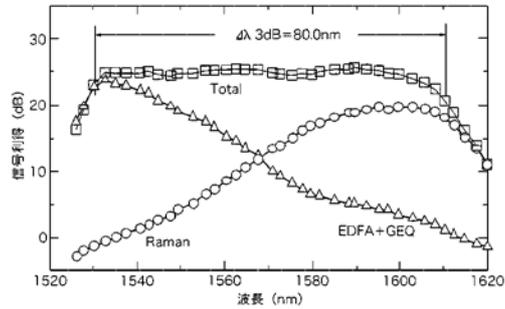


図 8 ハイブリッド EDFA の増幅特性

### 7. 複合型増幅技術

一括増幅波長域を拡張するため、EDFA と他の光ファイバ増幅器を組み合わせることが進められている。その一つが、TDFA との複合化である。TDFA では、1443–1484 nm の 37 nm において利得偏差が 3 dB に抑えられ、テルライト EDFA では 1532–1608 nm の 76 nm において利得偏差が 3 dB 以下になっており、併せて 113 nm 帯で動作する光ファイバ増幅器も実現できることが実証されている<sup>12)</sup>。

また、TDFA, C-バンド及び L-バンド EDFA を並列型に構成した光ファイバ増幅器を用いた WDM 伝送実験も行われている<sup>13)</sup>。1475–1610 nm 帯のなかの 107 nm を使い 273 波の信号を伝送して 10.9 Tbit/s の伝送容量が達成されている。

EDFA では増幅波長域は  $E_r$  のエネルギー準位により決まるが、ファイバラマン増幅では励起波長によって決まるため、励起波長を選ぶことによって任意の波長帯で増幅することができる。この特性を活かしファイバラマン増幅器と EDFA とを組み合わせるとハイブリッド EDFA を構成する試みがなされている。図 8 は、高利得集中定数型ラマンアンプを用いたハイブリッド EDFA の構成を示しており、図 9 はその特性である<sup>14)</sup>。高ラマン利得を得るために、1470 から 1500 nm の波長で励起した集中定数型ラマンアンプを 2 段カスケード接続している。4 つ波長で励起しているのは、ラマンアンプ

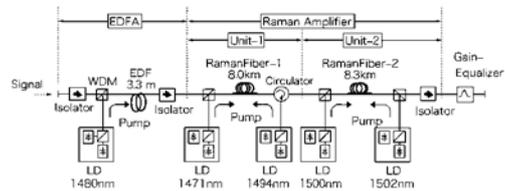


図 9 ハイブリッド EDFA の構成

は励起波長に応じて利得ピーク位置が変わる特性を持ち、それを利用して異なる利得スペクトルを重ね合わせることにより利得の平坦化を図っている。得られた利得スペクトルの偏差は 1530 から 1610 nm の波長帯域で 3 dB となっている。このハイブリッド EDFA では、C-バンド動作状態より若干反転分布状態を低くした EDFA を使用し、L-バンドでのその利得の低下をラマン増幅で補償する構成が基本になっている。ラマンアンプとして分布型または集中定数型の両者が使われている。

### 8. ま と め

光ファイバは、1300–1650 nm にかけて低損失な透過域を持つ。EDFA の広帯域化および他の光ファイバ増幅器の開発により、WDM システムの伝送容量の飛躍的増大が可能となった。今後、これらの光ファイバ増幅器を駆使した通信システムの開発と光ファイバ増幅器の特性向上、特に、未だカバーできていない波長帯

への増幅帯域の拡張が進められていくものと考えられる。光ファイバ増幅器技術は、50 THz以上ある光ファイバの波長資源を有効に使い伝送コストの低減を図り、次世代情報化社会を実現するためのキー技術として研究されている。

#### 謝 辞

本報告では NTT フォトニクス研究所および NTT エレクトロニクス(株)の研究開発グループによって得られて成果を中心に述べた。ご協力いただいたグループ各位に深謝する。

#### 参考文献

- 1) P. F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola, M. Andrejco, A. M. Vengsarkar, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 9, P. 1343, 1997.
- 2) H. Ono, M. Yamada and Y. Ohishi, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 9, P. 596, 1997.
- 3) A. Mori, T. Sakamoto, K. Kobayashi, K. Shikano, K. Oikawa, K. Hoshino, T. Kanamori and M. Shimizu, in Technical Digest ECOC'99, I-268, 1999.
- 4) A. Mori, T. Sakamoto, K. Shikano, K. Kobayashi, K. Hoshino and M. Shimizu, Electron. Lett. Vol. 36, P. 621, 2000.
- 5) Y. Ohishi, A. Mori, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida and K. Oikawa, Opt. Lett., Vol. 23, P. 274, 1998.
- 6) E. Ishikawa, M. Nishihara, Y. Sato, C. Ohshima, Y. Sugaya and J. Kumasako, Tech. Digest, ECOC'01, PD. A. 1. 2, 2001.
- 7) M. A. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton and T. Kane, Tech. Digest, OAA'02, PD4, 2002.
- 8) 清水 誠, O plus E, P. 1053, 2001.
- 9) S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi and M. Shimizu, Tech. Digest, OFC'01, PD1, 2001.
- 10) H. Masuda and S. Kawai, Tech. Digest, ECOC'99, Vol. 1, P. 146, 1999.
- 11) A. Mori, H. Masuda, K. Shikano, K. Oikawa, K. Kato and M. Shimizu, Electron. Lett., Vol. 37, P. 1442, 2001.
- 12) M. Yamada, A. Mori, K. Kobayashi, H. Ono, T. Kanamori, K. Oikawa, Y. Nishida and Y. Ohishi, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 10, P. 1244, 1998.
- 13) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara and T. Ono, Tech. Digest OFC'01, PD24, 2001.
- 14) H. Masuda, S. Kawai and K. Aida, Tech. Digest OAA'98, PD7, 1998.