

テルライトガラスファイバによる 超広帯域光アンプ

NTT フォトニクス研究所

森 淳

Ultra-broadband tellurite glass fiber amplifiers

Atsushi Mori

NTT Photonics Laboratories

1. はじめに

インターネット等の急速な普及により、近い将来、光通信ネットワークを流れる情報量は爆発的に増加すると予想されている。このような情報量の増加に対応するため光通信ネットワークの分野では、 $1.5\ \mu\text{m}$ 通信波長帯において、波長の異なる複数の信号光を1本の通信用ファイバで一括して伝送する波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)通信技術が精力的に研究・開発されている。

Er^{3+} 添加ファイバ増幅器(EDFA)の広帯域化は、このWDM光伝送方式における伝送容量の拡大を図る上で重要である。従来のAl添加石英ファイバやフッ化物ファイバを用いたEDFAでは、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯における利用帯域が30–40 nmに限られるため、WDM伝送で利用できるチャネル数も40チャネル程度に限られていた。我々はEDFAの広帯域化を目指し、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯及び $1.58\ \mu\text{m}$ 帯のEDFAを並列に

接続する方法及び Er^{3+} のホストガラスを石英系及びフッ化物系ガラスからテルライトガラスに変える方法の2つのアプローチにより研究を進め、増幅特性を広帯域化できることを世界に先駆けて実証した^{1),2)}。特に後者の Er^{3+} 添加テルライトファイバ増幅器(EDTFA)は、従来の約2倍の超広帯域増幅特性を有し、次世代のEDFAとして注目を集めている。本稿では、EDTFAのこれまでの研究成果を紹介する。

2. 分光特性

図1に Er^{3+} イオンの $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 遷移による $1.5\ \mu\text{m}$ 帯誘導放出断面積を示す。実線がテルライトガラス、一点鎖線がフッ化物ガラス、破線がAl添加石英ガラスの場合である。テルライトガラス中の Er^{3+} イオンは1450–1650 nmの全波長帯域に渡って最も大きな誘導放出断面積を持つこと、特に1600 nm付近の長波長領域ではフッ化物及びAl添加石英ガラスの場合の約2倍の値となるため、長波長側への増幅帯域の拡大に有利なことを見出した。これは誘導放出断面積(S)が屈折率(n)との間に

〒319-1193 茨城県那珂郡東海村白方白根 162
NTT フォトニクス研究所複合光デバイス研究部
TEL 029-287-7191
FAX 029-287-7193
E-mail: imori@iba.iecl.ntt.co.jp

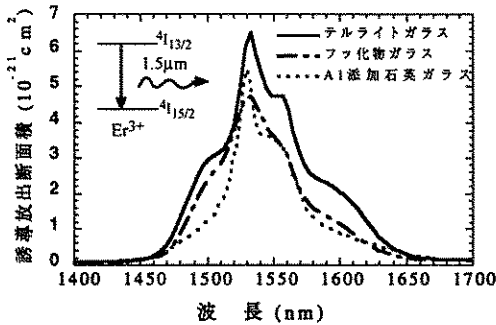
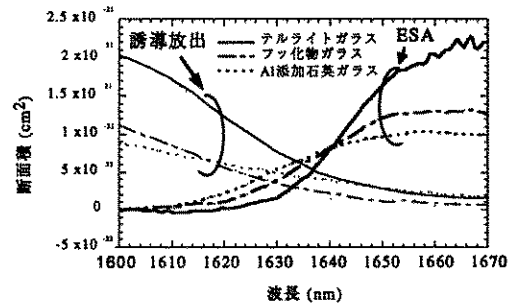
図1 Er³⁺ 添加ガラスの1.5 μm 帯誘導放出断面積

図2 誘導放出断面積及びESA断面積

表1 Er³⁺ 添加ガラスの分光特性

ガラス	$\tau_{11/2}$ (ms)	$\tau_{13/2}$ (ms)	σ_{peak} (10^{-21}cm^2)
テルライトガラス	1.8	4	6.6
フッ化物ガラス	7.3 ⁽³⁾	9.4 ⁽⁴⁾	4.8
Al 添加石英ガラス	0.039 ⁽³⁾	10.8 ⁽⁴⁾	5.5

$S \propto (n^2 + 2)^2 / 9n$ なる関係を持つこと、Al 添加石英ガラス及びフッ化物ガラスの n が 1.5 程度であるのに対してテルライトガラスが 2 以上の大きな屈折率を持つことに由来する。表1に Er³⁺ 添加テルライト、フッ化物及び Al 添加石英ガラスの $^4I_{11/2}$, $^4I_{13/2}$ 準位蛍光寿命 ($\tau_{11/2}$, $\tau_{13/2}$) 及び $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 誘導放出断面積のピーク値 (σ_{peak}) を示す^{3),4)}。この表から、テルライトガラスは大きな σ_{peak} を持ち、 $\tau_{13/2}$ はそれを反映してフッ化物や Al 添加石英ガラスの半分以下の値となっている。

一方、テルライトガラスの $\tau_{11/2}$ は 1.8 msec であり、980 nm 帯励起による EDTFA の低雑音指数化が期待できる。

図2に波長 1600–1670 nm における $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 誘導放出断面積及び $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ESA 断面積を示す。ESA 断面積はファイバ中に励起光を入れた場合と入れない場合の信号光透過スペクトルの差を吸収及び誘導放出断面積と比較する手法により算出した^{5),6)}。この図において、誘導放出断面積と ESA 断面積とが交わる波長が利得の得られる長波長側の限界となる。フッ

化物及び Al 添加石英ファイバの限界が 1630 nm 及び 1628 nm であるのに対して、テルライトファイバでは 1637 nm であり、帯域が 7–9 nm だけ長波長側に拡大できることを見出した。

3. ファイバの製法及び特性

テルライトガラスはガラス軟化温度等の熱的な性質がフッ化物ガラスと似ているため、フッ化物ガラスファイバの作製技術をそのまま転用し、ファイバ化することができる。図4にファイバ作製法を示す。ファイバのコア・クラッド構造を形成するファイバプリフォームの作製にはサクシオンキャスト法を用いた⁷⁾。

この方法では、クラッドガラス融液を金属製鋳型に流し込んだ後、間を入れずにコアガラス融液を同じ鋳型に注ぐ。先に注いだクラッドガラス融液が固化する際の体積収縮のため、コアガラス融液がクラッドガラスの中心部で引き込まれ、テーパ形状のコアが形成される。一方、ジャケットガラス管はローテーショナルキャスト法を用いて作製する⁸⁾。この方法は、ガラス融液を金属製鋳型に流し込んだ後、鋳型を水平に倒し、そのまま高速回転することにより作製する。プリフォームは円筒型のジャケット管の中に挿入され、細径コア径を得るために一度延伸工程を経る。その後、再びテーパ型

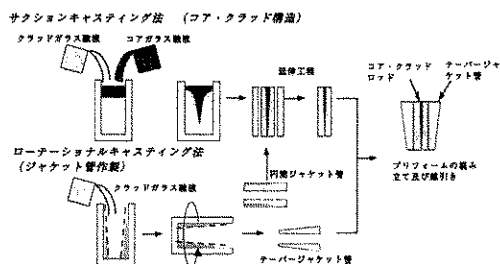


図4 テルライトファイバ作製法

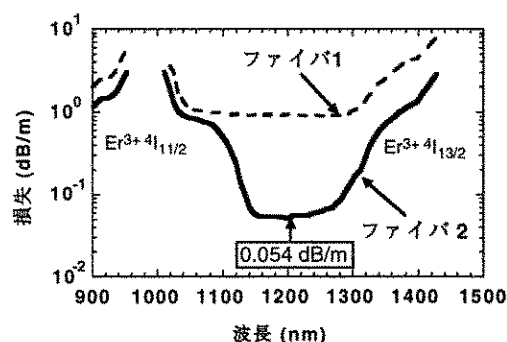


図5 エルビウム添加テルライトファイバの損失スペクトル

のジャケット管に挿入され、線引きされる。なお、線引きされたファイバは表面保護のため直ちに紫外線硬化樹脂により被覆される。

市販の TeO_2 原料は、黒色の還元物である TeO や黄色の過酸化物である TeO_3 などの不純物を含むため、低損失ファイバ用の原料としては不向きである。我々は、高純度 Te 金属を出発原料として、高純度 TeO_2 原料の合成に成功した。図5に市販の TeO_2 原料を用いて作製したファイバ1と合成された高純度 TeO_2 原料を用いて作製したファイバ2の損失スペクトルを示す⁹⁾。また、同ファイバのファイバパラメータを表2に示す。ファイバ1では Er^{3+} の吸収のない 1200 nm の波長における損失が 0.9 dB/m であるのに対し、ファイバ2では同波長における損失は 0.054 dB/m と一桁以上も改善し、 TeO_2 原料の高純度化がファイバ低損失化の鍵であることがわかる。

表2 ファイバパラメータ

	ファイバ1	ファイバ2
TeO_2 原料	市販品	高純度品 (内製)
比屈折率差	1.5%	1.5%
Er 添加濃度	4000 ppm	500 ppm
カットオフ波長	1.3 μm	1.15 μm
損失 (1200 nm)	0.9 dB/m	0.054 dB/m

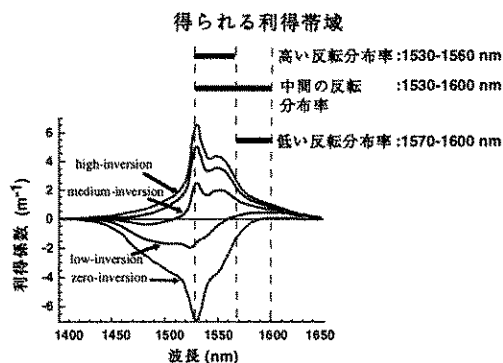


図6 異なる反転分布率に対する EDFA の利得スペクトル

4. 反転分布率と利得帯域

EDFA の 1.5 μm 帯の増幅は 3 準位系レーザ遷移を用いているため、その利得係数は $N_2\sigma_e(\lambda) - N_1\sigma_a(\lambda)$ (N_2, N_1 はそれぞれレーザ上準位及び下準位の原子分布数密度、 $\sigma_e(\lambda), \sigma_a(\lambda)$ はそれぞれ波長 λ に対する発光及び吸収断面積) に比例する。図6に異なる反転分布率に対する EDFA の利得スペクトルを示す。

反転分布率が 0% の場合は、EDF が励起されていない状態を示し、全ての信号波長に対して吸収媒体となる。従来の EDFA では反転分布率は 60% 以上の高い値に維持され、利得平坦帯域は 1540–1560 nm の波長帯となる (M-band 動作)。一方、低い反転分布率にすると EDF は 1530 nm 付近では吸収媒体となるが、信号利得帯域は長波長側へとシフトする (L-band 動作)。ここで注意すべきことは、本節で

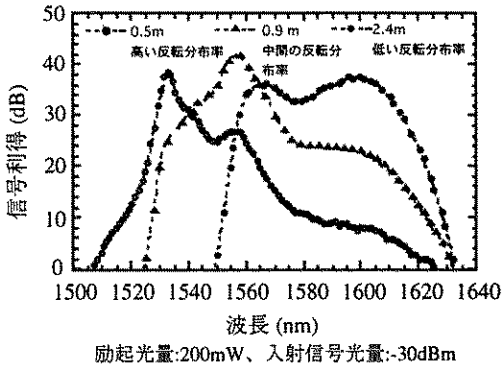


図7 異なる反転分布率に対するEDTFAの利得スペクトル

用いた反転分布率はあくまでもファイバ長手方向での平均値であり、低い反転分布率で動作するL-band EDFAといえども前方向励起によりアンプ入射部での局所的反転分布率を高めることにより低雑音動作が容易に達成できる。更に、中間状態に反転分布率を制御した場合には、EDFは広い帯域にわたって利得を持つが、一般に利得偏差が大きくなる。実際にこの反転分布率を制御するには、EDFの長さとし起光量を調節することによって実現される。

図7に異なる反転分布率に対するEDTFAの利得スペクトルを示す。この場合、励起光量を200 mWに固定した状態で、ファイバ長を0.5, 0.9, 2.4 mと変化させることにより、反転分布率を制御した。この図から明らかなように、EDTFAの利得帯域はファイバ長が長くなるにつれ、長波長側へとシフトする。中間の反転分布率で動作させたEDTFAは最も広い利得帯域を持ち、1530-1610 nmにわたる80 nm帯域で20 dB以上の利得が得られている。更に、低い反転分布率で動作させたEDTFAでは利得帯域は長波長側へシフトし、石英系やフッ化物系で得られる1.58 μm 帯EDFAの利得帯域よりも広い帯域を得ることができる。以上の特性から、EDTFAは、中間の反転分布率動作で得られる1530-1610 nm帯と低い反転分布率動作で得られる1560-1610 nm帯において、

広帯域性の観点から大きな利点を持つことがわかる。

5. 利得平坦型 EDTFA¹⁰⁾

EDFAを線形中継器として用いた多中継WDM伝送システムでは、各光デバイスの挿入損の波長依存性やEDFAの利得偏差が累積されることにより、伝送後の各光ch.の光S/Nが影響を受ける。光S/Nが最低となるch.により、最大伝送距離や伝送品質が規定される。WDM用EDFAに求められる特性は、前述の広帯域性のみではなく、利得偏差が小さいことも重要な項目である。前述したように、中間の反転分布率で動作させたEDTFAには大きな利得偏差があるため、利得等化する必要がある。図8に利得平坦型EDTFAの構成図を示す。雑音指数を下げるため、2段構成のEDTFの間にアイソレータが挿入され、前段が前方、後段が後方からそれぞれ1.48 μm LD

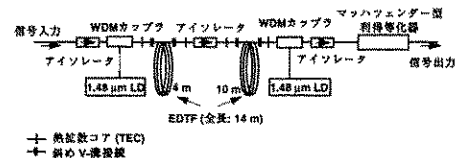


図8 利得平坦型 EDTFA の構成

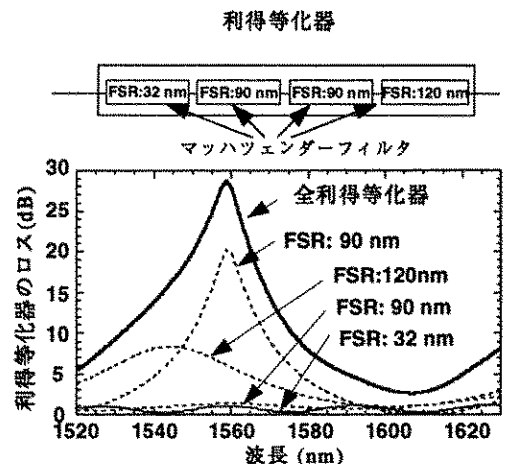


図9 利得等化器の構成とロススペクトル

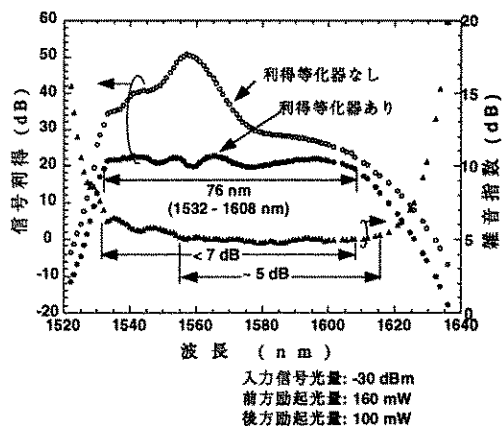


図 10 利得平坦化 EDTFA の増幅特性

を用いて励起されている。図 9 に利得等化器の構成とロススペクトルを示す。利得等化器はマッハツェンダー型フィルタの Free Space Range (FSR) の異なるものをカスケード接続した構成のデバイスを用いた。図 10 に利得平坦型 EDTFA の増幅特性を示す。利得等化器を用いることにより、平均利得 21 dB (利得平坦帯域 76 nm, 雑音指数 7 dB 以下) を実現した。

6. おわりに

Er^{3+} 添加テルライトファイバ増幅器について解説した。

EDTFA が近い将来, WDM 伝送の大容量化に必須のデバイスとなることを期待したい。

参考文献

- 1) M. Yamada et al., Electron. Lett., 33, 8, 710 (1997).
- 2) A. Mori et al., OFC'97, PD-1 (1997).
- 3) R. S. Quinby, Appl. Opt., 30, 2546 (1991).
- 4) W. J. Miniscalco, IEEE J. Lighthwave Technol., LT-9, 234 (1991).
- 5) P. R. Morkel et al., Opt. Commun. 67 (1988) 349.
- 6) A. Mori et al., ECOC'97, We2C4. (1997).
- 7) Y. Ohishi et al., Electron. Lett., 22, 20, 1034 (1986).
- 8) D. C. Tran et al., Electron. Lett., 18, 657 (1982).
- 9) A. Mori et al., Electron. Lett., 34, 9, 887 (1998).
- 10) M. Yamada et al., IEEE Photo. Tech. Lett. 10, 9, 1024 (1998).