

# 拡張 L バンド光増幅器用ビスマス系エルビウム添加ファイバー

杉本直樹

## Bismuth Oxide Based Erbium Doped Fiber for Extended L-Band Amplification

Naoki SUGIMOTO

A 3 dB gain bandwidth of 60 nm was achieved for single-stage operation in the wavelength range from 1560 to 1620 nm using lanthanum co-doped bismuth based Er doped fiber with only 200-250 cm length, which exhibited power conversion efficiency of 30%. In addition, no increase in noise figure was observed at the wavelength region beyond 1610 nm.

**Key words:** erbium, fiber amplifier, WDM, EDF, EDFA

### 1. はじめに

波長分割多重 (WDM) 光通信システムにおいて、伝送容量を増やすための一つのキーテクノロジーは、光増幅器の利得帯域を広げることである。CバンドおよびLバンドの増幅器については、エルビウム (Er) ドープファイバー (EDF) を使うことによって実用化されている。一方、これら C, Lバンドに加えて、ツリウム (Tm) ドープファイバーを使用したSバンド用光増幅器やラマン増幅器が提案されている。しかしながら最も低コストに増幅できる帯域を拡大する方法は、Lバンド領域を長波長側に拡張することである。

従来の石英系 EDF を用いた光増幅器の場合、1605 nm を超える波長域では励起状態吸収 (ESA) によって、顕著に利得が減少してしまう。Lバンドを拡張するために、テルライト系 EDF<sup>1)</sup>、アンチモン系 EDF<sup>2)</sup>、リン共添加石英系 EDF<sup>3,4)</sup> および石英系 EDF<sup>5,6)</sup> 等の材料が提案されている。これらの報告では、50 nm 以上の増幅帯域が示されているが、波長が 1620 nm では、シングルステージ増幅で十分な利得が得られていない。

一方、われわれは Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> をベースとする EDF (Bi-EDF) を作製し、わずか 22~26 cm の長さでも C+L バンドで 10 dB 以上の利得を有すること、石英ファイバーと熱融着できることを示した<sup>7,8)</sup>。本報告では、La を共添加した Bi-EDF が<sup>3)</sup>、① 1560~1620 nm の増幅帯域を有すること、②

1610 nm を超えても雑音指数 (NF) が悪化しないこと、③ わずか 200~250 cm の長さで 30% を超えるパワー変換効率を示すことを明らかにした<sup>9)</sup> ので紹介する。

### 2. 拡張 L バンドの増幅特性

#### 2.1 Bi-EDF 仕様と評価方法

作製した La を共添加した Bi-EDF の仕様を表 1 に示す。試料名 T1M および T1L が La 共添加ファイバーであり、T3M は比較のために使用した La 無添加ファイバーである。Er 濃度は、6500 および 3250 ppm, La 濃度は 4.4 wt% である。Er の吸収がない 1310 nm での各ファイバーの損失をカットバック法によって測定した結果、0.7~2.0 dB/m と見積もられた。これらの Bi-EDF は、石英系ファイバーと融着することができる。おのおののファイバーの端面をつき合わせて、アーク放電によって加熱し融着する方法であり、一般に石英ファイバー同士の接続に使われている。ただし、Bi-EDF と石英ファイバーでは融点 (軟化温度) が大きく異なるため、放電パワー・時間・位置を最適に制御する必要がある。さらに屈折率差に起因する接続面での反射の影響を抑制すると同時に損失を小さくするために、Bi-EDF/石英ファイバーの端面の角度を 6/8° とした。また、接続損失を小さくするためには、両者のモードフィールド径をできるだけ近づける必要がある。そのために本実験では、石英ファイバーとして高開口数 (NA) の HI980 (コーニング社) を使用した。各ファイバーの融着ロスを表

表1 各種 Bi-EDF の仕様.

	T3M-100	T1M-100	T1L-200	T1L-250
Er (wt-ppm)	6500	6500	3250	3250
La (wt%)	—	4.4	4.4	4.4
ファイバー長 (cm)	118	98	199	254
屈折率 コア/クラッド @ 1.55 $\mu\text{m}$	2.019/2.010	2.039/2.029	2.039/2.029	2.039/2.029
NA	0.19	0.20	0.20	0.20
コア径 ( $\mu\text{m}$ )	4.0	4.5	4.5	4.8
MFD ( $\mu\text{m}$ ) @ 1.55 $\mu\text{m}$	6.8	6.2	6.2	6.2
カットオフ波長 ( $\mu\text{m}$ )	0.994	1.18	1.18	1.26
背景ロス (dB/m) @ 1.31 $\mu\text{m}$	0.7	2.0	0.7	0.7
融着ロス (2 点分) (dB) @ 1.31 $\mu\text{m}$	0.3	0.3	0.4	0.4

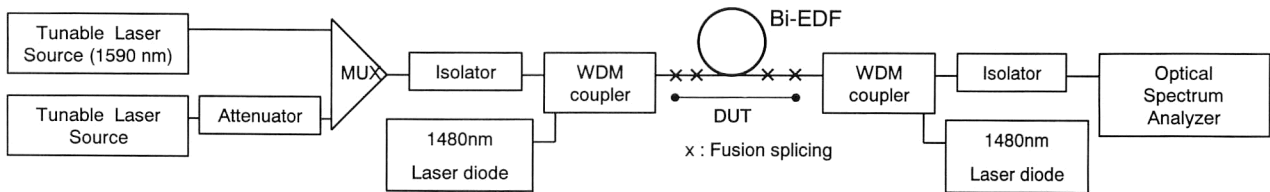


図1 プローブ法による La 共添加 Bi-EDF ピグテイルの増幅特性評価系.

1 に示すが、2 か所合わせて、0.3~0.4 dB と非常に低い損失で接続できていることがわかる。このように融着した Bi-EDF は、信頼性の規格試験である、Telcordia GR-1221 Core 試験に合格することも確認している。

プローブ法による増幅特性の測定系を図 1 に示す。この方法は、固定波長の飽和光を入射させながらプローブ光の波長を走査する方法であり、多チャンネルの WDM 光源を使用しなくても WDM での増幅特性を評価することができる。WDM で使用する場合は複数の信号光を同時に入射させるが、プローブ法では WDM 信号の総パワーに相当する光信号を飽和光として入射させることによって、WDM の場合の増幅特性（利得プロファイルおよび変換効率）を評価することができる。2 つの波長可変光源を使用し、飽和光の強度は 0 dBm、波長は 1590 nm、プローブ光の強度は -30 dBm とした。Bi-EDF を HI980 に融着した試料（ピグテイル）を、さらに測定系の石英ファイバーに融着し、1480 nm の LD で励起した場合のピグテイルとしての増幅特性を測定した。

## 2.2 拡張 L バンド増幅特性

図 2 に 1600 nm の波長における、T3M-100, T1M-100, および T1L-200 の出力特性を示す。入力信号光強度は 0 dBm であり、1480 nm 双方向励起を行っている。これらの Bi-EDF 中には、ほぼ同数の Er イオン数がドープされている。T1M-100 の出力は、T3M-100 に比べて大きい。これは、La イオンの共添加によってパワー変換効率 (PCE) が改善されたことを示している。La イオンは、Er イオンとほぼ同じ大きさであるため、ガラス中で Er イオンのサイ

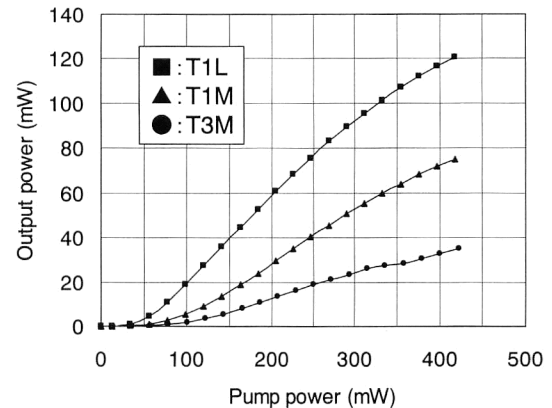


図2 3種の Bi-EDF (●: T3M, ▲: T1M, ■: T1L) の 1600 nm における出力曲線。入力信号光パワー: 0 dBm, 励起波長: 1480 nm.

トに置換される。そのために Er イオン間の距離が離れることによって、クラスタリングが抑制され、濃度消光が起こりにくくなったためと思われる。さらに、T1M-100 と T1L-200 を比較すると、T1L のほうが PCE は高い。このことから、La 共添加であっても Er 濃度を低下させることによってさらに濃度消光が抑制できることを示している。本実験では、最大 30% の PCE が得られた。

図 3 に T1L-250 の 1560~1620 nm における 0 dBm 入力時のゲインカーブを示す。18 dB 以上の利得がすべての波長の信号において得られていることがわかる。さらに、1560~1610 nm においては利得の偏差は 1 dB 以内、1560~1620 nm においても、140 mW 以内の励起であれば 2 dB 以内であることがわかる。これらのことから、Bi-EDF は、短尺のファイバーであっても 1560 nm から拡張 L バンド域

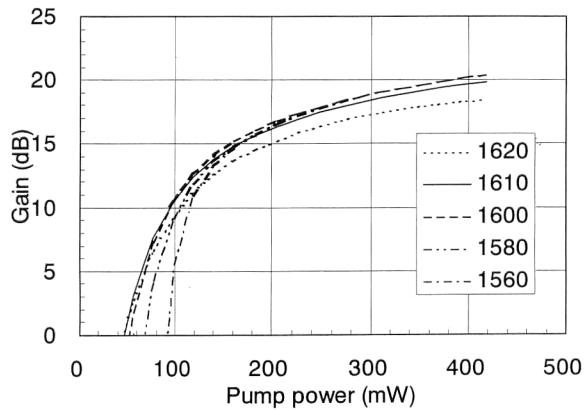


図3 1560~1620 nmにおける T1L-250 の利得曲線。入力信号光パワー：0 dBm，励起波長：1480 nm。

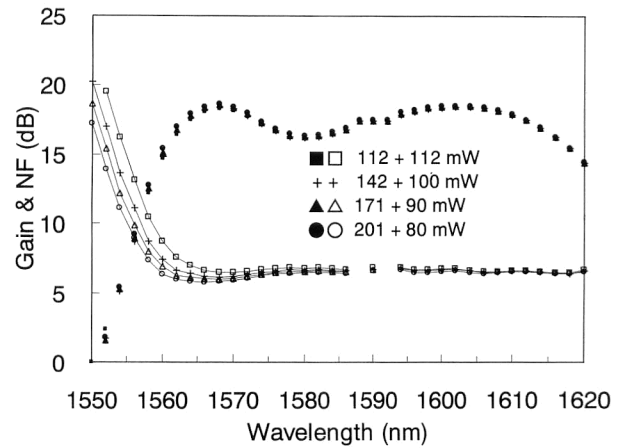


図5 利得プロファイルが一定になるようにしたまま、前方励起と後方励起のパワーを変えた場合の NF プロファイルの変化。

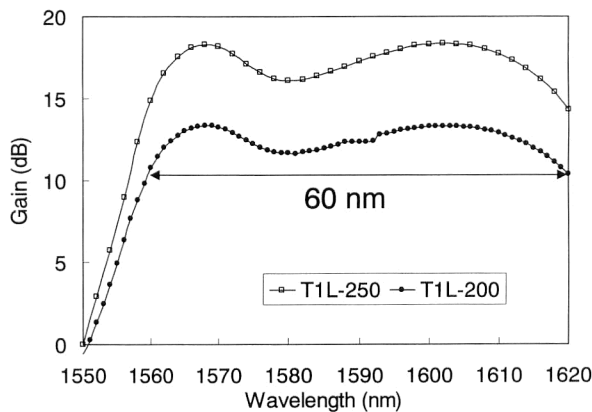


図4 プローブ法で測定した T1L-200 と T1L-250 の利得プロファイル。飽和光パワー：0 dBm，飽和光波長：1590 nm，プローブ光：-30 dBm，励起パワー：48.5+48.5 mW (T1L-200)，103+103 mW (T1L-250)。

まで増幅できることを示している。

図4にプローブ法で測定した T1L-200 および T1L-250 の、利得帯域がフラットになるように励起条件を制御した場合の利得プロファイルを示す。励起パワーをおのおの 48.5+48.5 mW，103+103 mW に調整した。

いずれの長さの Bi-EDF の場合でも、非常に広帯域な増幅特性を示し、最大利得から 3 dB 小さい利得が得られる帯域 (3 dB 帯域) は、1560~1620 nm の 60 nm であることがわかる。T1L-250 の場合、0 dBm 入力の飽和光に対して、17.3 dB の利得があったので、206 mW の励起で 54 mW の出力が得られたことになる。これは、PCE 26% に相当する。このことから、WDM で増幅した場合も広帯域の増幅利得特性と高いパワー変換効率を両立していることを示しているのがわかる。

図5に、利得プロファイル一定のまま、励起条件を変化させた場合の雑音指数 (NF) の変化を示す。前方と後方からの励起パワーが等しい場合 (112+112 mW) に比べて、

前方励起パワーの割合を高くしていくことによって 1560~1570 nm の NF が小さくなっていくことがわかる。一方、長波長側の NF については、石英系 EDF の場合、1610 nm を超えると顕著に NF が大きくなるが、Bi-EDF の場合いずれの励起条件でも、1610 nm を超えた波長においても NF は増加していないことがわかる。これについても、拡張 L バンド用の Bi-EDF としてのアドバンテージといえる。

### 3. まとめ

La イオンを共添加したビスマス系 EDF の拡張 L バンドでの増幅特性を紹介した。Bi-EDF は 1560~1620 nm の波長域での広帯域増幅特性、1610 nm 以上の波長における低 NF、L バンドとしては約 2 m という超短尺性、そして高効率という特徴を合わせもつことを示した。これらのことから、Bi-EDF は、拡張 L バンド増幅器用 EDF としてすぐれていることがわかる。

### 文 献

- 1) Y. Ohishi, *et al.*: Opt. Lett., **23** (1998) 97-99.
- 2) A. J. G. Ellison: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) 2001* (Stresa, 2001) OWC4.
- 3) M. Kakui and S. Ishikawa: IEICE Trans. Electron., **E83-C** (2000) 799-815.
- 4) T. Yamashita, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2002* (Anaheim, 2002) ThJ1.
- 5) L. P. Byriel, *et al.*: *European Conference on Optical Communication (ECOC) '01* (Amsterdam, 2001) pp. 232-233.
- 6) L. Qian, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2002* (Anaheim, 2002) pp. 459-461.
- 7) N. Sugimoto, *et al.*: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) 2000* (Quebec City, 2000) PDP3.
- 8) Y. Kuroiwa, *et al.*: *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2001* (Anaheim, 2001) TuI5.
- 9) N. Sugimoto, *et al.*: *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) 2002* (Vancouver, 2002) PDP5.

(2002年12月10日受理)