

# フッ化物ファイバ光増幅器について

セントラル硝子株式会社 オプティカルデバイス開発室

久保田 能徳

## Applications of the Erbium-doped Fluoride Glass Fiber Amplifier

Yoshinori Kubota

Optical Device Development Department, Central Glass Co., Ltd.

### 1. はじめに

1980年代に開発されたEr（エルビウム）添加ファイバ光増幅器（EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier）は、今では光通信に不可欠なデバイスとなっている。インターネットなど最近の高速大容量データ伝送が可能となっているのは、光ファイバ通信網の発達による恩恵であり、中でもEDFAの寄与するところが大きい。現在の光通信では、光送信機—光ファイバ伝送網—光増幅器—光受信機の構成が最小構成となっている場合が大半であり、FTTHの進展に伴い光増幅器が急速に末端まで浸透すると期待されている。

光増幅器のこれまでの主な用途は長距離通信幹線用の中継増幅器であった。これは言い換えれば、たくさんのお客さんを同時大量に輸送する大型ジェット機のようなもので、性能さえ良ければ少々高価でも問題なかった。しかし、FTTHのようにメトロやアクセスと言われるような末端に近い所では、少ないお客さんを輸送するタクシーのような小型高効率かつ安価な

光増幅器が必要となる。用途の違いによる光増幅器への要求事項の比較を表1に示す。メトロ/アクセス用途では、幹線用途のような多段の中継増幅は必要とされないため、高度な監視機能や高精度な利得平坦化機能は不要と考えられる。当社では、メトロ/アクセス用途に適し各種要求に柔軟に対応できる光増幅器として、フッ化物ファイバを用いた小型EDFAを提案している。

### 2. フッ化物ファイバ増幅器の特徴

第一の特徴として利得の平坦性が挙げられる。Er添加フッ化物ファイバ（F-EDF）は、一般のEr添加石英ファイバ（EDF）よりも広帯域で利得平坦であることが知られており、波長分割多重（WDM）伝送に適している（文献1）。F-EDFの利得平坦性によって、メトロ/アクセス用途であれば利得等化フィルタ（GFF）が不要となり、価格低減、工数と部品の削減による信頼性向上などに寄与する。また、単一波長増幅の場合でも利得の波長依存性が少ないため、信号波長の変動に対して励起LDの電流値を大きく変化させる必要がなく、制御回路を簡素化すると共に電気系への負担を軽減しLDを長寿命化できる。

〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 3-7-1

セントラル硝子株式会社

TEL 03-3259-7279

FAX 03-3259-7363

E-mail: ykubota@cgco.co.jp

表1 用途別の要求項目比較

項目	幹線用途 (WDM)	メトロ/アクセス		単位*	備考
		WDM	単一波長		
増幅帯域 *	Cバンド	Cバンド	Cバンド		幹線はLバンド併用も
多重化波長数	16~数百	2~32	1	ch	
出力	20程度	10~20	10~20	dBm	
利得	20~30	10~20	10~20	dB	
利得偏差	< 0.5	2程度	N/A	dB	
雑音指数 (NF)	< 5.5	< 6	< 6.5	dB	
制御	AGC	無し or AGC	無し or ALC		幹線では過渡特性重要
分散特性 *	重要	-	-		幹線以外は不明
偏波依存性 *	高度に抑制	抑制	抑制		幹線では要求厳しい
通信機能 *	高度な リモート管理	外部設定+ モニタ	モニタ		
形状 †	ラックマウント	MSA	1/2MSA		幹線系は 1U or 2U
価格	高価	中程度	安価		

\* : ITUの定める帯域で、Cバンドは1530~1565nm、Lバンドは1565~1625nm、通信ではこれらの帯域の一部を使用する。例えばCバンドでは1530~1562nmを使用することが多い。  
 \* : 特に長距離伝送では伝送路とEDFAの分散特性や偏波特性を高度に管理する必要がある。  
 \* : 幹線用途では局から遠隔で各種制御が必要である。一方、メトロ/アクセス用途では設定項目を減らして保守管理を容易にしている。  
 † : MSA (Multi Source Agreement) では形状や性能などの仕様が統一されている。MSAの筐体サイズはD90×W70×t12mmであり、ラックマウントよりも相当に小型化されている。  
 \* : 通信では対数を用いることが多い。特にdBとdBmは混同しやすいが、意味が異なるので注意を要する。  
 dB : 相対比の対数の10倍を単位とし、倍率を表す。例えば利得表記は10log[出力/入力] (dB)  
 dBm : mWで表したパワーの対数の10倍を単位とする。例えば、10log[出力 mW] (dBm)

第二の特徴として低雑音性が挙げられる。雑音指数 (NF) は利得や出力と共に EDFA の重要な要求性能である。EDFA の教科書の中には F-EDFA の NF が高いために問題があるとしているものもあるが、当社はこの問題を完全に克服している。技術的な詳細は参考文献を御覧頂きたい (文献 2)。当社 F-EDF の小信号利得と NF のスペクトルの一例を図 1 に示す。ファイバの基本性能として、25 dB を越える高利得と 4 dB 以下の NF を実現している。特に短波長側では低励起パワーで十分な利得が得られている。もちろん、ファイバの設計により利得を平坦化することができる。平坦化された利得スペクトルにおいては、このあとに述べる当社

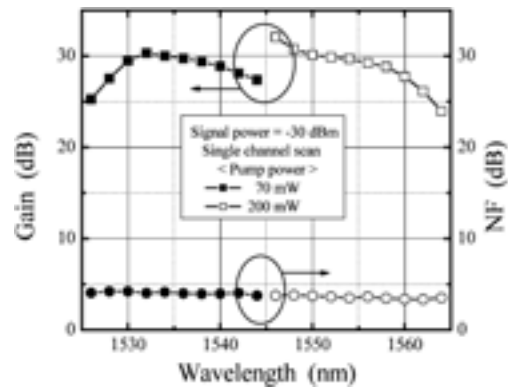


図1 フッ化物ファイバの代表的な増幅特性。

の超小型光増幅器 (略称:  $\mu$ -EDFA) や小型波長多重増幅器 (略称: Mini-EDFA) の性能紹

介をご参照いただきたい。

第三の特徴としてコンパクト性が挙げられる。フッ化物ガラスは石英ガラスと比較して10~100倍高濃度に希土類元素を溶解することができる。その結果、必要なファイバ長を0.5~1.5 mと極端に短くすることが可能となり、F-EDFを納めたファイバモジュールを小型かつ薄くし、ひいてはEDFA自体を小型化できる。

### 3. 高信頼性フッ化物ファイバモジュール

フッ化物ファイバは石英ファイバよりも化学的、機械的強度が低いことが知られており、高信頼性パッケージを開発した。信頼性試験基準として、EDFAに対する試験基準として広く知られているTelcordia GR-1312 COREを採用し、フッ化物ファイバにとって最も厳しい高温高湿度保存試験と温度サイクル試験を実施した。開発したF-EDFモジュールを写真1に示す。モジュールはステンレス製の半割構造でハーメチック封止しており、モジュールから外側には石英ファイバが出ている。このため、モジュールを市販の融着接続器で伝送用石英ファイバなどに簡単に接続できる。F-EDFはモジュール内に完全に密封されており、外気には触れないため周囲環境の影響をほとんど受けない。開発したモジュールの信頼性を確かめるために、Telcordia GR-1312 COREに規定されている温度85°C 相対湿度85%の条件で1,000時間保存した。その結果、全サンプルの光透過損失の変動が測定誤差範囲内となり、試験基準をクリアした(図2)。また、同じくGR-1312 COREで規定されている温度サイクル試験を実施した。試験条件は-40°C ⇄ 70°Cのサイクルを100回繰り返して特性変化を比較するものである。この試験についても、表2に示すように問題なくクリアした。これらの結果から、F-EDFモジュールはEDFA用に十分使用できることが判った。

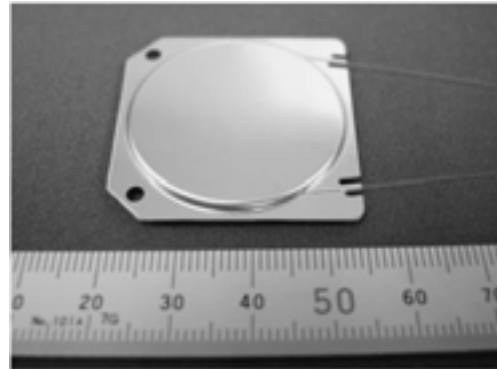


写真1 高信頼性フッ化物ファイバモジュール  
モジュール右側から二本出ているファイバは石英ファイバであり、フッ化物ファイバと接続点はモジュール内で完全に保護されている。

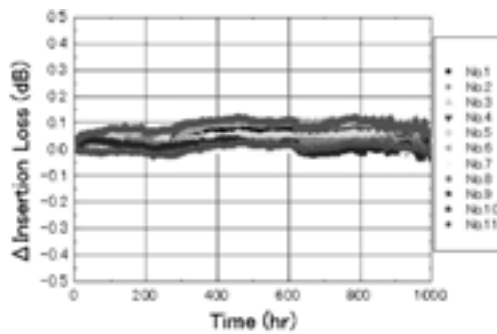


図2 F-EDFモジュールの高温高湿保存試験結果  
Telcordia GR-1312 COREで求められているサンプル数は3個だが、11サンプル全てが試験をクリアした。現在、GR-1221 COREの求める2000時間をクリアするべく試験を継続中。

このモジュールの重要なポイントは、フッ化物ファイバと石英ファイバの接続点を内蔵している点にある。これまで、フッ化物ファイバと石英ファイバの接続には、双方の端面を研磨して接着する方法が用いられてきた。しかし、高い光パワーが集中する接続点に接着剤があると、光損傷による破断が生じる恐れがあった。また、接続点を研磨するためにV溝などの保持具が必要であり、小型化が困難であった。当社ではフッ化物ファイバと石英ファイバの接続

表2 温度サイクル試験結果

高温高湿保存試験と同様に、温度サイクル試験前後のモジュールの光透過損失を比較した。損失変化は測定誤差範囲内であり、試験基準をクリアしている。

サンプルNo.	$\Delta$ Loss (dB)
1	+0.04
2	-0.09
3	+0.03
4	-0.07
5	-0.06
6	-0.12
7	-0.10
8	-0.03
9	-0.05
10	-0.05
11	-0.03

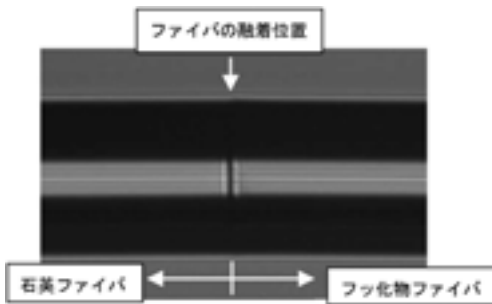


写真2 石英ファイバとフッ化物ファイバの融着点。

方法について、従来不可能と考えられてきた融着技術の開発に成功した。融着点の状態を写真2に示す。表面は平滑で形状変形はほとんどなく、コア間の位置ずれもない。融着技術の開発により、信頼性の高いフッ化物ファイバモジュールの工業的な生産と安定な供給が可能になった。

開発した F-EDF モジュールの長期寿命については、温度 85°C、相対湿度 85% の過酷な条件下で保存しても、25 年間の故障率が  $10^{-6}$  以下と予測している（文献 3）。

写真3  $\mu$ -EDFA：名刺よりも小さい W45×D70×t12 mm に EDFA としての機能を凝縮。

#### 4. 超小型光増幅器： $\mu$ -EDFA

耐候性に優れた小型 F-EDF モジュールを組み込んだ、単一波長増幅用の超小型光増幅器が  $\mu$ -EDFA である。超小型 EDFA は設計、組立などに高度な技術力が必要であることから、世界でも数社が製品化しているだけである。サイズは MSA 規格の半分（幅 45 mm×奥行き 70 mm×高さ 12 mm）であり、名刺よりも一回り小さいことから機器組み込みでの使用に適している（写真 3）。MSA 規格の半分以下にすることも可能だが、ユーザ側でのボード実装設計を容易にするために、MSA サイズを基本単位としてパッケージサイズを考えている。出力レベルは入力信号レベルにもよるが 10~16 dBm に設定可能であり、中程度の出力のブースターアンプとして十分な性能がある。励起レーザには非冷却 Mini-DIL タイプの LD を用いており、極めて低い消費電力に抑えることに成功している。非冷却の励起 LD ではあるが、筐体との高伝熱接触による冷却構造を採用し、周囲温度 0~70°C の範囲で動作することを確認している。 $\mu$ -EDFA の増幅特性の一例を図 3 に、スペックを表 3 に示す。単一波長増幅用ではあるが、出力の波長依存性が小さく、使いやすい特性となっている。 $\mu$ -EDFA には出力を一定に保持する自動レベル制御（ALC）回路をオプションで内蔵することができる。ALC 制

御により、入力信号強度が変動しても C-band 全域で非常に安定した光出力を得ることが可能となる。ALC 回路は出力パワーモニタ出力、LD 過負荷時のシャットダウン機能など、各種

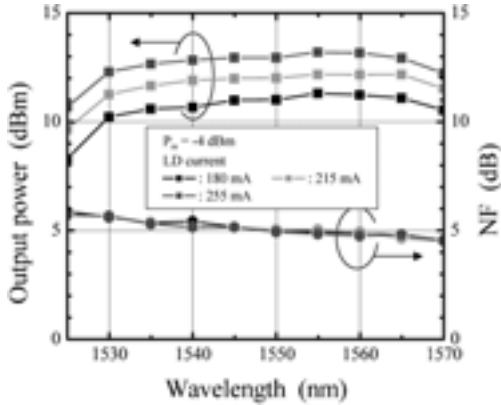


図3 μ-EDFA の増幅特性の例。

機能も備えている。

μ-EDFA の用途としては、

- 光測定器類の組み込みブースタまたはプリアンプ
- OADM や光スイッチなどの損失補償
- 低出力半導体光源のブースタ
- 信号波長あたりのレベル調整に VOA 置き換え
- アクセス系への光送出力ブースタ
- アクセス系末端での損失補償

などが挙げられる。これら以外にも小型、低消費電力、低価格を活かして、従来の EDFA と異なる領域での応用が期待できる。

### 5. 小型波長多重増幅器：Mini-EDFA

μ-EDFA と同様に、耐候性に優れた小型 F-

表3 μ-EDFA のスペック表

項目	Min.	Typ.	Max.	単位	備考
チャネル数		1			
波長範囲	1528		1562	nm	
入力レベル		-6	4	dBm	
出力レベル	10		16	dBm	
利得		15		dB	
NF(雑音指数)		5.5	6	dB	
戻り光	35	45		dB	
偏光依存性			0.3	dB	
ポンプLD					
電圧			1.7	V	使用温度範囲において 使用温度範囲において
電流			400	mA	
モニター-PD (入力モニター)					
					なし
モニター-PD (出力モニター)					
バイアス電圧			20.0	V	使用温度範囲において 使用温度範囲において
暗電流			20	nA	
感度	10		25	mA/W	
ピグテールファイバ(入力側:青,出力側:赤)					
ファイバ	SMF-28 φ0.9mm				SC, FCも選択可能
長さ	1.1			m	
コネクタ	LC/SPC				
その他					
寸法	W70×D45×t12			mm	
使用温度	0		70	°C	ケース温度
保存温度	-20		70	°C	ケース温度
制御回路	ALC回路				オプション



写真4 Mini-EDFA: MSA サイズ (W70×D90×t12 mm) で波長多重増幅が可能。

EDF モジュールを組み込んだ多波長一括増幅用の小型光増幅器が Mini-EDFA である。筐体は MSA 規格サイズ (幅 70 mm×奥行き 90 mm×高さ 12 mm) であり、名刺の 2 倍程度のサイズとなっている (写真 4)。8~32 チャンネル程度の多波長一括増幅が可能であり、利得等化フィルタを使用せずに C-band で利得偏差が 2 dB 以内となるように調整している。利得特性の一例を図 4 に、スペックを表 4 に示す。出力レベルは入力信号レベルにもよるが 16 dBm 程度であり、中程度の出力のメトロ用ブースターアンプに適している。励起レーザには  $\mu$ -EDFA と同じく非冷却 Mini-DIL タイプの LD を用いており、消費電力は 2 W 以下と極めて低い。また、入力波長数や入力信号レベル変動に関わらず利得を一定に制御する、自動利得制御 (AGC) 回路をオプションで内蔵することができる。利得レベルは外部から設定可能であり、各種アラーム出力を備えている。

Mini-EDFA の用途としては、

- メトロリング、メトロメッシュ用増幅器
- OADM の一括損失補償
- 中距離用の小段数中継増幅器
- 2~3 波 CWDM 増幅器

などが挙げられる。今後、データ伝送容量の拡大と通信価格の定価に伴い、伝送チャンネルあたりのコスト低減が必要となる見込みである。チャンネルあたりの価格が手ごろな Mini-

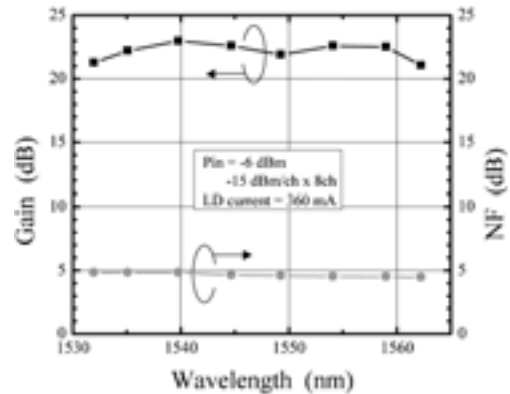


図4 Mini-EDFA の増幅特性の例。

EDFA の需要拡大が期待できる。

## 6. フッ化物ファイバ増幅器の展開

通信用途では、CWDM システムに使用可能な EDFA の要求がある。CWDM システムは当初、増幅器のないネットワーク構成で導入コスト削減を売り物にしていたが、実際にはネットワーク末端でパワーが不足する場合があります、増幅器が必要になる。CWDM システムはチャンネルあたりの使用波長帯域が 20 nm であり、市場からの要求が強い 4 チャンネル以上の増幅のためには、増幅帯域 80 nm 以上の超広帯域増幅器が必要となる。このような超広帯域増幅器を石英ファイバで構成した場合は非常に高価であり、もともと安価なシステムを売り物としている CWDM システムへの導入は困難である。F-EDFA ではフッ化物の広帯域性から超広帯域増幅の可能性があり、積極的に検討を進めている。すでに簡単な多段 EDFA の構成で超広帯域増幅できる可能性を見だしており (文献 4)、既存の CWDM 用増幅器よりも簡易な構成で安価に提供できると考えている。

通信用途以外での応用としては、光ファイバを利用した CATV 映像伝送でのブースタ増幅器が挙げられる。CATV では、送信機一台から可能な限り多数の加入者に一括配信した方が

表4 Mini-EDFA のスペック表

項目	Min.	Typ.	Max.	単位	備考
チャネル数		8	*		*: 出力に依存
波長範囲	1528		1562	nm	帯域幅制限: 30nm
入力レベル			-5	dBm	総入力
出力レベル	15		17	dBm	総出力
出力のリップル			2	dB	使用波長範囲において
利得		20		dB	
NF(雑音指数)		5.5	6	dB	$P_{in} = -6\text{dBm}$ , $P_{out} = 16\text{dBm}$ にて
戻り光	35	45		dB	コネクタ無し
偏光依存性			0.3	dB	透過帯域において
ポンプLD					
電圧			2.2	V	
電流			640	mA	
モニターPD					
バイアス電圧		5.0	20.0	V	
増電流			20	nA	使用波長範囲において
感度(入力/出力)	35/10		60/25	mA/W	使用波長範囲において
ビグテールファイバ(入力: 赤, 出力: 青)					
ファイバ	SMF-28 $\phi 0.9\text{mm}$				
長さ	1.1			m	
コネクタ	LC/SPC				SC, FCも選択可能
その他					
寸法	W90 × D70 × t12			mm	
使用温度	0		70	°C	ケース温度
保存温度	-20		70	°C	ケース温度
制御回路	AGC回路				オプション

経済的であると考えられており、高出力EDFAへの要求が高まっている。この要求に対しては、最大 21 dBm の高出力型 F-EDFA を用意している。また、高出力の光信号をファイバ中に入射すると、誘導ブリュアン散乱による雑音や非線形光学効果の影響で復調が困難になる場合がある。このため、光送信機出力をあらかじめ 4 分割してから増幅する低非線形な 4 入力-4 出力型 F-EDFA も提案している。

ここに挙げた以外にもフッ化物ファイバには多種多様な応用が考えられ、さらなる用途拡大が期待されている。

#### 参考文献

- 1) M. Yamada, T. Kanamori, Y. Terunuma, K. Oikawa, M. Shimizu, S. Sudo and K. Sagawa, "Fluoride-Based Erbium-Doped Fiber Amplifier

with Inherently Flat Gain Spectrum," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, pp. 882-884, 1996.

- 2) Y. Kubota, T. Teshima, N. Nishimura, S. Kanto, S. Sakaguchi, Z. Meng, Y. Nakata and T. Okada, "Novel Er and Ce Codoped Fluoride Fiber Amplifier for Low-Noise and High-Efficient Operation With 980-nm Pumping," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, pp. 525-527, 2003.
- 3) 大室 仁, 久保田能徳, 手島卓也, 関東貞雄, 西村夏哉, 春日 健, 坂口茂樹, 「光アンプ用フッ化物ファイバーモジュールの信頼性」, 電子情報通信学会 2004 ソサエティ大会予稿集, C-3-8, 2004.
- 4) Y. Akasaka, Y. Kubota, S. Sakaguchi, I. White and J. Pan, "100 nm gain bandwidth amplifier based on 980 nm pumped cerium codoped fluoride EDF," Electron. Lett., vol. 39, pp. 836-838, 2003.