

# DWDM用光増幅器の開発

## Broadband Optical Amplifiers for DWDM Systems

大越 春喜\*  
Haruki Ogoshi

一野 誠司\*  
Seiji Ichino

黒鳥 克哉\*  
Katsuya Kurotori

概要 DWDMシステムの普及と拡大は光増幅器，特にErドープ光ファイバアンプの帯域拡大を中心とした各種の技術開発とともに進んできた。利得等化技術の開発により1532 nm前後の利得のピークが平坦化され，1530-1560 nm帯すべてが利用可能となってきた。また，長尺のErドープファイバを用いることにより1570-1600 nmの長波長帯に利得をシフトする技術開発も進んでいる。ここでは，この間古河電工が開発した，マイクロプロセッサ搭載によりフレキシブルに制御可能な1530-1560 nm帯モジュール型光増幅器，1570-1600 nm帯に利得をシフトしたデスクトップ型光増幅器，及びDWDM用各種受動部品の損失を補償しシステム設計自由度の向上を目的とした，シングルチャネル用超小型ゲインモジュールについて報告する。

### 1. はじめに

インターネットを引き金とした通信需要の急激な増加は，DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing) システムの開発，実用化を強く後押しした。数年前までは学会レベルで議論されていたDWDMシステムが一気に実導入され，多重数も100チャンネルに迫る勢いである。

こうしたDWDMシステムの普及と拡大はErドープ光ファイバアンプ (EDFA, Er Doped Fiber Amplifier) の広帯域化の技術開発と相まって進んできた。

シリカファイバをベースとしたEDFAの広帯域化技術としては，利得等化器による1530-1560 nm帯 (C-band) の利得波長特性の平坦化<sup>1)</sup>と，長尺のErドープファイバを低反転分布状態で使用し1570-1600 nm帯 (L-band) の利得を確保する長波長化技術<sup>2), 3)</sup>があり，実用化されている。また，ホストガラスをシリカファイバからフッ化物ファイバに変えたEDFFA (Er Doped Fluoride Fiber Amplifier) も開発，実用化されている<sup>4), 5)</sup>。最近ではテルライトガラスを用いたEDTFA (Er Doped Tellurite Fiber Amplifier) が開発され，1530-1600 nmを一括増幅するというEDFAには無い優れた増幅特性が得られている<sup>6) - 8)</sup>。

このようにErを用いた光ファイバアンプで，1500 nm帯の増幅はほぼカバーされるようになってきている。一方，光ファイバの製造技術の進歩により，光ファイバ中の水分による吸収損失の問題からは解放されており，1400 nm帯が新たな通信帯域として注目を浴びてきている。1400 nm帯をカバーする誘導放出型の光増幅器としてはTmを用いたTDFA (Thulium Doped Fiber Amplifier) が開発，報告されている<sup>9), 10)</sup>。一方，誘導放出型光増幅とは異なり，ラマン増幅は励起波長を選択することによって任意の増幅波長が得られるため，1400 nm帯にはラマン増幅を適用し，1500 nm帯はEDFAを用いた超広帯域

なシステムも報告されている<sup>11)</sup>。ラマン増幅技術はEDFAが出現する以前は盛んに研究されていたが，高い励起パワーを必要とすることと1980年代末のEDFAの発明もあり，実用には至らなかった。それがEDFAの実用化過程で1480 nm帯励起レーザの高出力化が進むと，その励起レーザ技術の応用により実用的なラマン利得が得られるようになってるとともに，広帯域増幅技術への強いニーズもあり，再び注目されてきた<sup>12)</sup>。

図1はこれらの技術開発によりカバーされた光増幅器の増幅帯域を示している<sup>13)</sup>。1500 nm帯はEr，1400 nm帯はTmを用いた誘導放出型の増幅器でほぼカバーされ，それを補間又は重なるかたちでラマン増幅が位置している様子がわかる。今後はこれらEDFA，TDFA，ラマン増幅技術が組み合わせられ，200 nmに渡る帯域を活用した光波ネットワークシステムの実用化

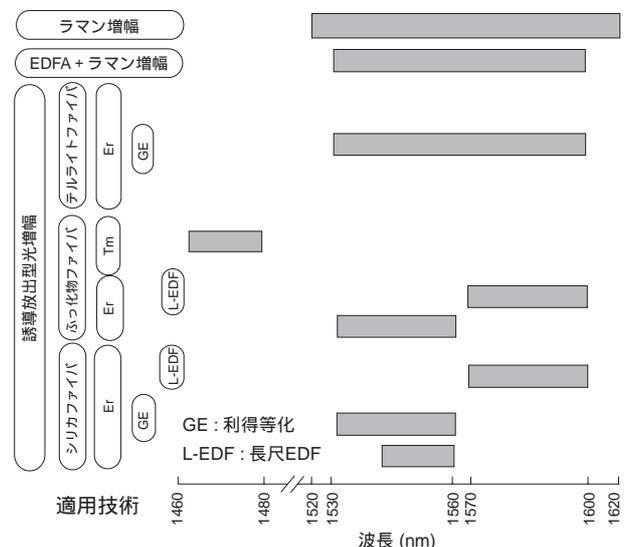


図1 DWDM用光増幅器の開発状況  
Development status of optical amplifiers for DWDM systems

\* ファイテル製品事業部 光機器部

開発が進むものと予想される。

古河電工では90年代後半よりDWDM用EDFAの開発に注力するとともに、最近ではラマン増幅の有効性に注目し要素技術の開発を進めてきた。ラマン増幅技術開発の紹介については別稿にゆずり、ここではシリカファイバをベースとしたDWDM用EDFAの技術開発について報告する。

## 2. 1530-1560 nm帯 (C-band) 用EDFAの開発

DWDM用光増幅器に要求される特性としては(1)利得の波長に対する平坦性、(2)高出力性があげられる。このうち多数の波長の異なる信号光を一括で増幅する必要のあるDWDMシステムでは利得の波長に対する平坦性(利得平坦性)が最も注目される特性となる。したがってDWDM用EDFAの開発とは、利得平坦性を実現する開発であった。

図2はErドープファイバの反転分布をパラメータとした場合の利得係数のスペクトルである。1540-1560 nmに注目すると高い反転分布を有する場合は波長に対して右下がりの傾斜となり、低い反転分布の場合は右上がりの傾斜となる。図2の例の場合、70%程度の反転分布状態に制御すると最適な平坦性が得られる。1530-1560 nm帯すべてを使用する場合、1532 nm付近の急峻な利得のピークが邪魔をして反転分布の制御のみでは平坦な利得特性を得ることは不可能である。この領域を平坦にするためには利得等化フィルタを使用するのが一般的である。図3にその概念を示した。利得等化フィルタはEDFの利得ス

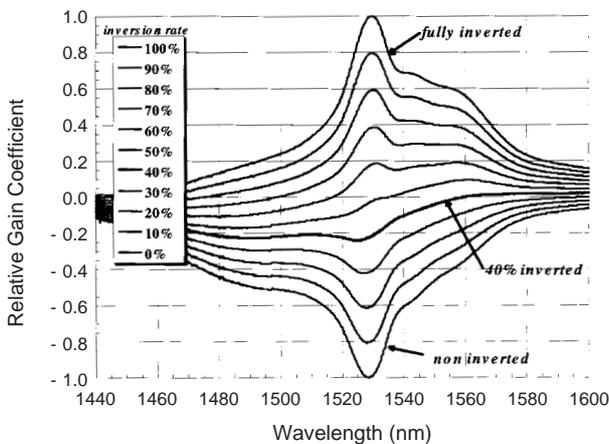


図2 反転分布係数をパラメータとしたEDFの利得係数  
Gain coefficients of EDFs with population inversion rate as a parameter

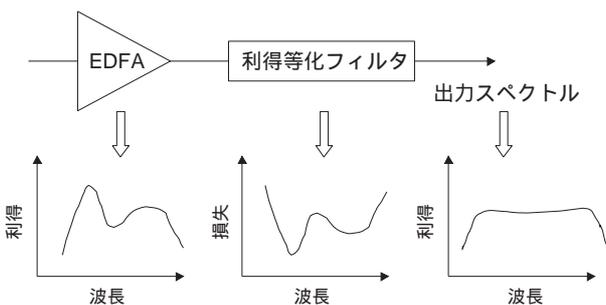


図3 利得等化フィルタを用いた平坦化の概念図  
Conceptual diagram of gain flattening using gain equalizing filter

ペクトルと反対の損失スペクトルを持ち、EDFの利得スペクトルを平坦にする。

### 2.1 ErFA3300

ErFA3300は主に局間を結ぶ基幹系DWDMシステムの各種ニーズに対応するため、光学特性のみならず、電気的制御にも柔軟性を有するEDFAを提供することを目的として開発された。図4はErFA3300の構成を、写真1は外観を、それぞれ示している。ErFA3300では最大3台までの励起レーザを搭載でき、前段増幅部に1台、後段増幅部に2台の励起レーザを割り当てている。利得等化フィルタは前段増幅部と後段増幅部の間に配置され、1530-1560 nmの帯域を利得平坦性1 dB以下で増幅可能である。後段増幅部に高出力の1480 nm励起レーザを用いることによって最大20 dBmの出力を得ることができる。図5にErFA3300に32chの波長の異なる信号を入射した場合の出

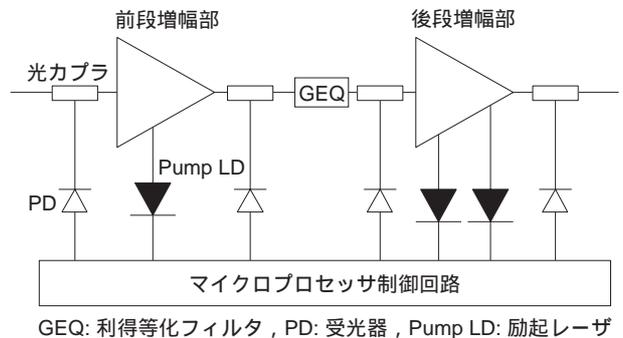


図4 ErFA3300の構成  
Configuration of ErFA3300



写真1 ErFA3300の外観  
Appearance of ErFA3300

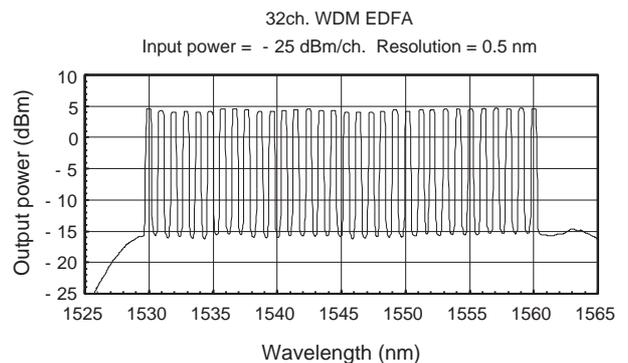


図5 ErFA3300の出力特性  
Output power spectrum of ErFA3300

カスペクトルを示す。1530-1560 nm に渡って平坦な利得特性が得られていることが分かる。

ErFA3300 は DWDM 用 EDFA として、他にも各種の特徴、機能を有している。

- ・マイクロプロセッサを採用し、各増幅部ごとに利得一定制御、出力一定制御、励起光パワー一定制御が、ソフトウェアを変えることにより自由に設定できる。
- ・出力レベルを 64 段階に変化できる。
- ・シリアル、パラレルの両方のインターフェイスを有する。
- ・40 dB 以上の広いダイナミックレンジ、平均精度  $\pm 0.25$  dB の入出力モニタ機能を有する。
- ・外部コンピュータと接続し、入出力パワー、各励起レーザの動作状態、EDFA の動作条件のモニタ及び設定がグラフィカルユーザインターフェイスを通じて可能 (図 6)。

## 2.2 ErFA3100

ErFA3100 は今後の急成長が期待されるメトロポリタンシステムや光 LAN システム等低利得、低出力、低価格な EDFA を提供することを目的に開発された。利得等化フィルタを用いて 1530-1560 nm 帯の利得スペクトルを平坦にしている点は ErFA3300 と同様であるが、搭載可能な励起レーザは 1 台のみで、最大飽和出力は 13 dBm と小さい。写真 2 に外観を示す。1 段のみの増幅部と出力側に利得等化フィルタを有するシンプルな光学構成を採用している。励起波長としては雑音特性を考慮し 980 nm 帯を用いた。制御方式としては利得一定制御を採用、



図 6 ErFA3300 のグラフィカルユーザインターフェイス  
Graphical user interface of ErFA3300

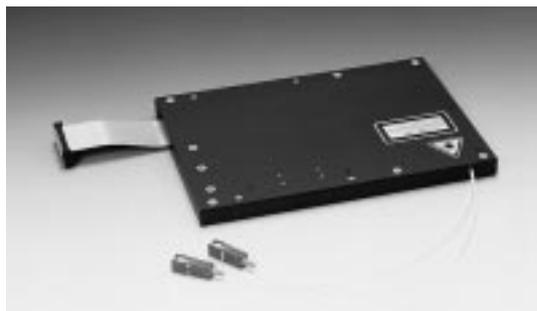


写真 2 ErFA3100 の外観  
Appearance of ErFA3100

信号光レベルが低い場合には ASE (Amplified Spontaneous Emission) の影響を自動補正し、正確な利得一定制御を維持する機能を有している。その他の電気的特徴は ErFA3300 と同一である。図 7 は入力レベルをパラメータとした場合の利得平坦性の変化を示している。入力レベルが変化しても平坦性が維持されている様子がわかる。

## 3. 1570-1600 nm 帯 (L-band) 用 EDFA の開発

通常のシリカファイバをベースとした EDF においても 1570 nm より長波長側に増幅特性を有することは知られていた。しかし長波長側は増幅効率が悪く、DWDM システムサイドからの増幅帯域拡大のニーズが強まるまでは顧みられることはなかった。再び図 2 にもどり今度は 1570-1600 nm 付近に注目すると、1570 nm 以上の長波長帯においても利得を有することがわかる。しかし、1570 nm 以上で得られる利得は小さく、光増幅器として実用的なレベルである 25 dB ~ 30 dB 程度の利得を得るためには、長手方向に小さな利得を積算していくため長尺の EDF と大きな励起パワーが必要となる<sup>13)</sup>。

1570-1600 nm 帯用 EDFA は 1997 年に発表されて以来急速に開発が進んできた<sup>2),3)</sup>。それは、光増幅器を実現するための要素技術が従来の 1530-1560 nm 帯 EDFA と同様であり、高出力の励起レーザの開発も進んでいたという技術的背景がある。

図 8 は L-band EDFA の構成を、図 9 はその特性例を示す。L-band EDFA では従来の C-band EDFA の約 5 倍から 10 倍程度の長尺 EDF を必要とする。L-band EDFA の特性の特徴の一つは、利得等化フィルタを用いなくても 1570-1600 nm の帯域に渡ってほぼ平坦な利得特性を有している点にある。これは C-band EDFA では得られない特徴であり、図 2 から容易に想像できる。写真 3 は L-band EDFA を搭載した研究開発用に開発されたデスクトップ型光増幅器 ErFA1419 の外観である。1570-1600 nm の帯域で、利得平坦性 1 dB、飽和出力 +20 dBm 以上を実現している。

## 4. 受動部品損失補償用超小型 ゲインモジュールの開発

DWDM システムでは光 MUX (Optical multiplexer)、光 DEMUX (Optical de-multiplexer)、光 ADM (Optical add-drop

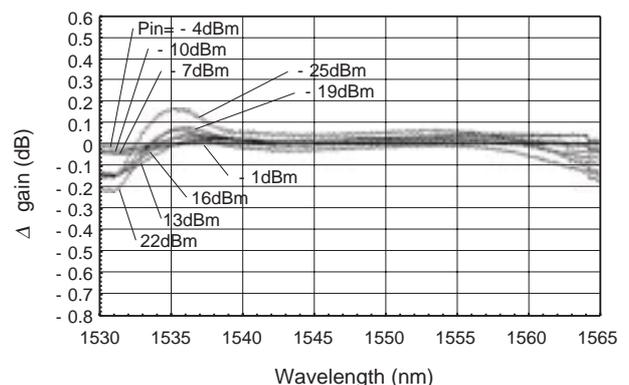


図 7 ErFA3100 の特性例: 利得平坦性変動 vs 入力レベル  
Characteristics of ErFA3100: gain flatness deviation vs. input level

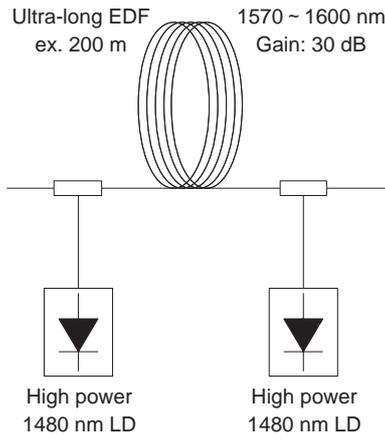


図8 L-band EDFAの構成  
Configuration of L-band EDFA

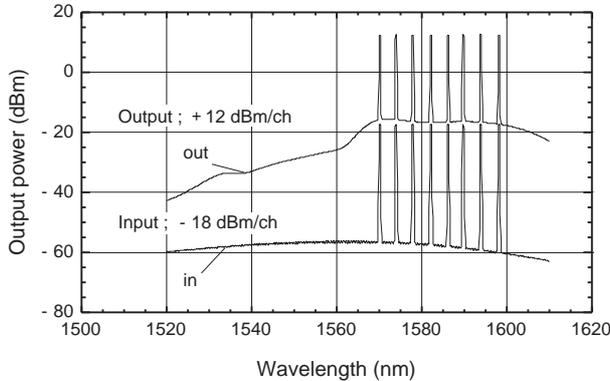


図9 L-band EDFA特性例  
Characteristics of L-band EDFA



写真3 ErFA1419の外観  
Appearance of ErFA1419

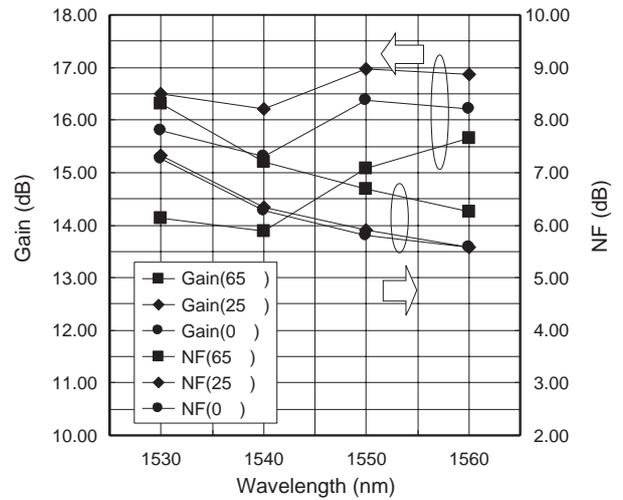


図10 超小型ゲインモジュール利得、雑音特性  
Gain and noise characteristics of ultra compact gain module

multiplexer), 光クロスコネクタ等において挿入損失の大きい受動部品が使用される例が多い。これら受動部品の挿入損失を各チャンネル単位で補償可能なEDFAがあればシステム設計の自由度が増え、かつ安価なシステムを構築可能となる。こうしたニーズに応じて開発されたのが名刺型サイズの超小型ゲインモジュールErFA1974である。ErFA1974は、ペルチェ素子を用いない冷却フリーの、同軸型パッケージ1480 nm帯励起レーザ及び励起光と信号光を合波する合波器のみから構成され、サイズは85 × 53 × 8 mmとほぼ名刺と同様のサイズとなっており、必要に応じて光アイソレータが搭載可能である。図10に特性例を示す。

### 5. おわりに

DWDM用光増幅器として1530-1560 nm帯用、1570-1600 nm帯用EDFA及び受動部品損失補償用超小型ゲインモジュールの開発状況を紹介した。これらの技術開発が今日のみならず明日のDWDMシステムひいては将来の光波ネットワークシステムの発展にいくらかでも寄与できれば、開発者一同望外の喜びとするものである。

なお、本稿で紹介した開発内容については、研究開発本部光技術研究所WPチーム光伝送グループ、ファイナル製品事業部光機器部設計開発グループ全体の成果であり、著者が代表してその責任においてとりまとめた。関係各位の協力、日頃の活動に対して、改めて感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) P. F. Wysocki et al., OFC'97, PD-2, 1997
- 2) M. Yamada et al., Electron. Lett., vol.33, pp.710-711, 1997
- 3) M. Fukushima et al., OFC'97, PD-3, 1997
- 4) M. Yamada et al., IEEE Photon. Tech. Lett., vol.8, No.7, pp.882-884, 1996
- 5) M. Yamada et al., IEEE Photon. Tech. Lett., vol.8, No.5, pp.620-622
- 6) A. Mori et al., OFC'97, PD-1, 1997
- 7) A. Mori et al., Electron. Lett. 34, p.887, 1998
- 8) M. Yamada et al., OFC'98, PD-7, 1998
- 9) T. Sakamoto et al., OAA'96, ThC3, 1996
- 10) T. Komukai et al., IEEE Quantum Electron., vol.31, pp.1880-1888, 1995
- 11) A. K. Srivastava et al., OAA'98, PD-2, 1998
- 12) 大越春喜 OPTRONICS No.209, pp.141-144, 1999
- 13) 大越春喜 電子情報通信学会誌 Vol.82, No.7, pp.718-724, 1999