

# 高出力光アンプの開発

## Development of High Power Optical Amplifier

田代至男\*  
Yoshio Tashiro

小柳 諭\*<sup>2</sup>  
Satoshi Koyanagi

相曾景一\*<sup>3</sup>  
Keiichi Aiso

田中完二\*  
Kanji Tanaka

並木 周\*  
Shu Namiki

**概要** 近年の高密度波長多重(D-WDM: Dense Wavelength Division-Multiplex)伝送技術の発展・実用化に伴い、それらに用いる光増幅器、特にエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)にも更に高い特性が求められている。本報告では1480nm帯域の半導体レーザーを3波長多重して得られた高出力励起光源を用いて、1.5Wの信号出力を達成した高出力EDFAについて報告する。

### 1. はじめに

近年の高密度波長多重(D-WDM: Dense Wavelength Division-Multiplex)伝送技術の発展・実用化に伴い、それらに用いる光増幅器、特に最も実用化が進んでいるエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)にも更に高い出力が求められている。その理由は、信号光の多重度の増加に伴いトータルの光強度が増加すると、同じ利得を得るためにEDFAの高出力化が必要となるからである。それ以外にも高出力EDFAの用途として期待されるものに高出力増幅器による無中継伝送<sup>1)</sup>、衛星間光通信<sup>2)</sup>、ファイバ内の非線形効果を用いた光信号処理<sup>3)</sup>などがある。

Wattクラスを越える高出力EDFAの実現方法としては、励起波長として980nm帯を用いるか1480nm帯を用いるかによって大きく二つに分類される。前者の場合、Erイオンの励起準位に対応する吸収帯の半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)が978nmを中心として16nm程度と狭いことが特徴である。また、信号波長帯である1530nm-1580nmとのエネルギーレベルの差が大きいため、励起光から信号光への量子変換効率が60%程度に限られる。この低い効率を補うため、より高出力の励起光源が必要とされる。

この問題の解決のためにYb(Ytterbium)を共添加したEDF(Erbium-Doped Fiber)が用いられる。Ybイオンは広い吸収帯(800nm-1100nm)を持ち、イオン間相互作用により、励起されたYbイオンからErイオンへエネルギー伝達が起こるので、共添加によりErイオンを間接的に励起することが可能である。励起波長帯が広がることで、例えば800nm GaAs半導体レーザーで励起した1064nmのNd-YAGレーザー<sup>5)</sup>のような高出力励起光

源が使用可能となるため、低い量子変換効率を補うことができる。更に、Er、Ybを添加したコアと、第一、第二クラッドからなり、第一クラッドが励起光をマルチ横モードで伝搬し、コアが信号光をシングルモードで伝搬させるダブルクラッドファイバを用いて、マルチ横モードを有する高出力980nm半導体レーザー<sup>4)</sup>で励起することにより高出力を得る方法も、盛んに研究されている<sup>6)</sup>。

一方、1480nm帯を励起波長とする利点は以下の2点である。(1)励起波長帯が信号波長帯と近いため、90%以上の高い量子変換効率が得られること。(2)1450nm-1500nmまでの50nmを励起波長帯として使用できるため、励起光を波長多重して合波することが容易なことである。欠点はErイオンの1480nm帯でも誘導放出がおこるため完全な反転分布を生成することができないので、980nm帯で励起する場合に比べて雑音特性に劣ることが挙げられる。しかしこの欠点は980nm励起したEDFAを前置増幅器とする2ステージ型のEDFAを構成することで改善できる<sup>7)</sup>。

1480nm帯の励起光源を高出力化する方法としては1480nm半導体レーザーの波長合波、偏波合成<sup>8)</sup>を利用するものが知られている。最近ではラマン増幅とファイバレーザーを組み合わせたカスケードラマンレーザー<sup>9)</sup>が報告されている。筆者らのグループでは1480nm半導体レーザーを励起光源として用いた高出力EDFAの研究開発<sup>10)</sup>を進めており、最近1.5Wの信号出力を有する高出力EDFA<sup>11)</sup>を開発した。本報告では開発した高出力EDFAを中心に1480nm半導体レーザーを用いたEDFAの高出力化技術を報告する。

### 2. 1480 nm 半導体励起レーザーの特性

筆者らは励起光を波長多重して合波することにより、EDFに高い励起強度を入射することで高出力を実現する技術開発を行っている。一般的な1480nm半導体レーザーの中心波長は

\* 光技術研究所 WPチーム

<sup>2</sup> ファイタル製品事業部 光デバイス部 第2課

<sup>3</sup> 光ファイバ事業部 ファイバ開発センター

1460nm-1490nmである。しかし、これまでの1480nm半導体レーザは多数のファブリペローモードで発振しており、その出力スペクトルは5nm程度のFWHMを有する。出力スペクトルのFWHMが大きいと、波長多重する際の波長間隔が制限される。損失の点からも、波長多重素子の透過スペクトルの波長帯域より励起光の出力スペクトルの波長帯域が大きいと、実効的な励起強度の損失が無視できなくなる。また駆動電流により中心波長がシフトするので、合波効率が駆動電流に依存する問題がある。

今回、これらの問題を解決するためにFBG (Fiber Bragg Grating) を外部共振器として波長を安定化した半導体レーザモジュールを開発した<sup>12)</sup>。図1にレーザモジュールの構造を示す。レーザからの出射光はコリメータレンズと集光レンズを通して、ファイバに結合される。ピッグテールファイバはレーザ出力の偏波合成のために定偏波ファイバとした。開発した半導体レーザモジュールに使用したFBGの外径は長さ50mm、直径2.7mmであり、モジュールより700mmから800mmの部分にFBGを配置している。

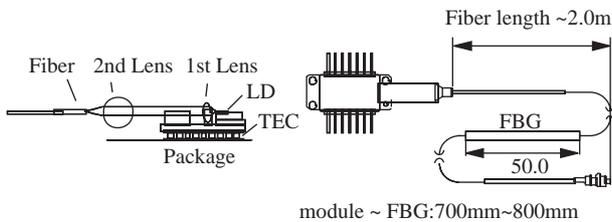


図 1 波長安定化1480nm半導体レーザモジュールの構造 Schematics of stabilized laser diode module

図2に25℃のサブマウント温度で駆動した場合の駆動電流に対する出力特性と出力強度の波長スペクトルを示す。比較のため、FBGのないレーザモジュール(図2(a))とFBGにより波長を安定化したレーザモジュール(図2(b))のデータを示す。図2の上段は駆動電流特性を示すが、FBGの有無によらず800mAまでの駆動電流で出力にキンは生じていない。600mAの駆動電流時で160mWの出力が得られ、FBGの挿入による出力低下は小さい。図2の下段は駆動電流500mA時の波長スペクトルの測定結果である。開発したレーザモジュールではFBGにより出力スペクトルのFWHMは約5nmから約1.5nmに狭窄化された。

発振中心波長の駆動電流依存性の計測結果を図3に示す。開発したレーザモジュールでは中心波長の駆動電流依存性は小さく、従来のFBGのないレーザモジュールに比べて、安定した合波特性が期待できる。

### 3. 高出力光ファイバ増幅器の特性

開発したEDFAでは前述したFBGにより波長を安定化した半導体レーザを使用した。EDFAの光学構成として双方向励起構成のEDFAを縦続接続した2ステージ構成を採用した(図4)。

励起光の合波にはレーザモジュールの定偏波ファイバ出力をPBC(Polarization Beam Combiner)を用いてはじめに偏波合成し、波長多重には前段EDFAには2-channel、後段EDFAには3-channelのWDM(Wavelength Division Multiplexer)カプラを用いている。使用したレーザモジュールは20個である。励起レーザの中心波長は2-channelの合波では1465nmと1490nmであり、3-channelの合波では1463nm、1478nm、1493nmである。6個のレーザモジュールを使用した3-channelの合波後で、

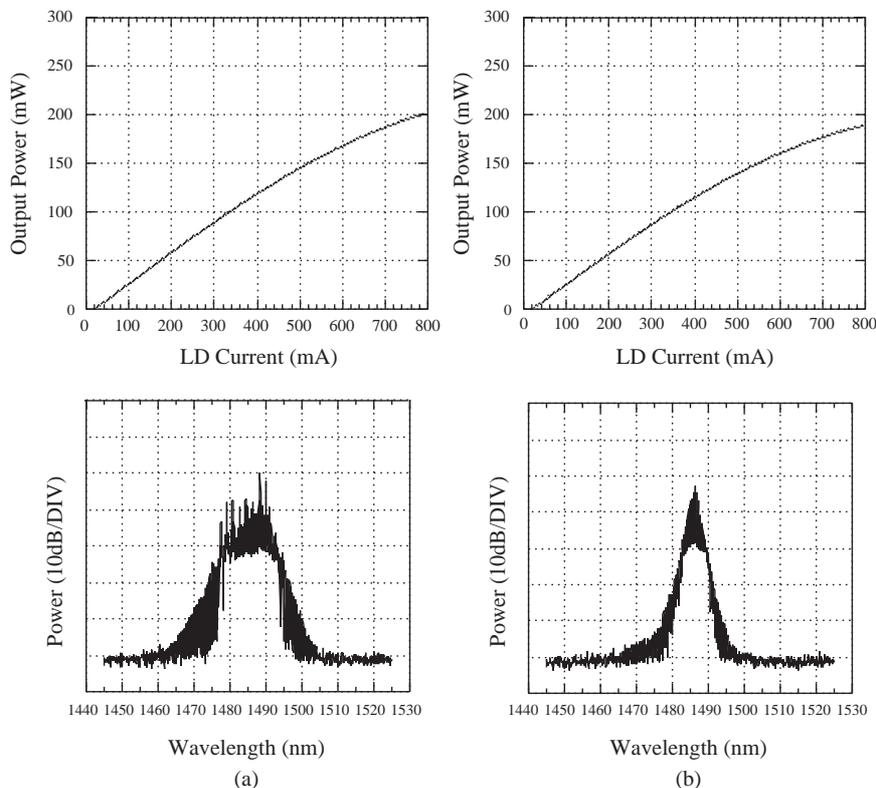


図 2 従来のレーザモジュールとの比較(出力特性, 出力スペクトラム)  
 (a) 従来のレーザモジュール (b) 波長安定化レーザモジュール  
 Comparison of IL characteristics and output spectrum  
 (a) Without FBG (b) With FBG

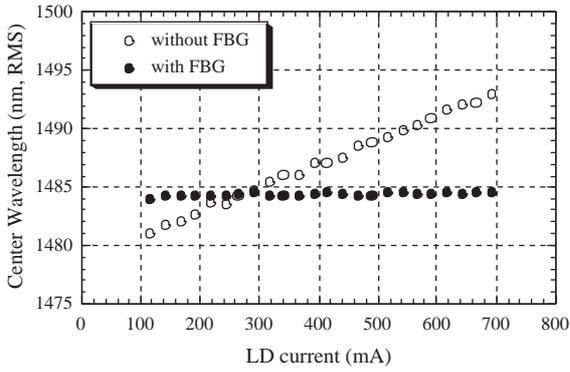


図3 中心波長の駆動電流依存性( 従来, 安定化モジュール)  
LD current dependence of the center wavelength

EDFに入射される励起強度は880mWである。EDFA出力端を斜め研磨のFCコネクタとし、EDFの中段にアイソレータを挿入することで多重反射による発振を防いでいる。出力光強度はカロリメータで測定した、また、出力を18dBカブラで分岐し、出力スペクトルを光スペクトルアナライザで同時に測定した。

高出力化のためにはEDFの最適設計も重要な要素技術である。今回1480nm励起での増幅効率が最大となるようにEDFを設計し、開口率(NA)0.23、コア径5.5 $\mu$ mのEDFを開発した。

このEDFにより1480nm励起シングルステージ構成のEDFAで励起光から信号光への量子変換効率として91%、パワー変換効率として86%が得られている。

このEDFを用いて出力光強度が最大になるようにEDF丈長の最適化を行った結果、前段EDFAのEDF長は93m、後段増幅器のEDF長は34mであった。図5にEDF端面に入射される励起強度に対するEDFAの出力特性と、出力スペクトルを示す。入力信号光波長は1560nm、強度は+7.2dBmである。出力スペクトルから全出力光強度に対する信号光強度の比を算出すると、0.99以上の高い値が得られた。これは非常に高い飽和状態で動作させていることによる。励起光強度の増加と信号光強度の増加は比例関係にあり、2.56Wの励起光強度で信号光出力強度1.5Wを実現した。EDF入出力端における励起光から信号光へのパワー変換効率は59%、スロープ効率は72%が得られた。シングルステージ構成における場合と比較して、開発したEDFAのパワー変換効率が減少している。これはEDFAの中間部に挿入した光部品の挿入損失によるところが大きく、また、効率が励起光の波長に依存するので、1465nm近傍の励起光の変換効率が1480nmの励起光に比較してやや低いことにも起因する。図6は信号光強度の波長依存性を示す。入力信号光強度は-3dBmとした。1560nmをピークとして少なくとも30nmの帯域で1W(30dBm)以上の信号光強度を示した。

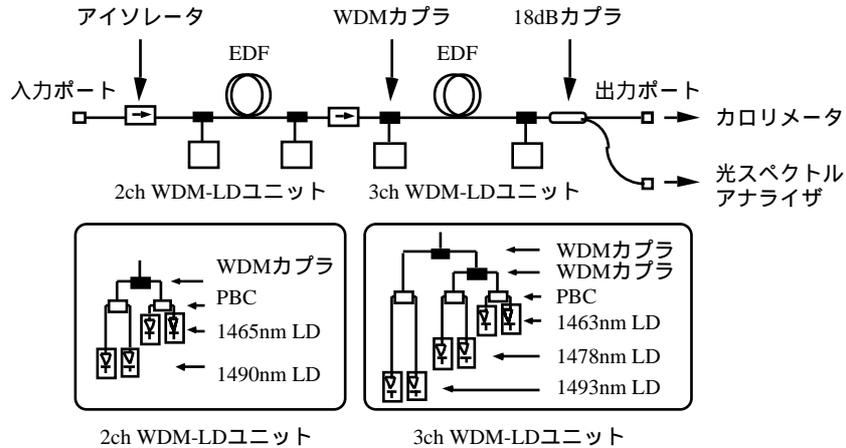


図4 高出力EDFの光学系構成  
Schematics of high power EDFA

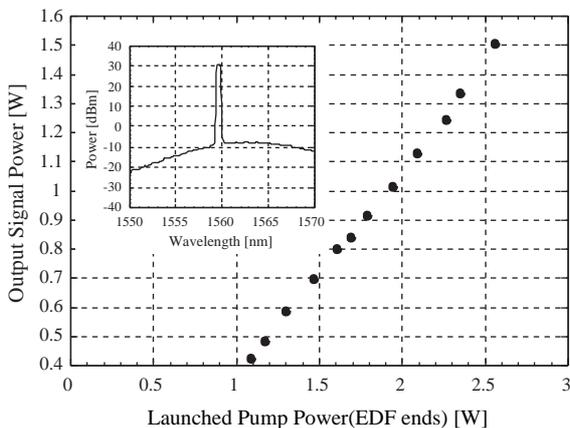


図5 高出力EDFの出力特性  
Output characteristics of high power EDFA

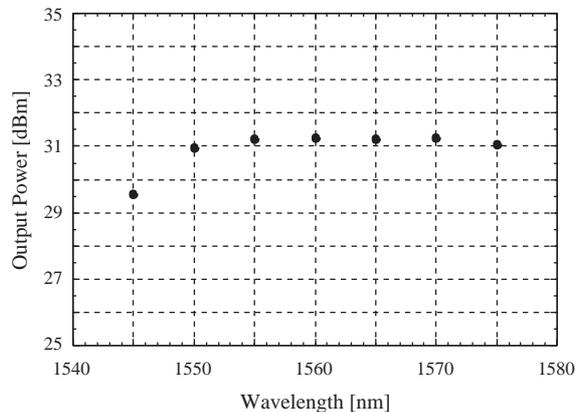


図6 高出力EDFの出力の波長依存性  
Wavelength dependence of the output power of high power EDFA

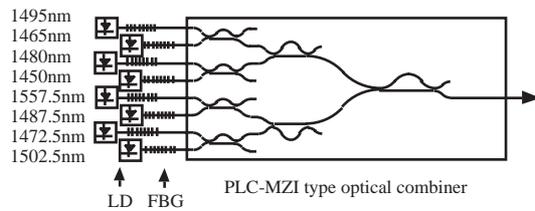


図 7 マッハツェンダー合成器の構成  
Schematics of PLC Mach-Zehnder type wavelength multiplexer

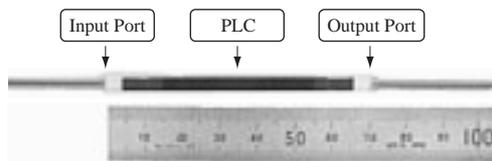


図 8 合成器の外観  
Appearance of wavelength multiplexer

#### 4. 今後の課題

今後数ワット級の高出力を1480nm励起EDFAで得るためには励起レーザの高出力化と励起光の波長合波技術が重要になる。

##### 4.1 励起レーザの高出力化について

EDFでの変換効率は理論限界値に近づき、これ以上改善することが難しい。したがって高出力化を目指すためにはより高出力を有するモジュールが必要とされる。現在、600mAの駆動電流で180mW程度までのファイバ出力が商用の波長安定化半導体レーザモジュールで得られている。今後は高出力化に伴い、LDモジュールの冷却効率や大電流駆動における信頼性保証などを検討する必要がある。

##### 4.2 励起光の合波技術について

筆者らはこれまで励起光の波長合波素子として、誘電体多層膜を用いたWDMカプラを用いてきた。しかし多層膜によるWDMカプラでは3波以上の合波時には2個以上のWDMカプラが必要となるため、励起光がEDFに入射されるまでの挿入損失が無視できなくなり、多重度を増すにつれて更に損失が増加する。また、EDFAの小型化を進めていくうえではファイバ接続を減らし、集積化を容易にする光学回路が望ましい。筆者らは合波損失を小さく保ち、励起光の多重度を増加させる新たな素子として、シリコン基板上に作成したPLC(Planner Lightwave Circuit)技術の応用に取り組んでいる。マッハツェンダー干渉回路により8波を波長合波する導波路型デバイスを試作した<sup>13)</sup>。

図7にデバイスの概要図を示す。波長安定化励起レーザを使用し、励起波長1450nmから1502.5nmまで7.5nm間隔で合波することを目的としている。TiO<sub>2</sub>ドープした導波路の比屈折率差は0.4%、形状は幅3.4mm、長さ74.0mm、高さ2.0mmである。図8に試作したマッハツェンダー型波長合波器の写真を示す。最小挿入損失は各ポート共に0.9dB以下が得られた。図9に透過波長スペクトルを示す。各ポートの透過波長帯域制限による実効的な励起強度の合波損失は1.2dB以下であった。

#### 5. おわりに

1480nm半導体レーザの波長多重励起技術を用いて1.5Wの高出力光ファイバ増幅器を開発した。この増幅器により30nm以上の波長帯域で1Wを越える出力が得られた。また、波長安

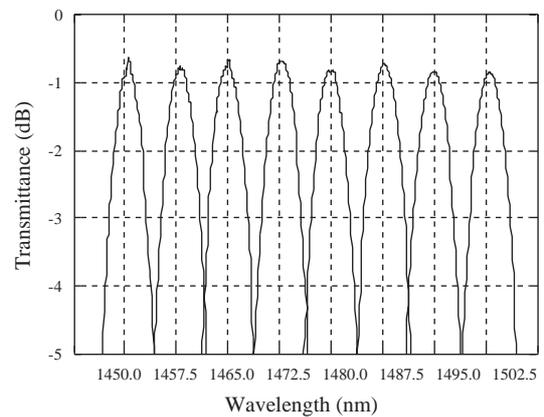


図 9 合成器の透過スペクトル  
Transmission spectrum of PLC-MZI multiplexer

定化1480nm励起レーザにより、波長多重数の増加と励起光の合波効率が改善されることを示した。今回、波長合波効率を高めるため、PLCによるマッハツェンダー干渉回路を試作した。今後はマッハツェンダーPLC回路による励起ユニットと高出力光ファイバ増幅器の開発を計画している。

本論文の執筆に際し、有益な助言をいただいた福島大氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) I.Oshima, A.Fujisaki, and H.Ogoshi: Proc. Suboptic'97, (1997), p.898
- 2) 荒木智宏, 田島幸昌, 久田安正: 電子情報通信学会技術報告, SAT96-7, (1996), p.43.
- 3) 山本貴司, 中沢正隆: 電子情報通信学会論文誌, J81-C-I, (1998), p.148.
- 4) Benjamin Li, Roos A. Parke, Gordeon S. Jackson, and Richard R. Craig: Proc. Optical Fiber Communication Conference (1997), FC3.
- 5) V.P.Gapontsev, S.M.Matitsin, A.A.Isyneeov, and V.B.Kravchenko: Optics and Laser Technol., August, (1982), p.189.
- 6) J.D.Minelly, W.L.Barnes, R.I.Laming, P.R.Mockel, J.E.Townsend, S.G.Grubb, and D.N.Payne: IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, (1993), p.301.
- 7) Y.Tashiro, H.Tachibana, A.Fujisaki and H.Ogoshi: Proc. Optical Fiber Communication Conference (1997), WA5.
- 8) 式井滋, 田村安昭: 電子情報通信学会春季大会, C-623, (1989), p.412.
- 9) S.G.Grubb, T.Strasser, W.Y.Cheung, W.A.Reed, V.Mizrahi, T.Erdogan, P.J.Lemaire, A.M.Vengsarkar, and D.J.DiGiovanni: Proc. Optical Amplifier and their Applications (1995), SaA4, p.197.
- 10) M.Fukushima, Y.Tashiro, and H.Ogoshi: Proc. Optical Amplifier and their Applications (1997), TuD3.
- 11) Y.Tashiro, S.Koyanagi, K.Aiso, S.Namiki: Proc. Optical Amplifier and their Applications (1998), WC2.
- 12) S.Koyanagi, A.Mugino, T.Aikiyo, and Y.Ikegami: Proc. Optical Amplifier and their Applications (1998), MC2.
- 13) K.Tanaka, K.Iwashita, Y.Tashiro, S.Namiki, and S.Ozawa: Proc. Optical Fiber Communication Conference (1999), TuH5.