

小型光ファイバンプの開発

Compact Optical Fiber Amplifiers

大島 勇*

Isamu Oshima

西山勝彦*

Katsuhiko Nishiyama

黒鳥克哉*

Katsuya Kurotori

早川弘一*

Hirokazu Hayakawa

概要 DWDMの導入と普及にあわせて、古河電工では利得等価技術を用いた各種WDM用光ファイバンプの開発を行っている。他方で、単一波長SDHシステム用途やDWDM用光受動部品の損失補償用として single channelあるいはsmall channel用の小型光ファイバンプのニーズも増えてきており、同軸型励起LDを使用した名刺サイズの小型光ファイバンプの開発を行ってきた。しかし近年小型光ファイバンプにおいてもより高出力、高利得のものが要求されるようになってきている。そこで今回、バタフライ型Pump LD及びUncooled pump LDを内蔵した単一波長/少数波長用の小型光ファイバンプを開発したので報告する。

1. はじめに

インターネットの普及に伴い、DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) システムの導入が進められてきているが、Er ドープ光ファイバンプ (EDFA: Er Doped Fiber Amplifier) の開発も同時に進められ、利得等価技術^{1), 2)} やLバンド帯 (1570～1605 nm) への増幅帯域の拡張^{3), 4)} などの技術開発がDWDMの実現・普及に大きく寄与してきた。また近年では伝送容量拡大のための波長の高密度化により、より高出力の光ファイバンプが要求されてきている。

他方では単一波長SDHシステム用途や、光MUX (Optical Multiplexer)・光DEMUX (Optical De-multiplexer)・光ADM (Optical Add / Drop multiplexer)・光スイッチ (Optical switch) などのDWDM用受動部品の損失補償を目的とした単一波長 (Single channel) / 少数波長 (Small channel) 増幅用の小型光ファイバンプのニーズもあり、同軸型励起LDを使用した名刺サイズの光ファイバンプの開発を行ってきた。今回、更に高出力・高利得である小型光ファイバンプとして、従来のバタフライ型Pump LD及びUncooled Pump LDを内蔵したEDFAの開発を行ったので報告する。

2. 小型光ファイバンプのラインアップ

通常の光ファイバンプは、使用される信号波長帯域に応じてCバンド (およそ1530～1560 nm) / Lバンド (およそ1570～1600 nm) 用光ファイバンプ、あるいは用途に応じてブースタンプ/インラインアンプ/プリアンプといった分類がなされている。

一方、小型光ファイバンプの場合は、出力や利得等の要求

値がさほど大きくないことや消費電力の低減を目的に、励起光源として温調素子 (ペルチェ素子) を内蔵しないレーザダイオードを使用する場合があります。通常の光ファイバンプと同様の分類のほかに、励起光源として使用されるLDが温調素子を内蔵しているか否かで分類することができる。(以降、本論文では温調素子を内蔵しない励起用レーザダイオードのことをUncooled pump LD、温調素子を内蔵するバタフライ型励起用レーザダイオードのことをCooled pump LDと称することにする。)

この分類は、小型光ファイバンプの機構設計や電気特性設計に影響を与えることから、今回、Uncooled pump LD用の小型ファイバンプ・プラットフォームとCooled pump LD用の小型ファイバンプ・プラットフォームの開発を行った。ただし外形は90×70×12 mm (Uncooledタイプは10.5 mmも対応可) として共通とした。

また、Cooled pumpタイプの小型光ファイバンプの場合、Lバンド増幅用途などのために励起LDを1480 nm帯とした場合には、駆動電流が大きくなるためにLD自体及びペルチェ素子の発熱量が大きくなり、使用環境温度の制限要因となるため、放熱効果を考慮する必要が生じる。そこでヒートシンクを付加したCooled pump LD用の小型ファイバンプ・プラットフォームの開発も行った。

表1に今回開発した小型光アンプのラインアップをまとめる。

3項以下で、表1の分類に従った各光ファイバンプの特性紹介を行う。

3. Uncooled pump タイプ小型光ファイバンプ

Uncooled pump LDを使用した小型光ファイバンプの光学構成を図1に示す。90×70×12 mmという小型のパッケージに、励起用LD、PD (Photo Diode) や光カプラ、光アイソレ

* ファイテル製品事業部 光サブシステム部

表1 小型光ファイバアンプのラインアップ（プラットフォーム別）

Lineup of compact optical fiber amplifier

分類1 (励起光源)	分類2 (信号光波長)	備考
Uncooled pump	主にCバンド ブースタ／プリ	(W)90×(D)70×(H)12 mm 低消費電力 980 nm励起
Cooled pump	主にCバンド ブースタ／プリ	(W)90×(D)70×(H)12 mm (比較的) 高出力対応 主に980 nm励起
Cooled pump (with heat sink)	主にLバンド ブースタ／プリ	(W)90×(D)70×(H)25 mm 高出力対応 主に1480 nm励起

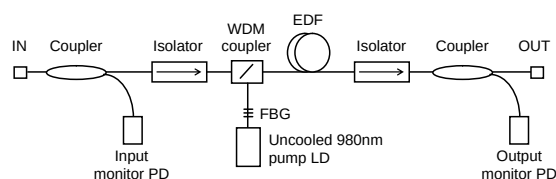


図1 Uncooled pump タイプ小型光ファイバアンプの光学構成
Optical configuration of amplifier with uncooled pump LD

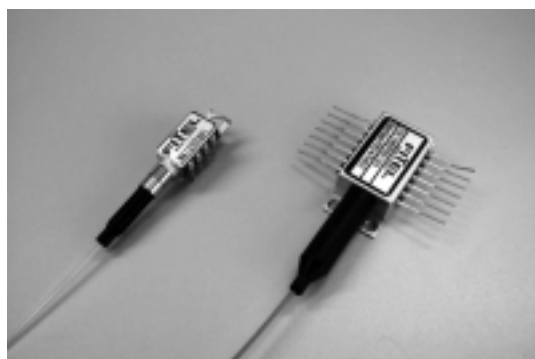


図2 Uncooled (左) 及びCooled (右) pump LDの外観図
Appearance of uncooled pump LD (L) and cooled pump LD (R)

ータ等の光部品が収容されており，入・出力モニタ機能も有している。

EDFの励起光源としてペルチェ素子を内蔵しない980 nm発振のレーザダイオード（Uncooled pump LD）を使用している。図2にUncooled pump LDの外観図を示す。（併せてCooled pump LDの外観も示している。）

このLDは温調素子を持っていないため，環境温度の変化に対して発振波長も変動してしまう。EDFの980 nm近傍の吸収スペクトルはさほど広くないため，励起波長の変動は著しい励起効率の変動・低下を招く。そのためFBG（ファイバブラッググレーティング）を出力ファイバ中におくことによって外部共振器を構成し，波長の安定化を図っている。図3にUncooled pump LD（with FBG）の発振波長の温度依存性を示す。環境温度の変動によってレーザダイオード自身の発振波長は変動しているが，FBGの作用によって環境温度0～65℃の

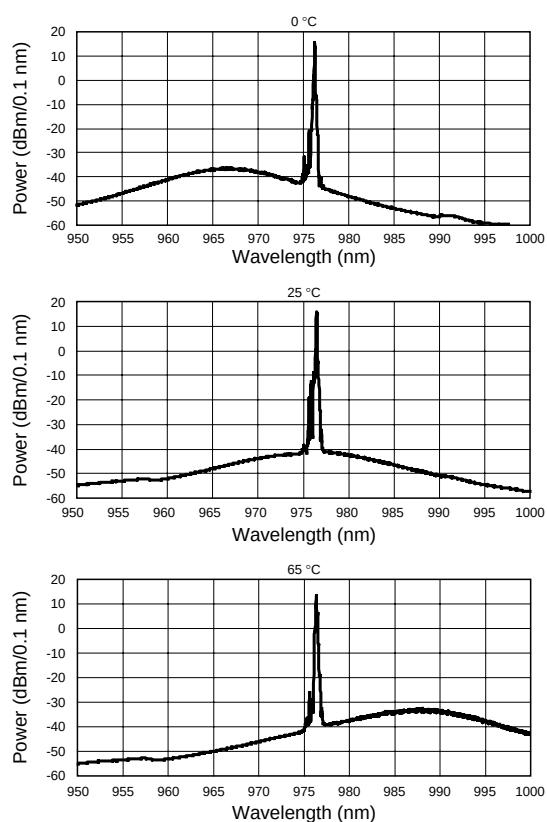


図3 Uncooled pump LDの発振波長の温度依存性
Temperature dependence of output wavelength of uncooled pump LD with FBG

範囲で波長の安定化が実現されている。これにより，環境温度の変動に対して安定した光ファイバアンプの出力を得ている。

またペルチェ素子を制御する必要がないことから，消費電力の低減にも寄与している。

図4に，出力が80 mWクラスのUncooled pump LDを使用した光ファイバアンプの特性を示す。この光ファイバアンプはブースタアンプとして出力が+11 dBm以上となるように設計されている。図4は，入力信号光が-10 dBmのとき，信号光出力を+11 dBmとなるようにUncooled pump LDの出力を調整し，そのときの所用励起パワーとNF（Noise Figure，雑音指数）を示している。

環境温度0～65℃において，信号波長1530～1566 nmの広い範囲で出力+11 dBmが得られ，NFも5.5 dB以下と良好な特性が得られている。LD電流は200 mA以下となっており，放熱上の問題がないことも確認されている。

これらの特性を表2にまとめる。

また図5にプリアンプとして利得22 dB以上が得られるように設計された小型光ファイバアンプの特性を示す。入力信号光-25 dBmで利得が22 dBとなるようにUncooled pump LDの出力を調整したときのNFを示している。信号波長範囲1529～1563 nmの範囲でNFは5.7 dB以下と良好な特性を示している。これらの特性を表3にまとめる。

図6にUncooled pump LD内蔵小型光ファイバアンプの外観図を示す。

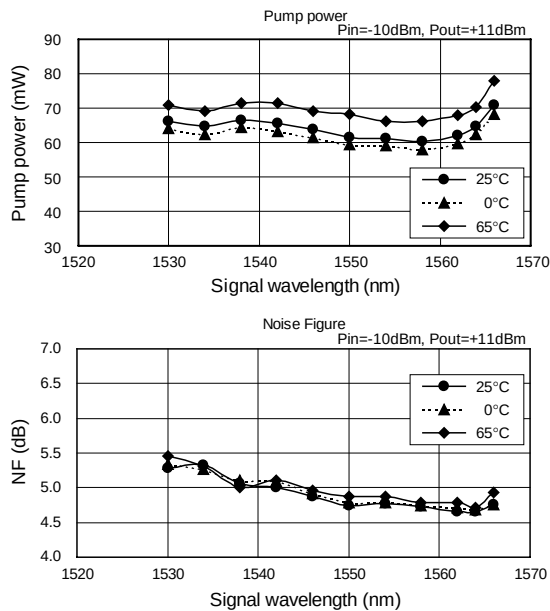


図4 Uncooled pump LDを用いた小型光ファイバアンプの特性1
Characteristics of compact optical fiber amplifier with uncooled pump LD (1)

表2 Uncooled pump LD内蔵小型光ファイバアンプ特性のまとめ（ブースタアンプ）
Summary of compact optical fiber amplifier with uncooled pump LD (As a booster amplifier)

項目	特性
使用環境温度	0～65℃
信号波長範囲	1530～1566 nm
入力光パワー	－10 dBm以上
出力光パワー	＋11 dBm以上
NF (@ $P_{in} = -10$ dBm)	5.5 dB以下

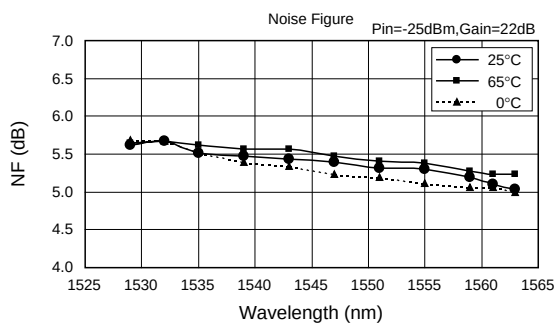


図5 Uncooled pump LDを用いた小型光ファイバアンプの特性2
Characteristics of compact optical fiber amplifier with uncooled pump LD (2)

4. Cooled pumpタイプ小型光ファイバアンプ

3項で紹介した小型光ファイバアンプの励起光源を従来のパタフライ型 Pump LD に置き換えた構成となるのが Cooled pump タイプ小型光ファイバアンプである。構成を図7に示す。

表3 Uncooled pump LD内蔵小型光ファイバアンプ特性のまとめ（プリアンプ）
Summary of compact optical fiber amplifier with uncooled pump LD (As a preamplifier)

項目	特性
使用環境温度	0～65℃
信号波長範囲	1529～1563 nm
入力光パワー	－40～－20 dBm
利得	22 dB以上
NF (@ $P_{in} = 25$ dBm)	5.7 dB以下



図6 Uncooled pump LD内蔵小型光ファイバアンプの外観図
Appearance of compact optical fiber amplifier with uncooled pump LD

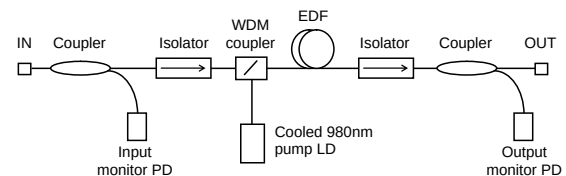


図7 Cooled pump タイプ小型光ファイバアンプの光学構成
Optical configuration of amplifier with cooled pump LD

Uncooled pump LD よりも外形が大きな Cooled pump LD を、同サイズのパッケージに収容している。Uncooled pump タイプ小型光ファイバアンプと同様に入・出力モニタ機能も有している。

このアンプの特徴は、Cooled pump LD を使用することにより、より大きな励起パワーを得ることができるために、小型でありながら比較的高出力・高利得を実現することができる、ということである。

図8にブースタアンプ用途で開発した Cooled pump タイプ小型光ファイバアンプの特性を示す。

入力信号光が－10 dBm のとき、信号光出力を＋15 dBm となるように Cooled pump LD の出力を調整し、そのときの励起パワーと NF を示している。

環境温度－5～65℃において、信号波長 1530～1561 nm の広い範囲で＋15 dBm という高出力が得られ、NF も 5.0 dB 以下と良好な特性が得られている。また LD 電流値は 250 mA 以下となっており、放熱上問題がないことも確認されている。

これらの特性を表4にまとめる。

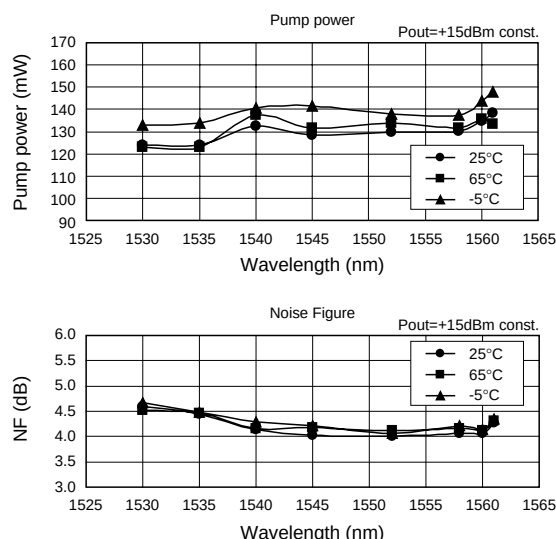


図8 Cooled pump LDを用いた小型光ファイバアンプの特性
Characteristics of compact optical fiber amplifier with cooled pump LD

表4 Cooled pump LD内蔵小型光ファイバアンプ特性のまとめ（ブースタアンプ）
Summary of compact optical fiber amplifier with cooled pump LD (As a booster amplifier)

項目	特性
使用環境温度	-5~65°C
信号波長範囲	1530~1561 nm
入力光パワー	-10 dBm以上
出力光パワー	+15 dBm以上
NF (@ $P_{in} = -10$ dBm)	5.0 dB以下

5. ヒートシンク付き小型光ファイバアンプ

小型アンプで更なる高出力，あるいはLバンド帯用の高出力光ファイバアンプの開発を目的として，励起光源として1480 nm帯のLDを使用する小型光ファイバアンプを開発した。1480 nm LDの場合には駆動電流が大きくなる傾向にあり，放熱の観点からは小型化には不利である。そこでヒートシンク付きの小型光ファイバアンプを開発した。ヒートシンクの形状は，熱シミュレーションを行い，最適設計がなされている。

外観図を図9に示す。外形は90×70×25 mmとなる。

このプラットフォームを用いて開発したLバンド帯用小型光ファイバアンプの光学構成を図10に示す⁵⁾。単純な前方向励起の構成ではなく，EDFを約1：9の比に分けるようにEDF中にアイソレータを挿入している（以降，本稿ではミドルアイソレータと称する。）

単純な前方向励起の場合，EDF内で発生するバックワードASE（自然放出光）がEDFの入力端付近で増幅され励起光を消費してしまうために，十分な信号光の増幅を得ることができないばかりでなく，EDFの入力端付近で十分な反転分布が得られないためにNFの劣化をも招く。そこでこのバックワードASEをカットする目的でEDFの途中にアイソレータを挿入している。ミドルアイソレータの挿入位置は，出力とNFのバラ

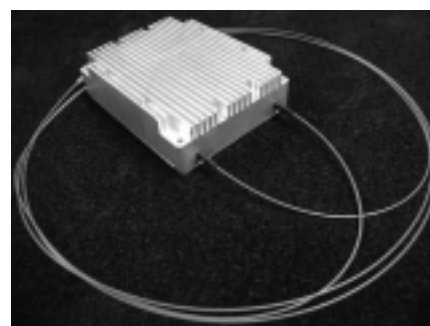


図9 ヒートシンク付き小型光ファイバアンプの外観図
Appearance of compact optical fiber amplifier with heat sink

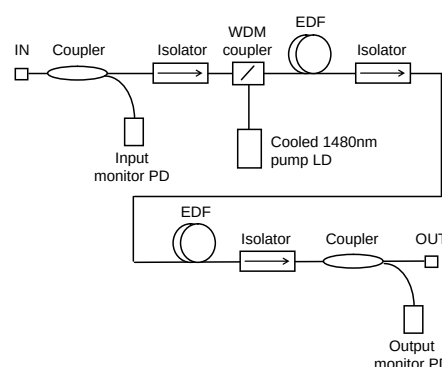


図10 Lバンド用小型光ファイバアンプの光学構成
Optical configuration of amplifier for L-band

表5 細径EDFの諸元
Parameters and characteristics of reduced cladding EDF

MFD	5.21 μm
ファイバ径	80 $\pm$ 2 μm
被覆径	167 $\pm$ 5 μm
カットオフ波長	867 nm
Er濃度	1446 wt ppm
Al濃度	3.3 wt%

ンスを考慮して設計されている。

またこのミドルアイソレータは1550 nm帯（Cバンド）で挿入損失が極小となるように設計されたものを使用しており，Lバンドの信号光，1480 nm帯の励起光に対しても0.2~0.3 dB程度の挿入損失の増加で透過可能となっている。このためあえてWDMカプラをミドルアイソレータの両側に設置するような構成を採っていない。

更にミドルアイソレータ構成を採ることにより，すべての励起パワーをEDFの入力端から入射させるために，EDFの入力端付近の反転分布を高くすることができ，NFの劣化を回避することができる。

またLバンド用光ファイバアンプの場合，Lバンドの利得係数が小さいことから十分な利得を得るためにはEDF長を長くする必要があるために，小型パッケージへの収納が困難になる。そこでファイバの外径を細くした細径EDFを使用している。表5に細径EDFの諸元を示す。通常の光ファイバの外径が250

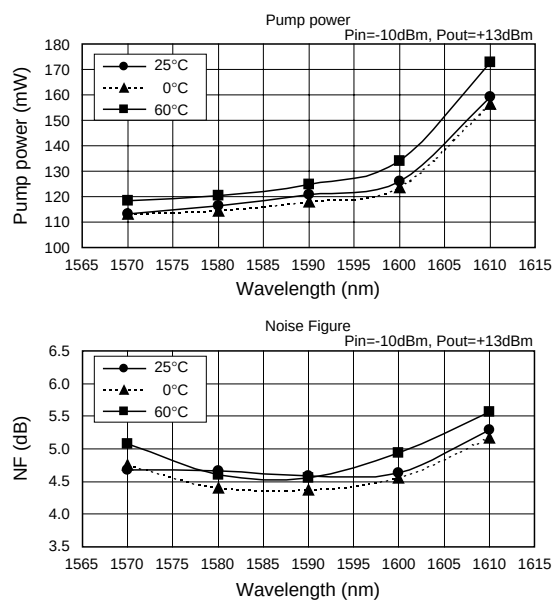


図11 Lバンド小型光ファイバアンプの特性
Characteristics of compact optical fiber amplifier for L-band

表6 Lバンド小型光ファイバアンプ特性のまとめ
Summary of compact optical fiber amplifier for L-band

項 目	特 性
使用環境温度	0～60℃
信号波長範囲	1570～1610 nm
入力光パワー	-10 dBm以上
出力光パワー	+13 dBm以上
NF (@P _{in} = -10 dBm)	5.7 dB以下

μmであるので、EDFを細径化することにより、EDFの占有体積を50%以下に削減でき、小型パッケージへの収納を可能とした。なお、EDF長は約60 mであった。更に高利得を必要とする場合には、Erの高濃度化⁶⁾によるEDFの短尺化を行う方法もある。

図11にLバンド用光ファイバアンプの特性を示す。入力信号光が-10 dBmのとき、信号光出力を+13 dBmとなるようにCooled pump LDの出力を調整し、そのときの励起パワーとNFを示している。信号光波長1570～1610 nmという広い範囲で出力+13 dBmを実現している。またNFに関しても、5.7 dB以下と良好な結果が得られた。

また環境温度0～60℃、風量約0.7 m/sの条件下で、LD駆動電流を700 mAまで流してもLD温度は制御されていることを確認した。このときのペルチェ電流値は約1.2 Aであった。

これらの特性を表6にまとめる。

6. おわりに

単一波長／あるいは少数波長用の小型光ファイバアンプ・プラットフォームとして、

- (1) Uncooled pump LDを使用した小型光ファイバアンプ
- (2) バタフライ型pump LDを使用した小型光ファイバアンプ
- (3) LDの放熱性を向上させたヒートシンク付き小型光ファイバアンプ

の開発を行い、それらを用いた光ファイバアンプの光学特性を報告した。

今後、これらのプラットフォームを使用し、光学構成等を最適化することにより、様々な単一波長／あるいは少数波長用の小型光ファイバアンプの要求に対応できる。

参考文献

- 1) P.F.Wysocki et al., OFC'97, PD-2, 1997
- 2) 橘他, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-43, p.143, 2002
- 3) M. Yamada et al., Electron. Lett., Vol.33, No.8, p.710-711, 1997
- 4) M. Fukushima et al., OFC'97, PD-3, 1997
- 5) 西山他, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-53, p.341, 2002
- 6) 相曽他, 電子情報通信学会総大会, C-3-147, p.312, 2001