

# 7コアマルチコアEDFを用いた一括励起型増幅器

## Cladding Pumped Fiber Amplifier Using Seven-Core EDF

前田 幸一<sup>\*1</sup>  
Koichi Maeda

高坂 繁弘<sup>\*1</sup>  
Shigehiro Takasaka

杉崎 隆一<sup>\*1</sup>  
Ryuichi Sugizaki

土田 幸寛<sup>\*2</sup>  
Yukihiro Tsuchida

渡辺 健吾<sup>\*2</sup>  
Kengo Watanabe

斎藤 恒聡<sup>\*3</sup>  
Tsunetoshi Saito

### 〈概要〉

一括励起用に吸収係数を増大させたマルチコアEDFを開発した。開発したファイバを用いて一括励起型増幅器を作製し、Cバンドにて利得18 dB、雑音指数6.1 dB、コア間クロストーク-44 dBを実現した。

### 1. はじめに

モバイルネットワーク活用機会の増大やIoT関連のサービスの開始など、インターネットトラフィックの増大はいまだに加速の一途をたどっている。通信速度自体の高速化や多重化など、通信容量増大のための取り組みが進められており、新たな多重軸である空間多重伝送技術も実用化に向けて研究開発が加速されている。空間多重の最大の話は光ファイバのマルチコア化とモード多重技術の活用である。通常の光ファイバでは中心部に配置されたコアに信号を伝搬させるのに対して、1本のファイバ内に複数のコアを配置させ物理的に伝送容量を拡大させたものがマルチコアファイバであり、1つのコア内に伝搬するモード数を増大させ、それぞれを独立に取り扱うことを可能とした技術がモード多重技術である。近年、マルチコアファイバおよびモード多重技術を用いた超大容量伝送実験などたくさんの研究成果が報告され始めており、空間多重伝送も実用化に向かい始めている。

空間多重技術の発展によるファイバケーブル内で使用しているコアの心数増大に伴い、中継装置の負荷増大回避も必要とされてくる。中継装置のうちもっとも一般的なものは増幅器であると言える。これまでの多重化は1本のファイバの周波数軸、時間軸での多重化を行ってきたため増幅器の台数を増加させる必要はなかったが、マルチコア化によりコア1つあたりに1つの増幅器が必要となってくる。このため、伝送路ケーブルと同様、増幅器内部も空間多重させることの必要性も高まってきている。つまり増幅器で使用されているエルビウム添加光ファイバ(EDF; Erbium Doped Fiber)もマルチコア化するとともに周辺装置も含めた集積化を行うことにより、中継局内の設備占有エリアの増大を防止することが重要である。さらには、コア

数の増大に伴う消費電力の増大抑制も重要な課題である。

本報告では通信容量の拡大要求に呼応したマルチコアエルビウム添加ファイバ増幅器(MC-EDFA; Multicore Erbium Doped Fiber Amplifier)による増幅器の小型化技術と消費電力低減の取り組みについて紹介する。

### 2. 空間多重増幅器の構成とその要素技術

空間多重増幅器の基本構成に関して図1にまとめる。増幅媒体としてはEDFを用いるが、そのEDFの励起方法によりEDFAはコア励起型とクラッド励起型に二分される。コア励起型では、1つのコアに対して1つの励起光が必要となるため、装置の大きさの観点で通常のEDFAを複数並べる場合と大きな差はないものと考えられる。コア励起型をさらに細分すると、装置内に複数のEDFAを配置した分割型空間多重増幅器と増幅媒体としてMC-EDFを用いた個別励起型MC-EDFAに分けられる。集積度の上では個別励起型MC-EDFAのほうが魅力的ではあるものの、消費電力を考えると大きなブレイクスルーとは言い難い。これに対して、クラッド励起EDFAは一つのアンクルドマルチモードレーザーダイオード(MM-LD)にてMC-EDF内のすべてのコアを伝搬する信号を増幅できるため、装置サイズの小型化と低消費電力の観点で魅力的である。コア励起型とクラッド励起型で用いられるEDFの最大の相違点としては、クラッド励起型ではダブルクラッド型構造を持たせることである。信号光はコア、励起光は内側クラッドを伝搬させ、その外周の外側クラッドの屈折率を下げることにより内側クラッドの励起光のファイバ内への閉じ込めを実現している。

\*1 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

\*2 研究開発本部 コア技術融合研究所

\*3 ファイバケーブル事業部門 技術部

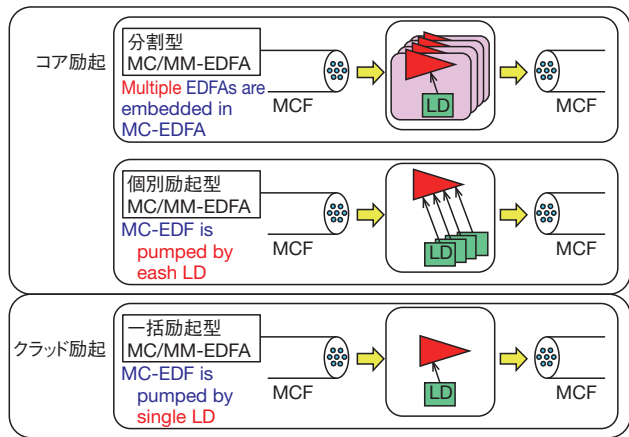
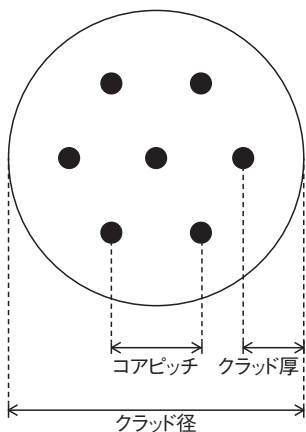
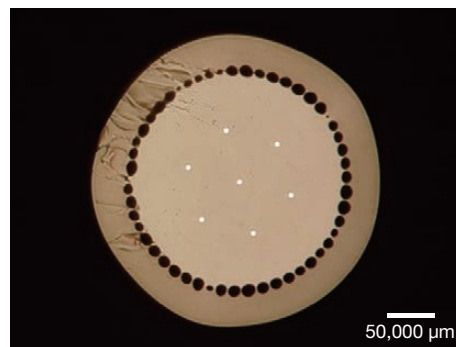


図1 マルチコアEDFAの構成  
Configuration of multicore EDFA.

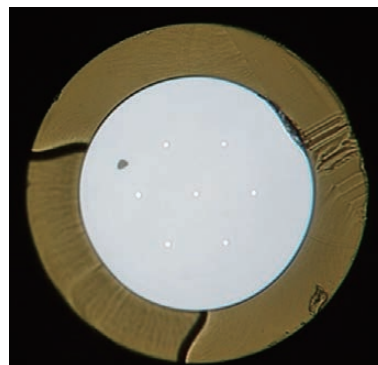
ダブルクラッド型MC-EDFとして2種の構造が提案されている。1つはエアクラッド型で他方はポリマクラッド型である。それぞれを図2に示す。図2で示すMC-EDFはすべて7コアタイプのものである。(a)にはその基本構成を示した。(b)に示すエアクラッド型は、外周に密に空孔を配置することにより、空気(屈折率約1.0)で石英ガラス(屈折率1.44)内に励起光を閉じ込めている。この構造は大きな屈折率差を実現しやすく、効率良い励起光の伝搬が可能である反面、励起光をMC-EDF内へと導光することが難しく、さらに、空孔径を均一に保つことが難しいためファイバの構造が不安定になりやすい。このことは信号光をMC-EDFに結合させることにもデメリットとなる。一方、(c)に示すポリマクラッド型は通常の光ファイバと製法が比較的近く、ポリマ被覆を除去することにより比較的簡単に励起光を導入することができるため使い勝手という点で優れている。さらに安定した構造のファイバが作製しやすく、信号光との結合損失の低減もしやすい。このことから、本報告ではポリマクラッド型のMC-EDFを用いた検討のみを紹介する。表1に、(c)に示したポリマクラッド型のMC-EDFのパラメータを示す。



(a) MC-EDFの構造  
Structure of MC-EDF.



(b) エアクラッド型MC-EDF  
Air-cladding type MC-EDF.



(c) ポリマクラッド型MC-EDF  
Polymer cladding type MC-EDF.

図2 各種ダブルクラッドMC-EDF  
Several types of MC-EDF.

表1 ポリマクラッド型MC-EDFの構造パラメータ  
Structural parameters of polymer cladding type MC-EDF.

	単位	従来型MC-EDF
コア数	個	7
MFD	μm	6.2
コアピッチ	μm	45.0
内部クラッド径	μm	180
外部クラッド径	μm	220
外部クラッド材料	—	UV硬化樹脂
外部クラッド屈折率	—	1.40

### 3. クラッド励起型マルチコアEDFA

2章で紹介したMC-EDFを用いて構成したクラッド励起型MC-EDFAを紹介する。図3にクラッド励起7コアEDFAの構成を示す。7つの入出力部に対して、それぞれ個別のアイソレータが接続されている。アイソレータと7コアMCFはファイババンドル型ファンアウト(FBF; Fiber Bundle type Fan-out)を介して接続されている。MM-LDによる励起光は側方結合型のポンプコンバイナにより7コアMC-EDFに入力されている。クラッドに入力された励起光はMC-EDFの反対端にてポンプストリップにより除去されている。この構成において108 mのMC-EDFを使用したLバンド増幅器の出力パワー特性を図4に

示す。すべてのコアで出力パワーは20 dBmを超えており中継増幅器として使用可能であることを示している<sup>2)</sup>。

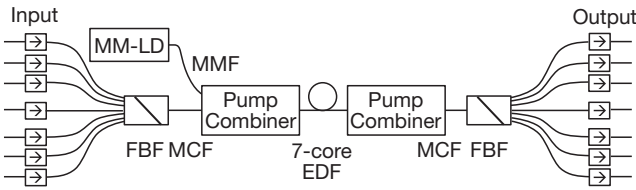


図3 クラッド励起型7コアMC-EDFAの構成  
Configuration of cladding pumped 7-core MC-EDFA.

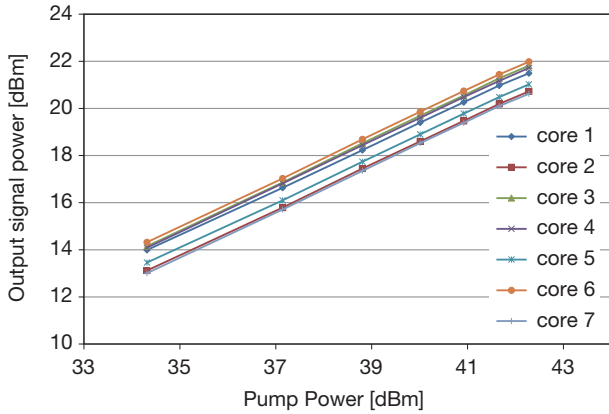


図4 Lバンド用MC-EDFAの出力パワー特性 (入力光強度7.5 dBm)  
Output power of MC-EDFA for L-band (Input power 7.5 dBm).

#### 4. クラッド吸収を増大させた7コアMC-EDF

3章で初期のクラッド励起型MC-EDFAを紹介した。WDMの伝送を前提とした現在のシステムにおいて上記出力光パワーでは不十分であった。実用的なEDFAとしての報告として+20 dBm以上の出力を持つEDFAも報告されているものの、増幅帯域はLバンドに限られており、Cバンドでの一括増幅での出力パワーは+10 dBm弱にとどまっていた<sup>1)</sup>。一方、コアにEr-Ybを共添加したマルチコアEYDFを用いた場合は、励起光変換効率が高いためCバンドでの使用でも大きな出力が得られることが知られている<sup>3)</sup>が、Er-Yb共添加ファイバは帯域が狭く、Cバンド帯全域に配置されたWDM信号を増幅するためには適切ではないと考えている。我々はErイオンの励起効率を高めることによりクラッド励起EDFAの出力パワーは増大可能であると考え、2つのアプローチを行った。一つめのアプローチはMC-EDFのコア径を従来よりも拡大させることである。ファイバ内を伝搬する信号光のフィールドとコアサイズのオーバーラップ係数を増大させることにより吸収特性の向上を図った。もう一つのアプローチはクラッド径の縮小である。これは同一のパワーがクラッド内に入射された際のパワー密度を増大させる効果を持つ。図5に吸収効率を増大させたMC-EDFの端面写真を示す。クラッド径とコアピッチはそれぞれ135 μmと38.5 μmに設定した。コア径は従来のMC-EDF<sup>1), 2)</sup>と比較し

て1.8倍に拡大している。クラッド径は従来構造の180 μmに対して断面積にして1/2になっている。このことは励起光密度が2倍に増大していることを示している。このファイバには低屈折率UV被覆を施し励起光を閉じ込めることによりダブルクラッド構造を実現するとともに、ガラスの保護を行っている。図6に従来ファイバとの吸収スペクトルの比較結果を示す。吸収係数はそれぞれ6 dB/mと11 dB/mである。コアのEr添加濃度としては両者とも同様であるが、コア拡大とクラッド径縮小の効果により5 dBの吸収係数の増大を実現している。

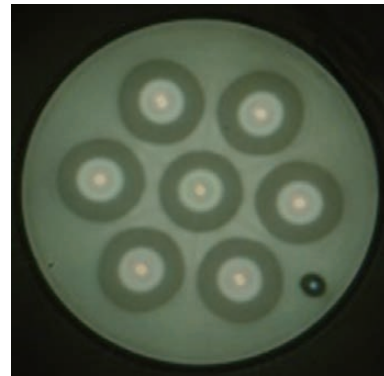


図5 吸収効率を増大させたMC-EDF  
MC-EDF with enhanced absorption coefficient.

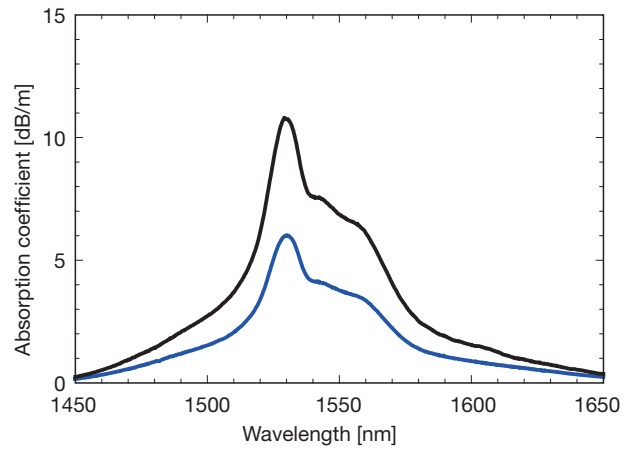


図6 従来型MC-EDF (青色)と吸収係数増大MC-EDF (黒色)の吸収特性  
Comparison of absorption coefficient for conventional MC-EDF (blue) and absorption enhanced MC-EDF (black).

作製したMC-EDFを用いて作製した一括励起増幅器を図7に示す。(a)は光学部品を収納したハウジングであり、サイズは400×300×38 mmである。さらに、周辺部品を収納するとともに19インチラック搭載を可能にした増幅器を(b)に示す。以下に(b)に示した増幅器のLバンド、Cバンドでの利得特性をそれぞれ紹介する。



(a) 光学部品ハウジング外観  
Housing for optical components.



(b) MC-EDFA 全体の外観  
Appearance of MC-EDFA.

図7 クラッド吸収増大型MC-EDFを使用したMC-EDFAの構成  
Configuration of MC-EDFA with absorption enhanced MC-EDF.

4.1 Lバンド増幅特性

Lバンドにて最適な特性を得るために、増幅器内のMC-EDFの長さを50 mに設定し、Lバンドでの増幅特性を測定した。図8に得られた利得特性と雑音指数(NF; Noise Figure)を示す。入力信号には1570 nmから1610 nmの領域の33 ch WDM信号を使用した。入力信号光パワーは各コア合計7.5 dBmとし、励起光パワーは42.3 dBmとした。各コアにて得られた最小利得、最大雑音指数はそれぞれ13.1 dB, 5.8 dBであった。各コア内での利得偏差は最大3.5 dBであり、コア間の利得と雑音指数の偏差はそれぞれ1.4 dBと0.6 dBであった。各コアでの総出力パワーはすべてのコアにおいて22.1 dBmを超えている。

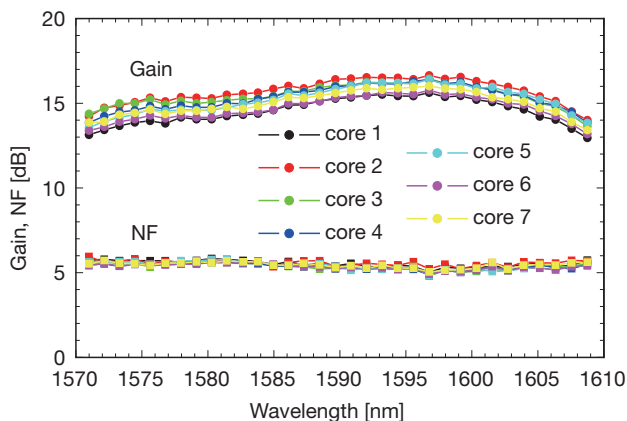


図8 Lバンド用MC-EDFAの増幅特性  
Amplification characteristics of MC-EDFA for L-band.

コア間クロストークは、1 nm離れた2つの信号光をそれぞれ異なるコアに入力し、励起光を入力した際他コアからの漏れ信号を観測した。入力した信号光と励起光の強度はそれぞれ0 dBmと40 dBmである。Lバンド用MC-EDFAのコア間クロストーク特性を図9に示す。コア間クロストークは-53 dBであり、そのばらつきは4.3 dBであった。

4.2 Cバンド増幅特性

Cバンドにて最適な特性を得るために、増幅器内のMC-EDFの長さを8 mに設定し、Cバンドでの増幅特性を測定した。

利得と雑音指数を図10に示す。各コアに合計-5.0 dBmの8chのWDM信号を入力し、この際の励起光パワーは42.3 dBmとした。各コアにおける最小利得と最大雑音指数はそれぞれ18.0 dBと6.1 dBであった。図10によると平坦な利得が観測されており、利得偏差は全コア内において3.3 dB程度であった。コア間での利得と雑音指数のばらつきはそれぞれ0.9 dBと0.6 dB以下に抑えられている。

図11に出力パワーの入力信号強度依存性を示す。この測定において励起光パワーは39.9 dBmに固定するとともに、入力信号は8 chのWDM信号とした。図11によると、各コアで15 dBm以上の出力パワーが得られており、合計入力パワーが5 dB増大するに伴い、出力は0.8 dB増大している。この結果によると、Cバンド用のMC-EDFAにおいて、出力が飽和領域に達する入力信号光パワーは13 dBmより大きいことが示されており、さらなる高出力も得られる可能性が示されている。コア間出力偏差は0.8 dB以下であった。

図12にCバンド用7コアEDFAのコア間クロストーク特性を示す。得られた平均クロストークとその偏差はそれぞれ-44 dBおよび10 dBであった。

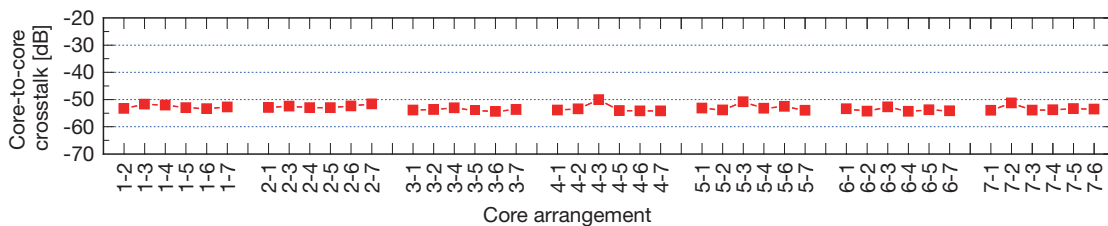


図9 LバンドMC-EDFAのコア間クロストーク特性  
Core-to-core crosstalk of L-band 7-core EDFA.

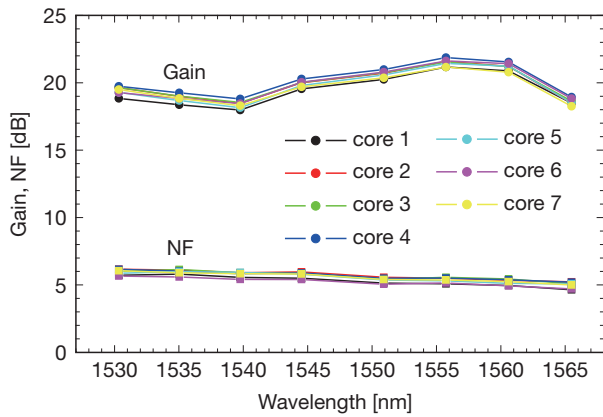


図10 Cバンド用MC-EDFAの増幅特性  
Amplification characteristics of MC-EDFA for C-band.

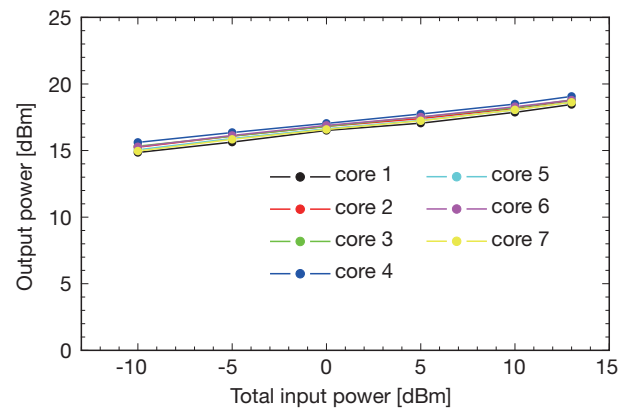


図11 Cバンド用MC-EDFAの出力パワー  
Output power of MC-EDFA for C-band.

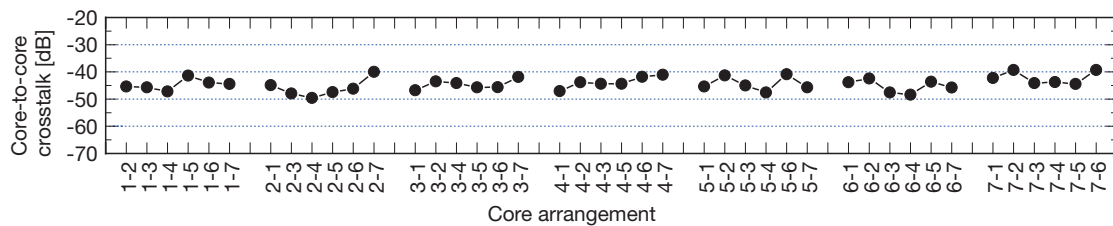


図12 Cバンド用MC-EDFAのコア間クロストーク特性  
Core-to-core crosstalk of C-band 7-core EDFA.

## 5. まとめ

MC-EDFを用いた一括励起増幅器についてその特性を紹介した。

出力パワーの増大のためには、MC-EDFのコア径拡大とクラッド径縮小が効果的であることを示し、1530 nmにおける吸収係数を11 dB/mまで増大させることに成功した。作製した50 mのMC-EDFを用いて、Lバンドでの特性を確認し、合計入力パワー7.5 dBmの33chのWDM信号を用いた場合に利得13.1 dB、雑音指数5.8 dB、合計の出力パワー22.1 dBmを達成した。このときのコア間の利得、雑音指数の偏差はそれぞれ1.4 dB、0.6 dB、コア間クロストークは-53 dBであった。さらに、Cバンド用に8 mのMC-EDFを使用してMC-EDFAを構成し、合計入力パワー-5.0 dBmの8ch WDM信号を入力した場合のCバンド特性として利得18 dB、雑音指数6.1 dB、8ch合計での出力パワー15 dBmを得た。

## 謝辞

本研究の遂行にあたりご協力をいただいた株式会社KDDI総合研究所釣谷剛宏様、竹島公貴様、川口優様に感謝いたします。本研究は、独立行政法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究／革新的光通信インフラに関する研究開発の一環としてなされたものです。

## 参考文献

- 1) S. Takasaka *et al.*, "Cladding-Pumped Seven-Core EDFA Using a Multimode Pump Light Coupler," ECOC2013, We.4.A.5 (2013).
- 2) K. Takeshima *et al.*, "51.1-Tbit/s MCF Transmission Over 2520 km Using Cladding-Pumped Seven-Core EDFAs," JLT, vol.34, no. 2, pp. 761-767 (2016).
- 3) H. Ono *et al.*, "12-Core Double-Clad Er/Yb-Doped Fiber Amplifier Employing Free-space Coupling Pump/Signal Combiner Module," ECOC2013, We.4.A.4 (2013).