

空間多重伝送用マルチコアエルビウム添加ファイバ

公立大学法人大阪府立大学 山田 誠¹
日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所 小野 浩孝²
光電子技術研究所 市井 健太郎³・細川 幸³・竹永 勝宏³
松尾 昌一郎⁴

Multi-Core Erbium-Doped Fiber for Space-Division Multiplexing

M. Yamada, H. Ono, K. Ichii, T. Hosokawa, K. Takenaga, and S. Matsuo

マルチコアファイバを用いた空間多重伝送の実用化には、増幅技術の確立が不可欠である。増幅媒体であるエルビウム添加ファイバをマルチコア化したマルチコアエルビウム添加ファイバは、マルチコアファイバ用増幅媒体として期待されている。当社では、コア励起型およびクラッド励起型の二種類のマルチコアエルビウム添加ファイバの開発を進めている。本稿では、空間多重伝送用に検討されている各種増幅媒体の比較を行うとともに、試作したマルチコアエルビウム添加ファイバの評価結果を示す。

Optical amplification is essential for space-division multiplexing communication over multi-core fibers. A multi-core Er-doped fiber is a candidate for amplification medium. We have developed two kinds of multi-core Er-doped fibers: one is for core pumping and the other is for cladding pumping. In this paper, various types of amplifier medium for space-division multiplexing are compared. Performances of the fabricated multi-core Er-doped fibers are also demonstrated.

1. ま え が き

既存のシングルモードファイバ (SMF) を用いた伝送では、ファイバ 1 本当たりの伝送容量は 100 T b/s 前後が限界であるといわれている¹⁾。このような伝送容量限界を打ち破る技術として、マルチコアファイバ (Multi-Core Fiber, MCF) やフューモードファイバ (Few-Mode Fiber, FMF) を用いた空間多重伝送 (Space-Division Multiplexing, SDM) が注目を集めている。既に本技報にて報告のように、フジクラでも MCF^{2),3)} や FMF⁴⁾ の研究を積極的に進めている。フジクラが作製した MCF は種々の伝送実験に用いられ、ファイバー本当たりとしては SMF の約 10 倍となる 1 Pb/s (=1000 Tb/s) を超える伝送容量⁵⁾ や、1 Eb/s km (=1000 Pb/s km) を超える容量・距離積⁶⁾ の実現に寄与してきた。

MCF を用いた SDM システムを実現するためには、MCF 自体に加えて、その接続技術、入出力技術および増幅技術の確立が必要である。エルビウム添加ファイバ (Erbium-Doped Fiber, EDF) に代表される増幅技術

は、MCF を用いた長距離空間多重伝送システムを構築するためには不可欠な技術である。当社は、独立行政法人情報通信研究機構 委託研究“革新的光通信インフラの研究開発”の一環として、日本電信電話株式会社殿および大阪府立大学殿と共同で、MCF システム用の EDF 増幅技術の研究に取り組んでいる。MCF システム用 EDF としてはいくつかの構造が提案されているが、我々は実用的完成度が高いシングルコア型 EDF、および経済性や高密度集積性観点から MCF 用増幅媒体の主流になると考えられるマルチコア型 EDF (MC-EDF) の開発を進めている。

本稿では、最初にマルチコアファイバ向けの各種光増幅技術の概要を説明するとともに、提案されている種々の EDF の得失について比較を行う。さらに、今後の技術的発展が期待される MC-EDF について、我々の試作、評価結果について報告する。

2. MCF システム用光増幅技術の概要

MCF を用いることで従来の SMF に比べて伝送路の大幅な高密度化が可能になり、ファイバー本当たりの伝送容量の飛躍的な拡大が実現可能である⁵⁾。しかしながら、MCF を用いた SDM システムに従来の増幅技術をそのまま適用した場合、増幅部の構成は非常に煩雑となる

1 公立大学法人大阪府立大学 工学部電気情報システム工学分野 教授 (工学博士)

2 日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所 主任研究員 (博士(工学))

3 光ファイバ技術研究部

4 光ファイバ技術研究部 部長 (博士 (工学))

略語・専門用語	正式表記	説明
MCF	Multi-Core Fiber	ファイバ内に複数のコアを収容し、それぞれのコアを個別の伝送路として用いることで、ファイバ一本当たりでの伝送容量拡大を実現するファイバ。
FMF	Few-Mode Fiber	複数のモードが伝搬可能なコアを有するファイバ。個々のモードを個別の伝送路として用いることで、ファイバ一本当たりの伝送容量の拡大を図るために開発が進められている。今のところ、2つ〜6つのモードを伝搬可能なファイバが発表されている。
SDM	Space-Division Multiplexing	MCFやFMFを用いることでファイバ一本当たりの伝送容量拡大を実現する通信技術。FMFを用いた伝送は、MDM (Mode-Division Multiplexing) と呼ばれることもある。
EDF	Erbium-Doped Fiber	コアにエルビウムを添加した光ファイバ。980 nmや1480 nmの光を励起光として入射することにより、1550 nm帯の信号を増幅することが可能になる。数10 nmにわたる帯域の光を一括して増幅可能であるため、複数の波長の光を伝送させる波長多重伝送に不可欠なファイバである。
クロストーク	Crosstalk	マルチコアファイバにおけるクロストークは、コアからコアへの光の漏洩である。情報伝送の際は、信号へのノイズ増大による伝送品質劣化の要因となるので、できるだけ小さくすることが望ましい。
雑音指数 (NF)	Noise Figure	信号の入射側と出力側のSN比の比率。値が小さいほど、増幅によるSNの劣化が少ないことを意味する。

ため既存のSMFをベースにしたシステムに対するSDMの優位性を疑問視する声もある (図 1 (a))。SDMシステムが既存システムに対して優位となるためには、増幅部の集積化をはかり単純化した増幅器を実現することが必要である (図 1 (b))。増幅部の集積化には、いくつかの技術が必要である。一つは、増幅媒体であるEDFの高密度化、もう一つは、光源などの光部品の集積化で

ある。また、SDM用増幅技術には、システムとしての消費電力の低減を実現することも期待されている。

MCF用増幅用ファイバは、励起方法とファイバ構造により分類することが可能である。表 1 は、2つの励起方法 (コア励起、クラッド励起) の得失をまとめたものである。コア励起は従来のEDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) でも用いられている方法であり、励起光と

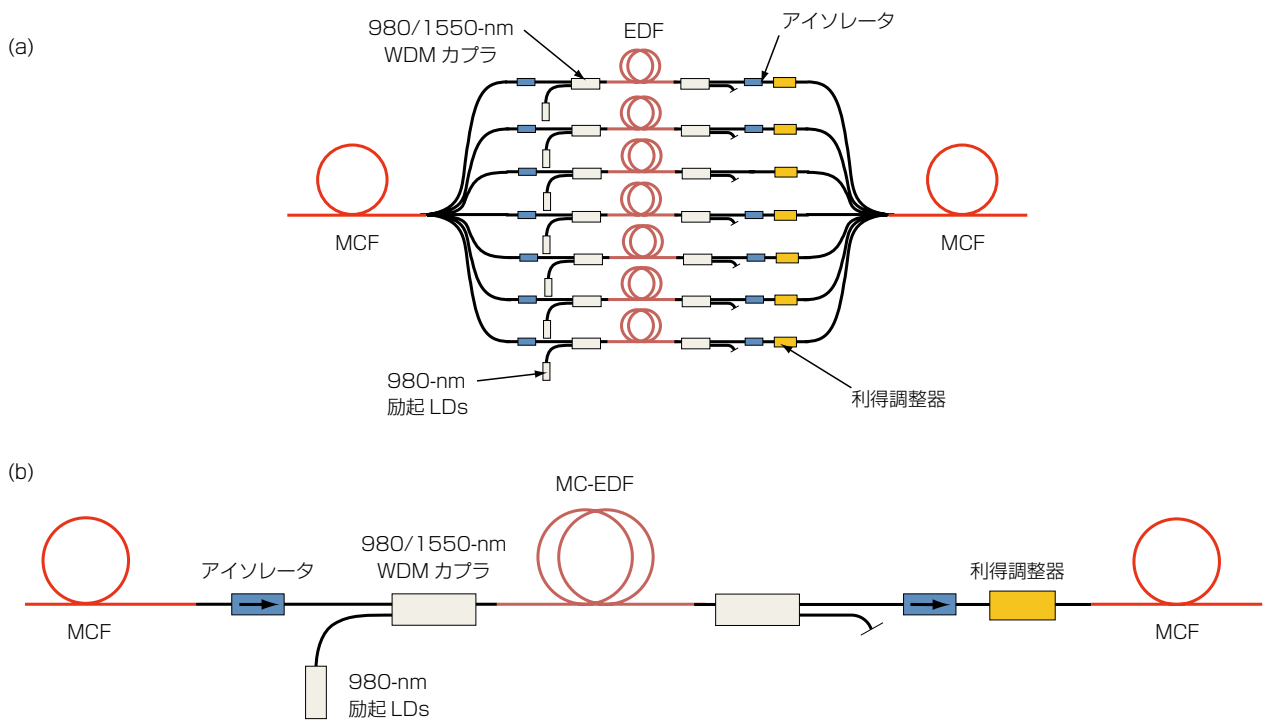


図1 SDM用増幅器構成の比較
Fig. 1. Comparison of amplifier structure for SDM.

表1 励起方法比較
Table 1. Comparison of pumping method.

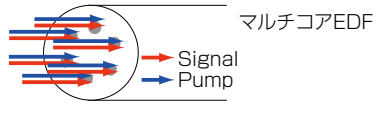
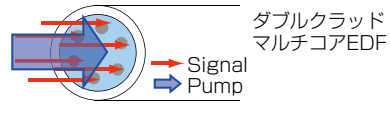
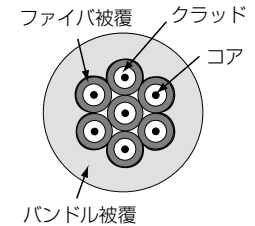
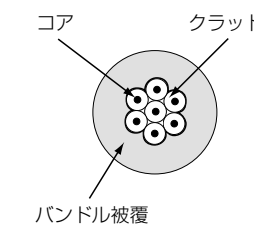
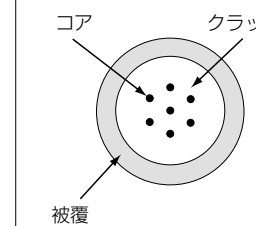
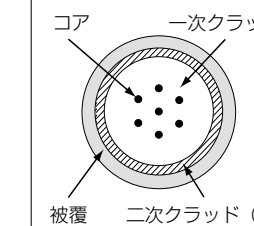
励起方法	コア励起	クラッド励起
概念図	 <p>マルチコアEDF Signal Pump 信号光と励起光をそれぞれのコアに投入</p>	 <p>ダブルクラッド マルチコアEDF Signal Pump 一次クラッドを伝搬する励起光ですべてのコアの信号光を励起</p>
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・高い励起効率 ・既存のシングルコアEDFA用の部品、制御方法が利用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・省スペース化の可能性 ・マルチモード励起LDの利用による低消費電力化、低コスト化の可能性
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・サイズ ・低消費電力化、低コスト化 	<ul style="list-style-type: none"> ・励起効率 ・励起光/信号光コンバイナ ・制御方法

表2 EDF構造の比較
Table 2. Comparison of EDF structure.

ファイバ構造	シングルコア		マルチコア	
	バンドル	マルチエレメント	シングルクラッド	ダブルクラッド
断面図	 <p>ファイバ被覆 クラッド コア バンドル被覆</p>	 <p>コア クラッド バンドル被覆</p>	 <p>コア クラッド 被覆</p>	 <p>コア 一次クラッド 被覆 二次クラッド (被覆)</p>
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・従来法で製造可 ・心毎の条長調整 ・単心分離によりFL/FO不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・細径化の可能性 ・単心分離によりFL/FO不要 ・クラッド励起可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・省スペース化の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・省スペース化の可能性 ・クラッド励起可能
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・バンドル化技術 ・心線細径化 	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチエレメント製造技術 ・単心分離時信頼性 	<ul style="list-style-type: none"> ・FL/FO (入射、出射の機構) ・コア間特性均一化 	<ul style="list-style-type: none"> ・FL/FO (入射、出射の機構) ・クラッド細径化 ・コア間特性均一化

信号光をEDFのコアに投入することにより光を増幅する。本方式のメリットとしては、高い励起効率および既存のシングルコア型EDF用の部品や制御が流用可能である点があげられる。一方、増幅器のサイズ、コストおよび消費電力がどこまで低減可能であるかが課題とされている。クラッド励起はダブルクラッド構造の第一クラッドに励起光を入射させ、励起光が第一クラッドを伝搬する間にコアに励起光を吸収させる方式である。クラッド励起は、非常に高いパワーの励起光が必要なファイバレーザにも用いられている方法である。安価な高出力マルチモードレーザダイオードで複数のコアを一括して励起することが可能となるため、構成の単純化、消費電力低減に効果があると考えられている。一方で、励起効率やポンプ光および信号光のファイバへの導入方法などが課題であるといわれている。

EDFの構造としては、シングルコア型とマルチコア型に大別することが可能である。それぞれの特徴を表2に示す。シングルコア型は、さらにバンドル型とマルチエレメント型に分類することができる。バンドル型は被覆付きのシングルコアEDFを束ねたものである⁷⁾。ク

ラッド径および被覆径を一般的なファイバ(クラッド直径: 125 μm, 被覆直径: 250 μm)よりも細径化することで、空間的な高密度化を実現する。従来のEDF製造プロセスでファイバが作製可能である点、EDF長さを心毎に調整することによる利得調整が可能である点から、バンドル型EDFはMCF用EDFとして実用的な完成度が高いと考えられる。一方で、クラッドの細径化に伴うクロストーク発生の抑制が検討課題として挙げられる。マルチエレメントファイバは、被覆を持たない単心ファイバを束ね、束ねたファイバをまとめて被覆したファイバである⁸⁾。ファイバ径をバンドル型より細径化できる可能性を秘めているが、複数の母材を同時に線引きする技術確立やファイバ信頼性など改善すべき課題は多い。マルチコア型は、単一のクラッドに複数の増幅コアを収容したものである。本構造は、伝送用MCF作製技術を用いた製造が可能であり、シングルコア型以上の高密度集積の実現が期待されている。また、周辺デバイスも含めた集積化を行うことで、経済性の面でもメリットを生み出すことが期待されている。マルチコア型は、クラッド構造によりシングルクラッド構造およびダブルクラッド

構造に大別可能である。これらの構造は、励起方法と密接に関係しており、シングルクラッド構造にはコア励起、ダブルクラッド構造にはクラッド励起が用いられる。

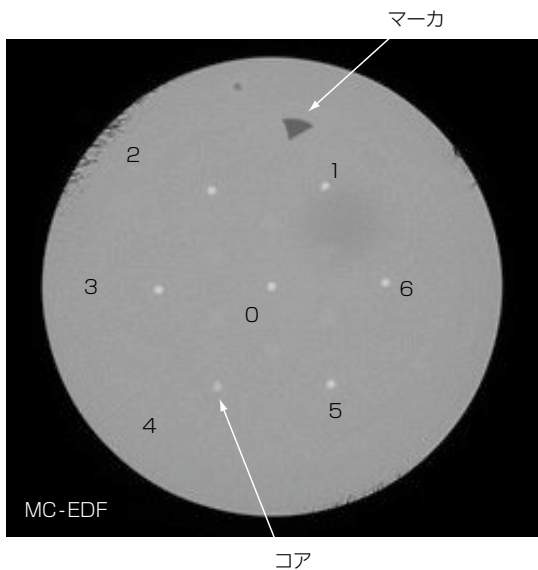
筆者らは、バンドル型EDFおよびMC-EDFの研究に取り組んできた。本稿では、高密度集積や経済性の観点で非常に高い可能性を秘めているMC-EDFに関する研究成果について紹介する。

3. シングルクラッド型 MC-EDF

本節では、今回試作したシングルクラッド型MC-EDFの特性について紹介する。また、MC-EDFにおいて課題となるクロストークを抑制するために提案した対向増幅と呼ばれる手法についての説明を行う。

3.1 ファイバ特性⁹⁾

試作したマルチコアEDFの断面図と構造パラメータを図2に示す。7つのエルビウム添加コアが、コア中心間距離 49.5 μmで六方最密構造に配置されている。980 nmでの励起を想定し、カットオフ波長は 930 nmに設定した。図3に7つのコアの吸収スペクトルを示す。1529 nmにおける吸収は中心コアで 11.1 dB/m、外側コアで 11.9 ~ 12.7 dB/mであり、一般的なシングルコアEDFとほぼ同じ特性を有する。



	波長	平均値
コア中心間距離	-	49.5 μm
クラッド直径	-	200.6 μm
MFD	980 nm	3.7 μm
	1550 nm	6.0 μm
A _{eff}	980 nm	10.2 μm ²
	1550 nm	26.5 μm ²
カットオフ波長 (2 m)	-	930 nm
吸収量	1529 nm	12.5 dB/m

図2 試作マルチコアEDFの構造
Fig. 2. Structure of a fabricated multi-core EDF.

ファイバ単体でのクロストーク特性を、図4に示す系で評価した。図3に示したように、EDFは 1550 nm付近にErイオン (Er³⁺) の吸収ピークを有するため、この波長域でのクロストークを直接評価することはできない。このため今回はErイオン吸収の影響を受けない長波長領域 (1800 nm ~ 1980 nm) のクロストークから外挿する手法を用いた。図5に測定結果を示す。細実線は測定結果に対する近似直線である。1550 nmにおけるクロストークは、10 mで -90 dB程度と非常に小さな値であると推定される。

本ファイバの増幅特性の評価を、図6に示す系で行った。MC-EDFと単心ファイバをつなぐため、細径ファイババンドル型の入出力デバイス (Fan-in/Fan-out Device, FI/FO) を用いた¹⁰⁾。FI/FOの挿入損失は 2 dB

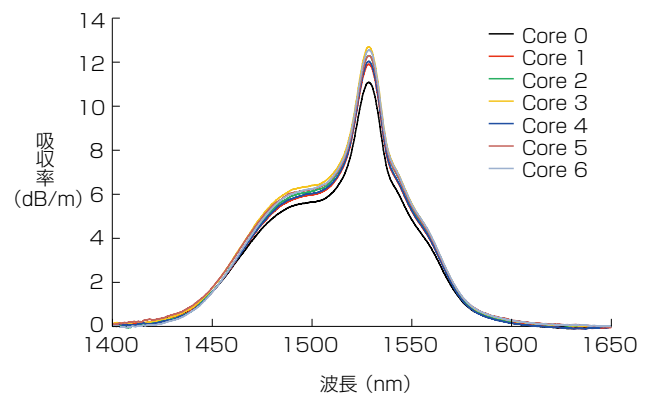


図3 吸収スペクトル
Fig. 3. Absorption spectra.

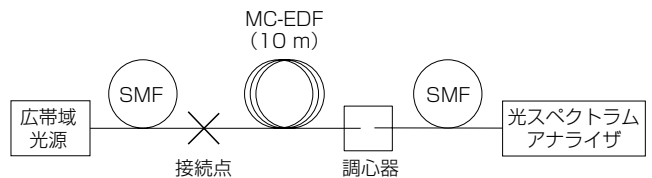


図4 クロストーク評価系
Fig. 4. Measurement setup for crosstalk.

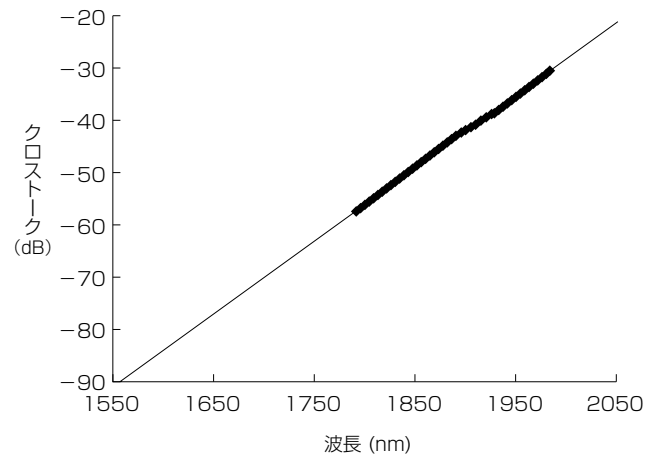


図5 クロストーク評価結果
Fig. 5. Measurement result of crosstalk.

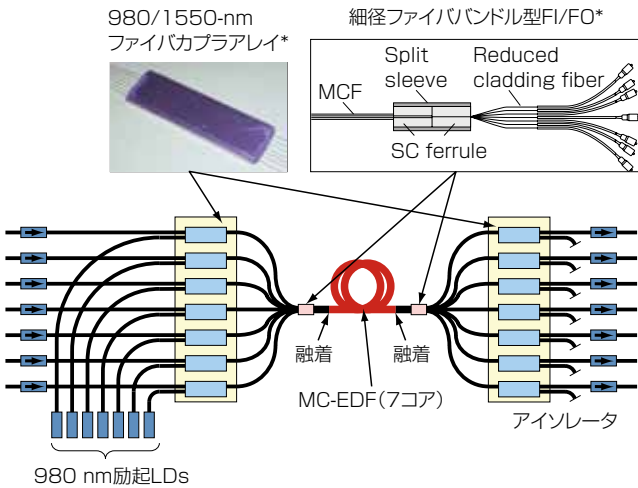
未満であった。EDFのそれぞれのコアは980 nm帯のレーザーダイオードで励起した。また、入出力端には光アイソレータを配置した。図7に8チャンネルのWDM信号を増幅した時の利得および雑音指数(Noise Figure, NF)の測定結果を示す。WDM信号の波長は、1530.95, 1534.20, 1538.90, 1543.60, 1548.40, 1553.25, 1556.85 nmであり、各波長での入力パワーは-20 dBmとした。各コアの励起パワーは、WDM信号がほぼフラットな利得を有するように調整した。7つのコアの利得は19.6 dBから22.1 dB, NFは4.7 dBから6.3 dBであった。コアごとの利得やNFの差は、主としてFI/FOの接続損失や挿入損失がコアごとに若干異なることに起因すると考えられる。以上の結果は、作製したMC-EDFが光増幅器として十分な能力を有していることを示している。

3.2 対向増幅によるクロストーク低減¹¹⁾

前節で紹介したMC-EDFは非常に小さなクロストークを有している反面、クラッド直径が200 μmと通常のファイバよりも太くなっている。クラッド径が大きくなると、小径に曲げたときの信頼性が低下する。EDFはコイル状に巻いて収容する必要があるために、クラッド太径化による巻径の制限は好ましくない。クラッドを細径化するためにはコア間距離を狭く設計する必要がある。しかしながら、コア間距離を狭くしたMCFでは、クロストーク劣化という問題が発生する。

クロストークの要因としては、最近接コアからの漏洩光による影響が最も大きい。最近接コアからのクロストークを低減する方法として、我々は図8に示すような対向増幅という手法を提案した。通常のMC-EDFでは、信号光の伝搬方向は同方向で用いられる(同方向増幅)。対向増幅では、隣接コア間で信号光の伝搬方向を逆になるように配置する。これにより隣接コアからのクロストークを低減することが可能である。

図2に示したファイバを用いて、対向増幅の効果について検証を行った結果を以下に示す。図9に評価実験系を示す。対向励起を実現するために、外側の6つのコアのみを使用した。励起光としては、980 nm帯のレーザーダイオードを用いた。信号光用の光源および励起光源のポート差し替えることに、同一系で同方向増幅と対向増幅の切り替えが可能である。クロストークの測定は、波長の異なる3つの信号(1552.8 nm, 1556.8 nm, 1560.8 nm)を、それぞれ別々のコアに投入することにより行った。



* NTT フォトニクス研究所試作 (現、先端集積デバイス研究所、デバイスイノベーションセンタ)

図6 増幅特性評価系

Fig. 6. Measurement setup for amplification characteristics.

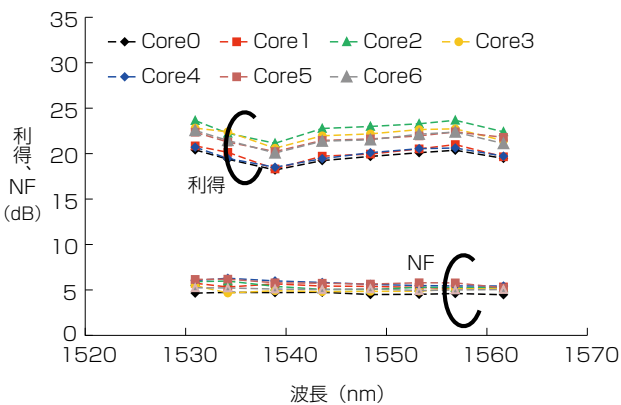


図7 マルチコアEDFAの利得およびNF

Fig. 7. Gain and NF spectra of a multicore EDFA.

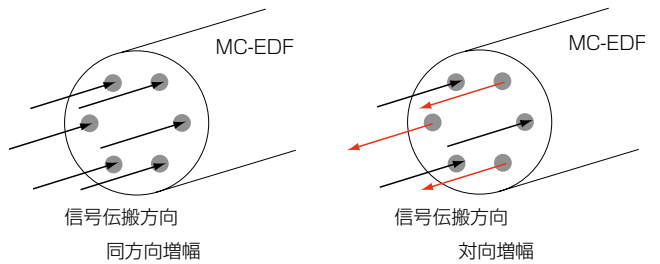


図8 同方向増幅と対向増幅

Fig. 8. Same direction amplification and opposite direction amplification.

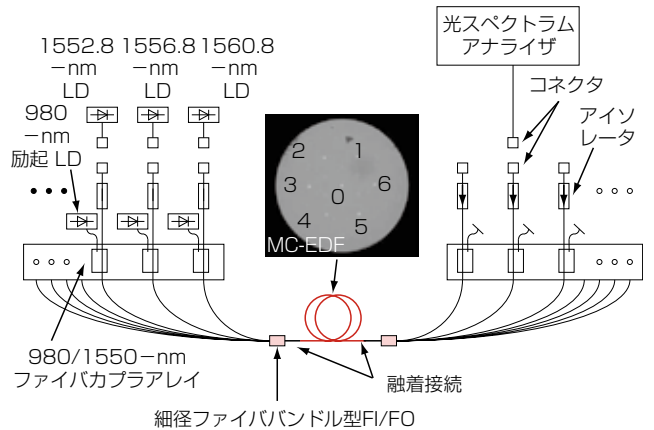


図9 対向増幅特性評価系

Fig. 9. Measurement setup for opposite direction amplification.

図 10 に、出力スペクトルの一例を示す。コア 4、コア 5、コア 6 に信号光を投入し、コア 4 からの出力光のスペクトルをモニタした。図 10 (a) は、同方向増幅を行った時の結果である。1552.8 nm にコア 4 に入力した信号光、1556.8 nm および 1560.8 nm にはコア 5、コア 6 からコア 4 へのクロストーク光が観測されている。各波長の信号光のピークパワーの差分を取ることで、コア間のクロストークを評価することが可能である。図 10 (b) は、対向増幅を行った時の出力スペクトルを示す。対向増幅を行うことにより、最近接のコア 5 からのクロストーク信号は測定限界以下となり、対向増幅により最近接コアからのクロストークが抑圧できることを示している。この場合、コア間クロストークとして支配的となるのは、信号光が同方向に伝搬している一つ

隣のコア (コア 6) からのクロストークとなる。

表 3 に同方向増幅と対向増幅の場合のクロストークの比較を示す。対向増幅を用いることにより 4 dB 以上のクロストーク改善が得られることがわかる。このことは、対向増幅を用いることでコア間隔を狭くするファイバ設計が可能である事を意味しており、結果的に EDF のクラッド直径を小さくすることが可能になる。

4. クラッド励起向けマルチコア EDF¹²⁾

クラッド励起は、前述のように安価のマルチモードレーザを励起光源として用いることによるコスト低減や構成の単純化というメリットの半面、励起光がクラッドを伝搬しながらコア部に吸収されるため、励起光と信号光がコアを伝搬するコア励起に比べて吸収効率が悪いという課題がある (図 11)。このようなデメリットを解消するために、Er を添加したコアに Yb イオンを共添加する手法が知られている¹³⁾。Er と Yb を共添加することにより、励起吸収の増加および励起波長帯の拡大という効果が得られる。

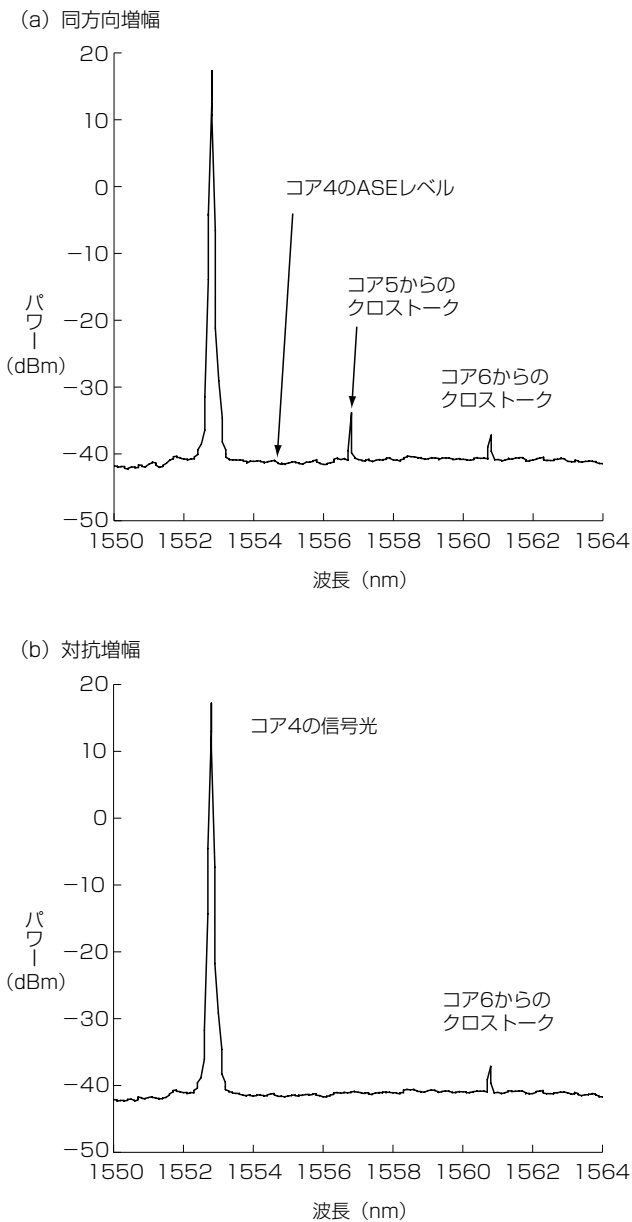
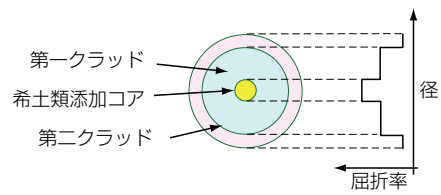


図 10 出力スペクトル波形

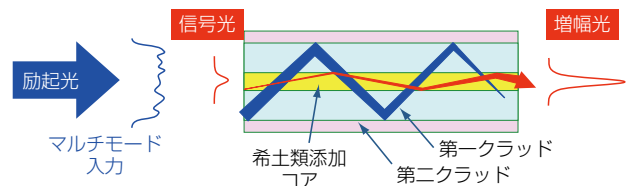
Fig. 10. Output spectra for different amplification methods.

表 3 増幅方法によるクロストークの変化
Table 3. Crosstalk improvement for different amplification methods.

コア番号	総クロストーク (dB)		改善量 (dB)
	対向増幅	同方向増幅	
共通			
1	-60	-55	5
2	-61	-55	6
3	-54	-50	4
4	-55	-48	7
5	-54	-49	5
6	-58	-53	5



(a) ダブルクラッドファイバの模式図



(b) クラッド励起による増幅の模式図

図 11 ダブルクラッドファイバとクラッド励起による増幅

Fig. 11. Schematics of double-cladding fiber and amplification with cladding pump method.

図 12 に試作したダブルクラッド型マルチコア Er/Yb 添加ファイバ (Double-Cladding Multi-Core Er/Yb-Doped Fiber, DCMC-EYDF) の断面図を示す. 12 個の Er/Yb 添加コアは, コア間隔 37.2 μm で六角形状に配置されている. 第一クラッド, 第二クラッドおよび被覆の直径は, 214 μm , 284 μm , 356 μm であった. 図 13 に信号波長帯での吸収特性を示す. Yb を共添加することにより Er の高濃度添加が可能となり, 25 dB/m を超える非常に大きな利得係数が得られている. このような高い利得係数は, 増幅用ファイバの短尺化に寄与する.

図 14 は, この DCMC-EYDF を用いた 12 コア同時増幅の評価系である. 増幅には 5 m の DCMC-EYDF を用いた. DCMC-EDF の両端には, 励起光, 信号光のコンバイナモジュールを配置した. 図 15 にコンバイナモジュールの概略を示す. 本モジュールは空間光学系により構成されている. 信号光は伝送用 MCF のコアから DCMC-EYDF のコアに結合され, 励起光は一次クラッドへ結合するように設計されている. 入力側モジュールの励起光ポートには, 978 nm マルチモード LD を接続した. 図 16 に 8 チャンネルの WDM 信号を用いた評価結果を示す. 信号光のパワーは -29 dBm/ch, 励起光パワーは 1.9 W であった. DCMC-EYDF 出力端での残留励起光パワーは 0.04 W であり, 励起光の大半はコア

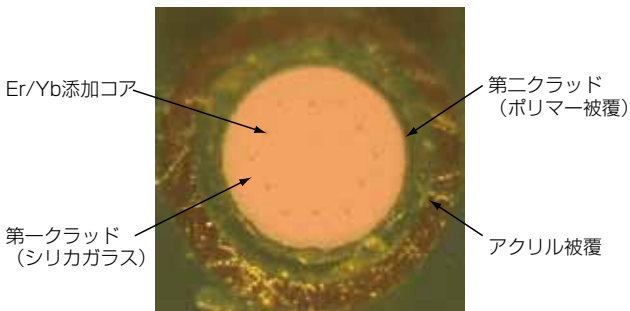


図 12 ダブルクラッド型マルチコア Er/Yb 添加ファイバ
Fig. 12. Double-cladding multi-core Er/Yb doped fiber.

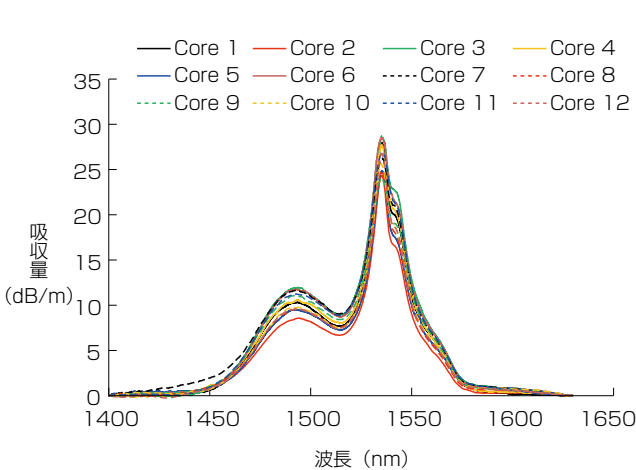


図 13 DCMC-EYDF の吸収特性
Fig. 13. Absorption spectra of DCMC-EYDF.

に吸収されたことがわかる. すべてのコアにおいて, 11 dB を超える利得が得られ, 使用波長帯 (1534.2 nm ~ 1561.4 nm) にわたる平均利得として, 13.4 dB ~ 18.3 dB が得られた. 単位励起光あたりの利得は, 7.1 dB/W ~ 9.6 dB/W という良好な値が得られた. NF は, 1548.4 nm 以上で 7.8 dB 未満という値が得られたが, それ以下の波長で NF 劣化が観測された. また, 利

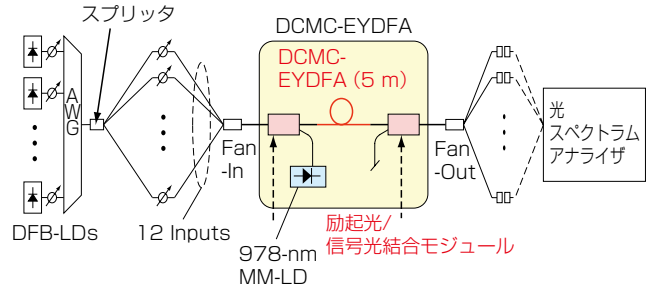


図 14 DCMC-EYDF 増幅特性評価系
Fig. 14. Measurement setup for amplification characteristics of DCMC-EYDF.

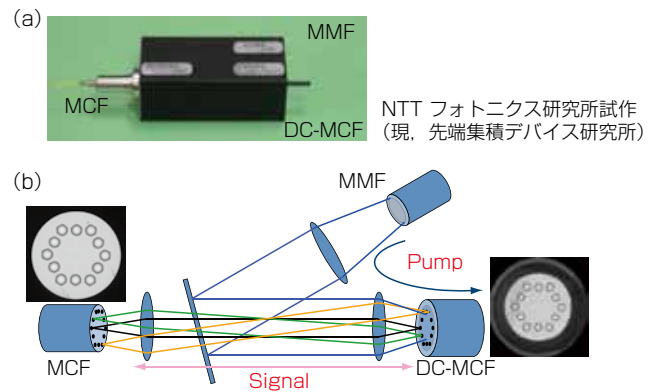


図 15 励起光/信号光コンバイナモジュール
Fig. 15. Pump/Signal module:

(a) Photograph of module. (b) Schematic of module.

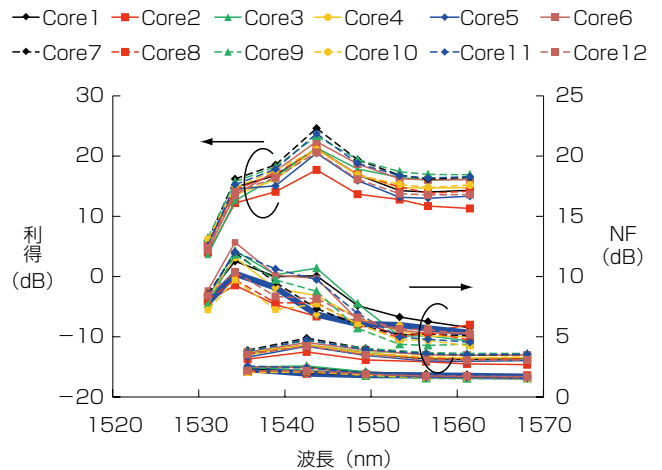


図 16 DCMC-EYDF の利得および NF の波長依存性
Fig. 16. Gain and NF spectra of DCMC-EYDF.

得も 1534 nm以下の領域での劣化が確認された。短波長側での利得とNFの劣化は、Erイオンの吸収によるものであり、DCMC-EYDFのパラメータや製造プロセスおよびファイバ長の最適化により改善可能である。

5. む す び

空間多重伝送用の増幅技術開発として、我々が取り組んでいる二種類のMC-EDFの開発状況を紹介した。いずれのファイバも、ファイバ設計の最適化、周辺デバイスを含めた集積化および電力効率の改善など解決すべき課題はまだ多い。しかしながら、空間多重伝送用が幹線網に適用されるには、増幅技術の確立が不可欠である。今後も空間多重伝送技術に確立に向けて、MCF用増幅技術開発を進めて行く予定である。

謝 辞

本開発の一部は、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の研究開発の一環としてなされたものである。

参 考 文 献

- 1) T. Morioka : "New Generation Optical Infrastructure Technologies: "EXAT Initiative," in the 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) IEEE, FT4, 2009
- 2) 竹永ほか : 「空間多重伝送用マルチコアファイバ」, フジクラ技報, 第121号, pp.1-7, 2011
- 3) 佐々木ほか : 「大容量伝送用マルチコアファイバ」, フジクラ技報, 第125号, pp. 5-11, 2013
- 4) 丸山ほか : 「広帯域低モード分散を実現する2モード光ファイバ」, 第124号, pp. 7-14, 2013
- 5) H. Takara et al.: "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) (Optical Society of America, Washington, DC, 2012), Th.3.C.1, 2012
- 6) T. Kobayashi et al.: "2 x 344 Tb/s Propagation-direction Interleaved Transmission over 1500-km MCF Enhanced by Multicarrier Full Electric-field Digital Back-propagation," in European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) (The Institution of Engineering and Technology2013) , PD3.E.4, 2013
- 7) M. Yamada, K. Tsujikawa, L. Ma, K. Ichii, S. Matsuo, N. Hanzawa, and H. Ono: "Optical Fiber Amplifier Employing a Bundle of Reduced Cladding Erbium-Doped Fibers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.24, No. 21, pp. 1910-1913, 2012
- 8) S. Jain et al.: "Erbium-doped multi-element fiber amplifiers for space-division multiplexing operations," Optics Letters, Vol. 38, No. 4, pp.582-584, 2013
- 9) K. Takenaga et al.: "Multicore EDF Optimized for Remotely Pumped Amplification System over Multicore Fiber," in CLEO-PR&OECC/PS 2013, TuS1-2, 2013
- 10) H. Takara et al.: "1000-km 7-core fiber transmission of 10 x 96-Gb/s PDM-16QAM using Raman amplification with 6.5 W per fiber," Optics Express, Vol. 20, No. 9, pp. 10100-10105, 2012
- 11) H. Ono et al.: "Amplification method for crosstalk reduction in multi-core fibre amplifier," Electronics Letters, Vo. 49, No. 2, pp. 138 - 140, 2013
- 12) H. Ono et al.: "12-Core Double-Clad Er/Yb-Doped Fiber Amplifier Employing Free-Space Coupling Pump/Signal Combiner Module," in European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) (The Institution of Engineering and Technology2013) , We.4.A.4, 2013
- 13) J. Nilsson et al.: "Modeling and optimization of short Yb/sup 3+/-sensitized Er/sup 3+/-doped fiber amplifiers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, No. 3, pp. 383 - 385, 1994