

19コアEDFAの増幅特性

Amplification Characteristics of 19-Core EDFA

高坂 繁弘*
Shigehiro Takasaka

前田 幸一*
Koichi Maeda

川崎 浩平*
Kohei Kawasaki

吉岡 和昭*
Kazuaki Yoshioka

大塩 肇*
Hajime Oshio

杉崎 隆一*
Ryuichi Sugizaki

塚本 昌義*
Masayoshi Tsukamoto

〈概要〉

19コア-エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) の増幅特性を測定する。7コアEDFAのそれとの比較から、19コアEDFAのクラッドポンプ効率が2.7 dB優れることを明らかにした。

1. はじめに

クラッド励起マルチコア (MC: Multi-Core) EDFAは、コアあたりの消費電力と設置面積の観点で、従来のEDFAよりも優れた特性を持つ可能性が高い。MC-EDFAのコアあたりの消費電力はMC-EYDFA (Erbium Ytterbium Doped Fiber Amplifier) に劣るが¹⁾、MC-EYDFAがCバンドの一部のみ増幅できるのと異なり、MC-EDFAは従来のEDFAと全く同じ帯域のCバンドとLバンドをそれぞれ増幅できる。そのため、我々は従来のEDFAの置き換えとなり得るクラッド励起MC-EDFAを開発してきた²⁾。

Lバンドで動作するクラッド励起7コアEDFAは、従来のEDFAと同等の増幅特性を持つに至った³⁾。そのため、この7コアEDFAの課題は、実用的な増幅特性の達成からクラッドポンプの電力効率向上へと移行した⁴⁾。

MC-EDF (Erbium Doped Fiber) のコア数を増加することで、以下の理由からクラッドポンプのパワー効率向上を期待できる。コア配置が最密充填構造である場合、7コアEDFのコア配置は中心コアの第1層と中心コアを取り囲む6つのコアの第2層で構成される。第2層を取り囲む12個のコアで構成される第3層を加えると19コアEDFとなる。コア数が7コアから19コアに増加することで、コア数の増加比は2.7 (=19/7) 倍となる。一方で、クラッド面積の拡大比は、コア間距離が同一である場合、2.7より小さくなる。なぜなら、信号光の導波にほとんど関与しない最外層コアからクラッドの外周までのクラッド面積の増加比は、最外層のコア数におおよそ比例するため、コア数の増加比よりも小さくなるからである。よって、コアあたりのクラッドポンプのパワーは、同じクラッドポンプパワー密度の条件において、幾何学的理由から向上する。

本稿では、19コアEDFのコアあたりの飽和出力パワーと利得形状のEDF長依存性を測定し、CバンドおよびLバンド増幅に適切な長さを求める。次に、クラッド励起19コアEDFAのC

バンドとLバンドにおける増幅特性を測定する。最後に、得られた増幅特性をクラッド励起7コアEDFAのそれと比較する。

2. 実験構成

図1に19コアEDFと7コアEDFの端面像を示す^{2),4)}。ファイバの被覆を除去後に端面像を測定したため載っていないが、ファイバの被覆には低屈折率樹脂を用い、ダブルクラッド構造を構成した。19コアおよび7コアEDFのコア間距離は、同一の38.5 μm である。19コアEDFと7コアEDFのクラッド径は、それぞれ200 μm と135 μm である。19コアEDFの1530 nmにおけるコアの吸収係数およびモードフィールド径は、7コアEDFの11 dB/mおよび6.2 μm とほぼ同じである^{2),4)}。同一のクラッドポンプパワー密度の下では、19コアEDFのコアあたりのクラッドポンプパワーは、幾何学的理由から7コアEDFの値より0.9 dB削減されると見積もられる²⁾。なぜなら、19コアEDFのクラッド面積は7コアEDFの面積に比べて約2.2倍 (=3.4 dB) で、コア数比は2.7倍 (=19/7=4.3 dB) であるため、コアあたりのクラッドポンプパワーは0.9 dB減少するからである²⁾。

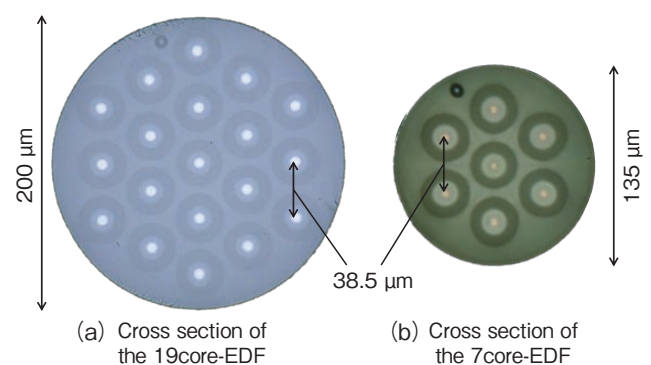


図1 被覆を除去したダブルクラッド19コアEDF (a) とダブルクラッド7コアEDF (b) の端面像^{2),4)}
Cross-section pictures of (a) a double cladding 19-core EDF and (b) a double cladding 7-core EDF^{2),4)}. Low refractive index coatings are removed.

* 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

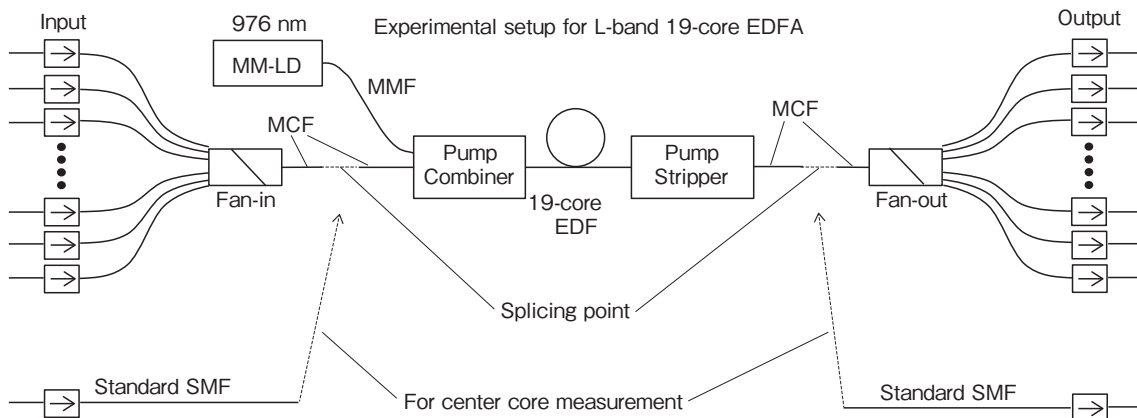


図2 クラッド励起19コアEDFAの構成。FBFは全コア測定に用い、SMFは中心コアの測定に用いた。
Configurations of a cladding-pumped 19-core EDFA. FBFs are used for all core measurement. SMFs are used for center core measurement.

図2は、クラッド励起19コアEDFAの増幅特性を測定する2つの構成である。一つは、全コア測定に用い、もう1つは中心コア測定に用いた。全コア測定において、入力側のファンイン (FBF: Fiber Bundled FAN in/out) とポンプコンバイナの間の19コアMCF (Multi-Core Fiber) と、出力側のポンプストリッパーとFBFとの間を融着接続した。中心コア測定では、ポンプコンバイナの入力側MCFとポンプストリッパーの出力側MCFの中心コアを、融着により標準のシングルモードファイバ (SMF: Single Mode Fiber) と接続した。なお、Lバンドの増幅測定において、入力側FBF内の最外層のファイバの1本に不具合があった。しかしながら、19コアEDFの全19コアをクラッドポンプ光で励起する構成に問題は無いため、残りの18コアの増幅特性を測定した。測定に用いる全コアの入出力ポートと標準のSMFには、それぞれアイソレータを取り付け増幅器として機能させた。

19コアEDFのクラッドにマルチモードポンプ光を入射するために、サイド結合型ポンプコンバイナを用いた。サイド結合型ポンプコンバイナの挿入損失は、マルチモードポンプ光に対して0.32 dBと十分小さい。19コアEDFの後段にあるポンプストリッパーは、クラッド内を伝播するポンプ光を除去し、後段へのマルチモードポンプ光の伝搬を防ぐ。

ポンプ光源として、19コアEDFの吸収ピークに対応する波長976 nmのマルチモード光を出力するマルチモードレーザーダイオード (MM LD) を用いた。

19コアEDFの両側で用いられている19コアMCFのコア間距離は、0.1 μm未満の誤差で19コアEDFと同じである。MCFのカットオフ波長は約1450 nmで、CバンドやLバンドの光信号に対してシングルモードであり、曲げ損失を抑制する。

FBFの端部は、斜めに研磨して反射を-55 dBに抑制した。FBFのコア間クロストーク (XT: Cross Talk) は、外層のコア間のXTを除いて、-47 dBであり、最も外側の層のコア間のXTは、-33 dBであった。

3. 増幅特性のEDF長依存性

CバンドおよびLバンドの増幅に最適なEDF長を見つける

ために、利得スペクトルと総出力パワーの19コアEDF長依存性を測定した。

図3は、複数の19コアEDF長における中心コアの利得スペクトルである。0 dBmで単一波長の入力信号光の波長を掃引して測定した。従来のコア励起型EDFAと同様に、19コアEDF長の増加に伴い利得波長帯は短波長から長波長へ移動した。Cバンド並びにLバンド増幅に最適なEDF長は、それぞれ8 mと50 mであることがわかった。さらに、19コアEDF長が8 mの場合の最大利得は、EDF長が50 mの場合よりも約6 dB小さいことが示された。

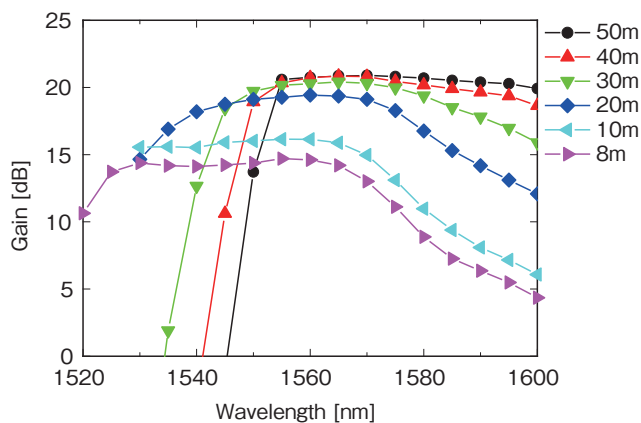


図3 複数の19コアEDF長における、中心コアの利得スペクトル。0 dBmで単一波長の信号光を波長掃引して測定した。
Gain spectra of the center core for several 19-core EDF length measured by sweeping wavelength of single channel with power of 0 dBm.

図4は、複数の19コアEDF長における、中心コアの総出力パワーである。最大利得波長に設定した0 dBmで単一波長の信号光を入力し測定した。測定したパワーは、増幅された入力信号光と自発放射光 (ASE: Amplified Spontaneous Emission) から成る。総出力パワーは19コアEDF長の増加に伴って増加し、EDF長50 mで飽和の傾向を示した。図4中の□と○は、

それぞれ、同一クラッドポンプパワー密度における7コアEDFAと19コアEDFAの総出力パワーである^{2),3)}。19コアと7コアEDFAの合計出力電力の差は、EDF長8 mと50 mにおいてそれぞれ1 dBと2 dBであった。クラッドポンプパワー密度が同じであっても、19コアEDFは7コアEDFよりも、特により長いEDF長において、高い出力パワーを示した。この結果は、コア数が多いほどMC-EDFのクラッドポンプパワー効率が高いことを示唆する。

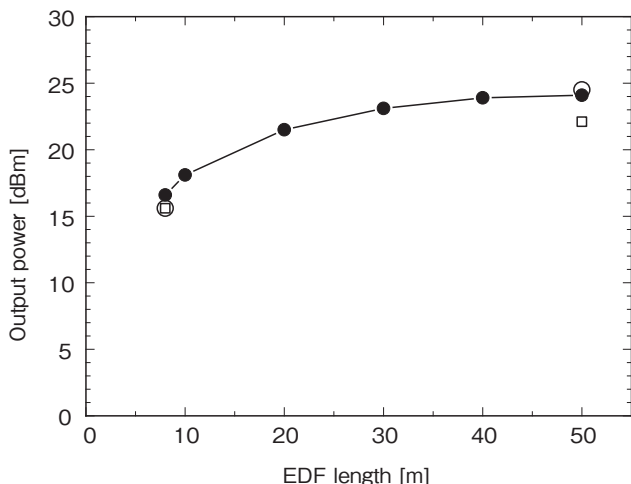


図4 複数の19コアEDF長における、中心コアの総出力パワー(黒丸)。利得が最大となる波長に設定した0 dBmで単一波長の信号光を入力し測定した。同一のクラッドポンプパワー密度における、7コアEDFAと19コアEDFAの総出力パワーをそれぞれ□と○で示す^{2)~4)}。19-core EDF length dependence of total output power for 0 dBm input single channel signal located at maximum gain wavelength (closed circles). Open squares and open circles are total output power of the cladding-pumped 7-core and 19-core EDFAs, respectively, under the same cladding pump power density condition^{2)~4)}。

4. Cバンド増幅の特性

Cバンド増幅に最適な19コアEDF長をより精度よく求めるために、中心コアの利得と雑音指数(NF: Noise Figure)スペクトルのEDF長依存性を測定した。図5は、総パワー-5 dBmと0 dBmで、8波長の波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)入力信号光に対する利得とNFスペクトルである。19コアEDF長が8 mの近傍において測定した。MM-LDの出力パワーは35 Wに設定した。この時、19コアEDFの入力点におけるクラッドポンプパワーは33.2 Wと7コアEDFAと同じクラッドポンプパワー密度になる。

図6は、19コアEDFAの入力パワーに対する総出力パワーである。入力信号光は8波長のWDM信号光である。グラフの傾きが0.15-0.20 dB/dBと小信号増幅領域で期待される1 dB/dBを大きく下回ることから、入力パワーが-10 dBmから5 dBmの範囲では利得飽和領域で動作していることが分かる。

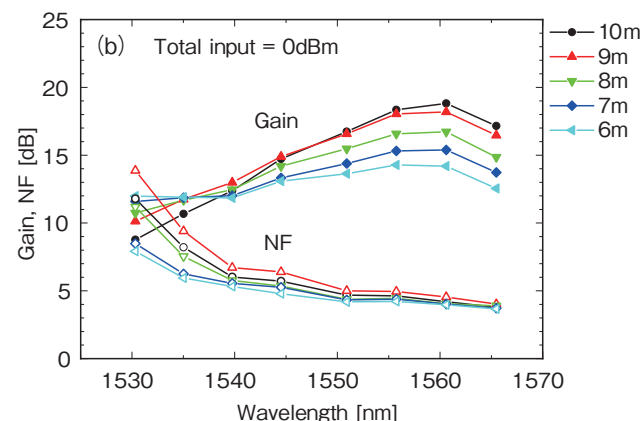
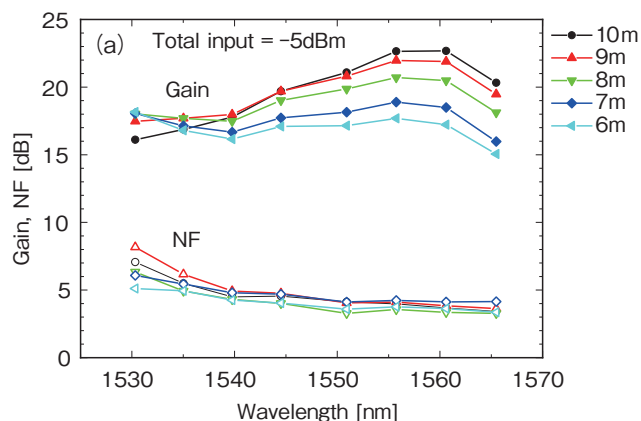


図5 19コアEDFAの中心コアの利得とNFスペクトルのEDF長依存性。入力信号光は8波長のWDM信号光で総パワーは-5 dBm (a)と0 dBm (b)。19-core EDF length dependence of gain and NF spectra for the center core of the 19-core EDFA. Input signal is 8-WDM with total power of -5 dBm (a) and 0 dBm (b)。

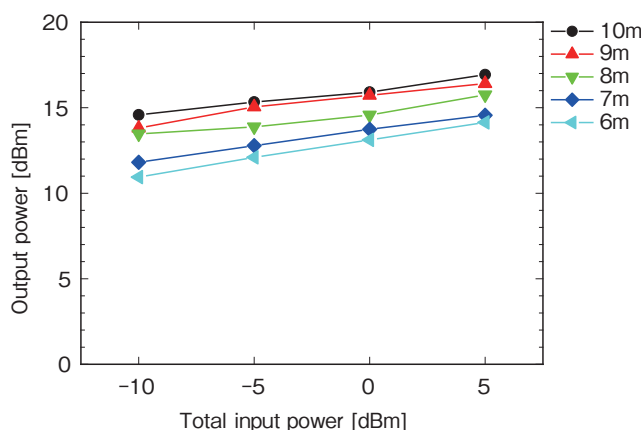


図6 19コアEDFAの中心コアの総出力パワーの総入力パワー依存性。入力信号は8波長のWDM信号光。Total input power dependence of total output power for the center core of the 19-core EDFA. Input signal is 8-WDM signals.

総入力パワーが-5 dBmの入力信号の場合、Cバンドの増幅に最適なEDF長は8 mであった。図5(a)が示すように、利得形状が平坦、および、測定したEDF長の中で最小利得が最大だからである。一方で、総入力パワーが0 dBmの入力信号の

場合、図5(b)が示すように6 mのEDF長の利得形状は比較的平坦であるが、図6に示すようにEDF長が6 mの場合の総出力パワーは13.1 dBmと光通信システムに適用するには小さすぎた。クラッドポンプパワーを増加させると、総出力パワーが増加し、短波長側の利得が高くなることで利得平坦性が改善する。しかし、それは同時にクラッドポンプパワー効率を劣化させるため、実用の観点から適用できない。

図7に、EDF長が8 mのクラッド励起19コアEDFAの各コアの利得とNFスペクトルを示す。入力信号は8波長のWDM信号で、総入力パワーは-5 dBmである。最小利得は19.1 dBで、最大NFは6.8 dBであった。利得とNFのコア間差はそれぞれ1.0 dBと1.1 dBであった。コアあたりの平均出力パワーは16.1 dBmであった。

EDF長8 mのクラッド励起7コアEDFAのCバンド増幅特性が文献2にある。Cバンドの増幅において、最適なEDF長は7コアEDFと19コアEDFは同じであった。同じクラッドポンプパワー密度の下では、総パワー-5 dBmで8波長のWDM信号光の入力に対して、7コアEDFAの中心コアは総出力パワー15.6 dBmで最小利得18.0 dBである。0.9 dBの幾何効果により、19コアEDFが7コアEDFよりもクラッドポンプ励起効率が高いことが期待され、19コアEDFAと7コアEDFAの出力パワーの比0.5 dBは、概ねこの値に一致する。

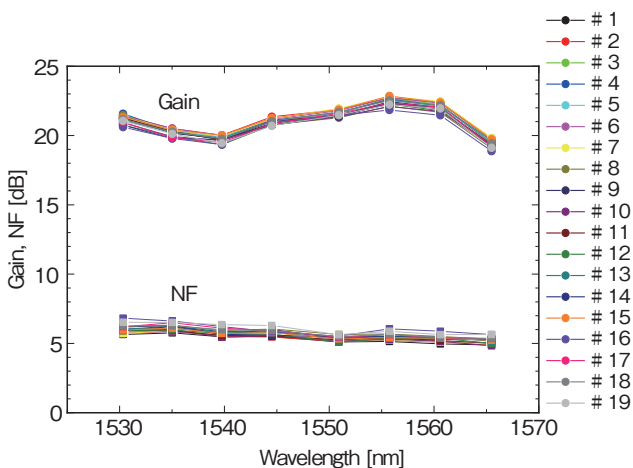


図7 EDF長が8 mの19コアEDFAの各コアの利得とNFスペクトル。入力光は総パワーが-5 dBmで8波長のWDM信号光。
Gain and NF spectra of each core in the 19-core EDFA for EDF length of 8m. Input signal is 8-WDM signals with total power of -5 dBm

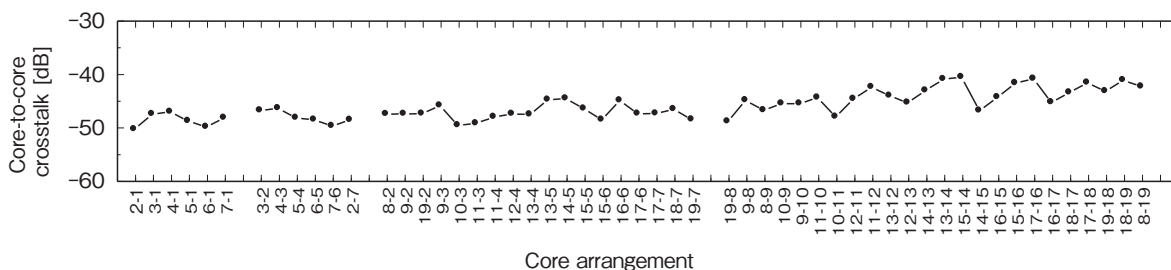


図8 Cバンドで動作するクラッド励起19コアEDFAのコア間XT
Core-to-core XT of the cladding pumped C-band 19-core EDFA.

マルチコア光増幅器に特有の特性であるコア間XTを次のように測定した。波長1550 nm並びに1551 nmの信号光を、それぞれ、選択したコア並びに別のコアに入力する。クラッドポンプ光パワーと信号光パワーはそれぞれ40 dBmと0 dBmとした。コア間XTは、選択したコアにおける2つの信号光の出力パワー比から得た。図8は、Cバンドで動作するクラッド励起19コアEDFAのコア間XTである。ここで、中心コア、中心コアを取り囲む6コア、および6コアを取り囲む12個の最も外側のコアは、それぞれコア番号1、2-7、および8-19とする。コア間XTの最大値は-40.7 dBであった。最も外側のコア間XTがより大きな値を示した。

5. Lバンド増幅の特性

19コアEDF長を50 mとして、Lバンドで動作するクラッド励起19コアEDFAの利得とNFを測定した。入力信号光には、総パワー7.5 dBmで波長範囲が1575.1 nmから1604.9 nmの6波長のWDM信号光を用いた。図9(a)は、19コアEDFの入力点において33.2 W (45.2 dBm)のクラッドポンプパワーを用いた測定結果である。ここで、クラッドポンプパワーは、MM-LDの出力パワーとポンプコンバイナの挿入損失を用いて導出した。図9(a)におけるクラッドポンプパワー密度は、文献2のLバンドクラッド励起7コアEDFAと同一である。最小利得、最大最小利得の差、およびコア間利得差は、それぞれ15.7 dB、2.2 dB、および1.2 dBであった。1580 nmより長波長の範囲において、NFとコア間NF差はそれぞれ5.8 dBと0.9 dBであった。

図9(b)は、19コアEDFの入力点において22.8 W (43.6 dBm)のクラッドポンプパワーにおける19コアEDFAの最大および最小の利得スペクトルである。クラッドポンプパワーは、7コアEDFAと同じ最大出力パワーを持つように設定した²⁾。利得は12.7 dB以上であった。NFは1580 nmより長波長の範囲で5.7 dB未満であった。

最後に、コア間XTを測定した。波長1590 nm並びに1591 nmの信号光を、それぞれ、選択したコア並びに別のコアに入力した。クラッドポンプパワーと信号光パワーは、それぞれ40 dBmと0 dBmである。図10はLバンドで動作する19コアEDFAのコア間XTである。最悪のXTは-30.2 dBであった。最も外側のコア間XTが大きく劣化している。なお、個別デバイスのコア間XT測定結果より、コア間XTを劣化させている主要因がポンプコンバイナであったことを確認している。

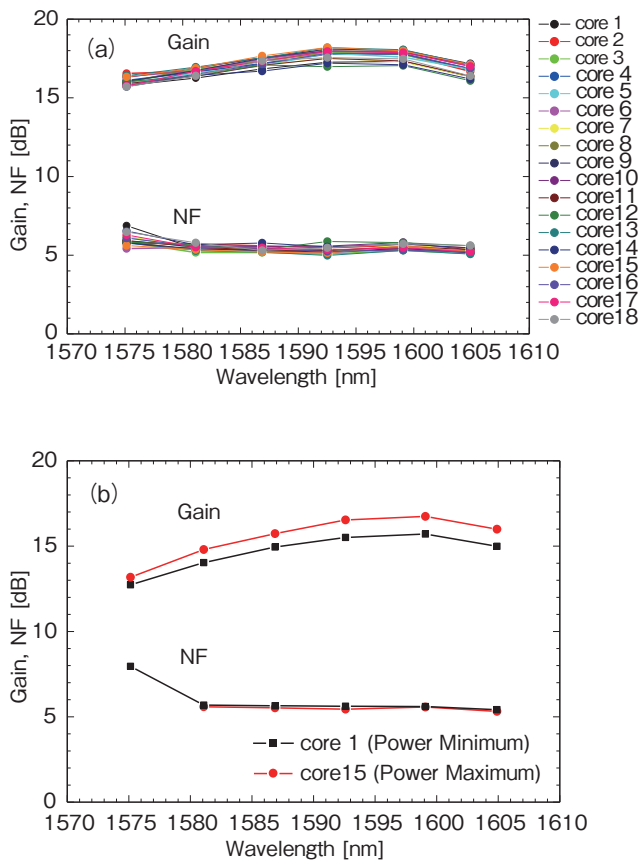


図9 クラッドポンプパワーが33.2 W (a) と 22.8 W (b) の場合の19コアEDFAの利得とNFスペクトル
Gain and NF spectra of the 19-core EDFA measured with cladding pump power of 33.2 W (a) and of 22.8 W (b).

6. 19コアEDFAと7コアEDFAの増幅特性の比較

表1は、文献2の7コアEDFA、並びに、異なるクラッドポンプ励起条件の19コアEDFAにおける、クラッドポンプパワー、クラッドポンプパワー密度、コアあたりのクラッドポンプパワー、コアあたりの平均出力パワー、最大出力パワー、および最小出力パワーを示す。クラッドポンプパワー密度が7コアEDFAと同じ19コアEDFAのコアあたりの平均出力パワーは、7コアEDFAのそれよりも1.8 dB高い。すなわち、文献2の7コアEDFAと同一のクラッドポンプパワー密度での19コアEDFAのクラッドポンプパワー効率、0.9 dBの幾何効果に、1.8 dBの出力パワー増加を合わせて、2.7 dB向上したといえる。

また、文献2の7コアEDFAと同一の最大出力パワーを得る場合の19コアEDFAのコアあたりのクラッドポンプパワーは、7コアEDFAのその56% (-2.5 dB) と大きな削減があることが分かる。

7. おわりに

クラッド励起19コアEDFAの増幅特性を測定し、クラッド励起7コアEDFAのそれと比較することで、コア数増加に伴う増幅特性の違いを明らかにした。

中心コアの利得スペクトルと総出力パワーの19コアEDF長依存性は、次のことを示唆した。19コアEDF長の増加に伴い、利得波長帯は従来のコア励起EDFA同様に短波長から長波長へ移動すること。並びに、総出力パワーは19コアEDF長の増加に伴って増加し、50 mのEDF長のあたりで飽和傾向を示すこと、である。

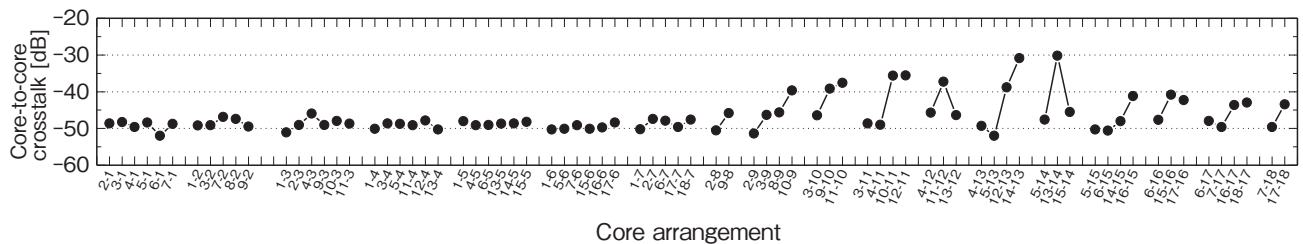


図10 Lバンドで動作するクラッド励起19コアEDFAのコア間XT
Core-to-core XT of the cladding pumped L-band 19-core EDFA.

表1 Lバンドで動作するクラッド励起のEDFAにおけるクラッドポンプパワーと出力パワー
Cladding pump power and output powers for cladding pumped L-band EDFAs.

	Cladding pump power	Cladding Pump power density	Cladding pump power/core	Averaged output power	Maximum output power	Minimum output power	Notes
	W (dBm)	mW/μm ²	W/core	dBm/core	dBm	dBm	
7-core EDFA	15.1 (41.8)	1.05	2.16	22.7	23.3	21.1	Reference 2)
19-core EDFA	33.2 (45.2)	1.05	1.75 (=2.16 × 0.80)	24.5 (=22.7+1.8)	24.9 (core 15)	24.0 (core 1)	The same pump power density with the reference
19-core EDFA	22.8 (43.6)	0.73	1.20 (=2.16 × 0.56)	Not measured	23.3 (core 15)	22.2 (core 1)	The same maximum output power with the reference

Cバンド増幅に最適な19コアEDF長が8 mであることを確認し、Cバンドで動作するクラッド励起19コアEDFAの増幅特性を測定した。MM-LDの出力パワーを35 Wにし、クラッドポンプパワーが33.2 Wの時、総パワー5 dBmで8波長のWDM信号光の入力に対する最小利得とNFは、それぞれ19.1 dBと6.8 dBであった。また、利得とNFのコア間差は、それぞれ1.0 dBと1.1 dBであった。19コアおよび7コアEDFAのコア当たりの平均出力パワーは、それぞれ16.1 dBmおよび15.6 dBmであった。コア数増加に伴う出力パワー増加は、幾何的効果によるクラッドポンプ効率向上の程度である。

Lバンドで動作するクラッド励起19コアEDFAの増幅特性を測定した。19コアEDF長は、Lバンド増幅に最適な50 mとした。総パワー7.5 dBmで6波長のWDM信号光の入力に対する、利得、NF、およびコアあたりの出力は、クラッドポンプパワーが33.2 Wの時、それぞれ15.7 dB、5.8 dB、24.5 dBmであった。この出力パワーは、同一のクラッドポンプパワー密度の7コアEDFAの出力である22.7 dBmよりも1.8 dB大きい。コア数増加に伴うクラッドポンプ効率の増加は、幾何的効果と合わせて2.7 dBであった。一方で、最大出力パワーが7コアEDFAのそれと同一になるクラッドポンプパワーは22.8 Wであった。コア当たりのクラッドポンプパワーは7コアEDFAのその56%であり、クラッドポンプ効率が2.5 dB向上することを確認した。

MC-EDFAのコア数の増大は、クラッドポンプ効率を向上させると結論できるであろう。

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総合研究所の釣谷剛宏様、高橋英憲様、相馬大樹様に感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Jain, T. Mizuno, Y. Jung, A. Isoda, K. Shibahara, J. R. Hayes, Y. Sasaki, K. Takenaga, Y. Miyamoto, S. Alam, and D. J. Richardson, "Improved cladding-pumped 32-core multicore fiber amplifier," ECOC2017, Th.2.D. (2017).
- 2) Y. Tsuchida, K. Maeda, K. Watanabe, K. Takeshima, T. Sasa, T. Saito, S. Takasaka, Y. Kawaguchi, T. Tsuritani, and R. Sugizaki, "Cladding Pumped Seven-Core EDFA Using an Absorption-Enhanced Erbium Doped Fibre," ECOC2016, M.2.A.2 (2016).
- 3) Koki. Takeshima, Takehiro Tsuritani, Yukihiro Tsuchida, Koichi Maeda, Tsunetoshi Saito, Kengo Watanabe, Toru Sasa, Katsunori Imamura, Ryuichi Sugizaki, Koji Igarashi, Itsuro Morita, Masatoshi Suzuki, "51.1-Tbit/s MCF Transmission Over 2520 km Using Cladding-Pumped Seven-Core EDFAs," JLT, vol.34, no. 2, (2016) 761-767.
- 4) S. Takasaka, K. Maeda, K. Kawasaki, K. Yoshioka, H. Oshio, R. Sugizaki, Y. Kawaguchi, H. Takahashi, T. Tsuritani, and M. Shiino, "Increase of Cladding Pump Power Efficiency by a 19-Core Erbium Doped Fibre Amplifier," ECOC2017, Th.2.D.3 (2017).