

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25420351

研究課題名（和文）マルチコアファイバ励起光合波器によるマルチコア光増幅器のインテグレーション

研究課題名（英文）Multi-core optical amplifiers using multi-core pump power couplers

研究代表者

中村 守里也（Nakamura, Moriya）

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：40359071

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：ダブルクラッド型のマルチモードファイバ増幅器について、励起光をファイバ側面からモード結合により入射する方法について、検討を進めた。高次モードを積極的に利用することで結合効率と結合長を改善できる見込みを得た。さらに、得られた成果を基にした光ファイバ増幅システムを用いた光伝送システムへの応用における検討も進め、光無線（Radio on Fiber）システムや多値信号を用いたコヒーレント受信のシステムを含め広い領域においてその応用に関する研究成果を得た。

研究成果の概要（英文）：We investigated pump power coupling technology for side-pumping of double-cladding-type Er-doped multicore fiber amplifier. We clarified that coupling efficiency and coupling length can be improved by controlling high-order modes of the pump power. Furthermore, we studied the applications of the investigated multicore amplifiers in optical fiber communication systems including radio on fiber and multi-level coherent optical communication systems.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光ファイバ通信 光増幅器 マルチコアファイバ

1. 研究開始当初の背景

マルチコアファイバは、通常の光通信で用いられる光ファイバと異なり光信号が伝搬する“コア”を複数持つ(図1)。並列伝送を可能にすることで1本の光ファイバによる伝送容量を飛躍的に倍増させる技術。光ファイバ通信技術の研究において、この1~2年で最も注目を集めている技術の一つである。(コアが高密度になり画像伝送(内視鏡)用として用いられる場合は、イメージファイバとも呼ばれる。)

通常の光ファイバは光信号が伝搬するコアを一つしか持たない(シングルコア)。しかしマルチコアファイバはコアを複数持つことにより、光信号を空間的に高密度で並列に伝送することが可能である(図1)。マルチコアファイバを用いる場合、図2のようにファンイン・ファンアウト部品によって通常の光ファイバを集約することになる。(ファンイン・ファンアウトは、レンズ光学系等によって実現されている。)海底光ケーブルに代表される長距離ケーブルでは、その太さに制限があり、実装できる光ファイバの本数も限りがある。しかしマルチコアファイバを用いることで、空間的に高密度な並列光伝送が可能となる。

ところで、光ファイバは0.2dB/km程度の損失を持つため、数十kmから100kmの間隔で光信号のパワーを増幅する必要がある。光信号の増幅のために、現在最も広く使われているのがエルビウム添加ファイバ増幅器

(Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA)に代表される光ファイバ増幅器である。ハイパワーな励起光でEDFAを励起し、誘導放出によって信号光が増幅されるものである。従って光ファイバ増幅器では、信号光と励起光とを合波するための励起光合波器が必須となるが、通常のシングルコアの光ファイバにおいては、安価で特性の良い合波器が実用化され広く使われている。

一方、マルチコアファイバでは光増幅の方法がまだ確立されていない。一つの方法は、マルチコアファイバの光信号をファンアウトし、並列チャネルのそれぞれをシングルコアの光増幅器で別々に増幅し、再度ファンインでマルチコアファイバに集約し直す方法である。(例えば、R. Ryf, et al., “Space-division multiplexed transmission over 4200-km 3-core microstructured fiber,” OFC2012, PDP5C.2, 2012.)しかしこの場合、並列コア数に比例して光増幅器は大型化し、コストも消費電力も大きくなる。

マルチコアのEDFA (MC-EDFA) によるマルチコア光増幅器を試作し、並列に光信号を増幅しようとする試みがいくつか報告されている。(例えば、H. Takahashi, et al.,

“First demonstration of MC-EDFA-repeatered SDM transmission of 40 x 128-Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6,160-km 7-core MCF,”

ECOC2012, Th.3.C.3, 2012.)しかし、これらの報告の中でもマルチコアファイバの信号はファンアウトされ、図3のように並列チャネルごと別々に励起光と合波された後、ファンインでマルチコア光増幅器に集約される方法が取られている。これは、マルチコアファイバの励起光合波が容易では無いためであり、ファンアウトすること無しに並列信号光と励起光とを合波できないことが本質的な問題であると考えられることができる。

2. 研究の目的

本研究では、マルチコアファイバの信号光と励起光とをマルチコアのまま合波する励起光合波器を実現することで、図4に示すよ

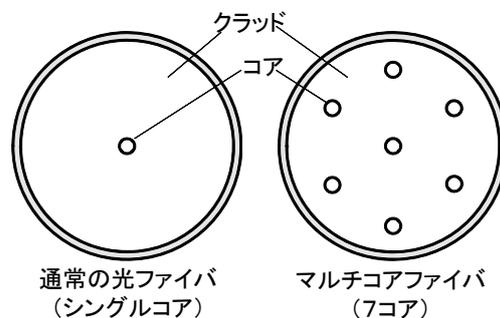


図 1-1. 光ファイバの断面

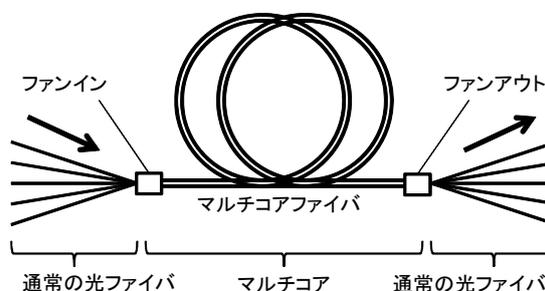


図 1-2. ファンイン・ファンアウトによる光ファイバの集約

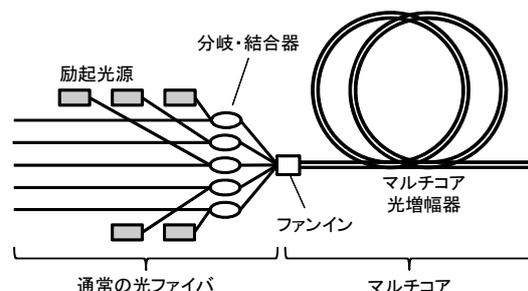


図 1-3. 現在行われているマルチコア光増幅器の励起

うに、ファンイン・ファンアウトの無いシンプルな構成のマルチコア光増幅器を可能とし、小型化、低コスト化及び低消費電力化を実現する。

シングルコアの光ファイバの伝送容量は既に限界に近づいており、マルチコアファイバはその壁を打ち破るための有力な技術と目されている。そのマルチコアファイバで長距離の伝送を行うために光増幅器は必須である。本研究によってマルチコアの励起光合波器が実現された場合、図4に示すようにマルチコア光増幅器の系はファンイン・ファンアウトの無い非常に簡単な構成となり、低消費電力化も可能となる。多く発表されているマルチコア伝送実験でもマルチコアのまま一括増幅が実現された例はない。また、マルチコアの光増幅技術は、単なる長距離伝送のためだけでなくマルチコアファイバによるネットワーク・システムを構成する上でも重要である。

### 3. 研究の方法

本研究における課題を解決する上でキーとなる技術がクラッド励起である。図5のように光ファイバを第一クラッドと第二クラッドを持つダブルクラッド構成とし、励起光を第一クラッド中に伝搬させる方式である。この方式はハイパワーのファイバ・レーザ（ただしシングルコア）で実用化されている。この方式であれば複数のコアを一括に励起することができ、低消費電力化にも寄与すると考えられている。最近、実際にダブルクラッド構造のマルチコア光増幅器を試作・評価した報告があった。(K. S. Abedin, et al., “Cladding-pumped erbium-doped multicore fiber amplifier,” Opt. Express, vol. 20, p. 20191, 2012.) しかしこの報告でも、信号光と励起光とはファンインを用いてシングルコア光ファイバからマルチコア光増幅器に集約され、評価が行われている。マルチコアの光信号をマルチコアのまま図4のように増幅した報告はない。

<熔融型光ファイバ分岐・結合器の技術を用いる方法>

二本の光ファイバを束ねた状態で加熱熔融し軸方向に延伸することによって隣接コア間にモード結合が生じる。(ただし、大きなモード結合を得るためには、隣接するコア同士の構造が同一（伝搬定数が等しい）であることが必要。）この現象を用いた光ファイバの分岐・結合器が実用化されている。これをマルチコアファイバに応用する。図6のように、クラッドモードと等しい伝搬定数を持つシングルコアの光ファイバを隣接させ、励起光をマルチコアファイバの第一クラッドへ結合させる。マルチコアファイバでは、コアが二次元に分布しているため、熔融・延伸時におけるファイバの“ゆがみ”等の影響や

コアへの微弱なモード結合の影響等確認する必要がある。また、通常の光ファイバの分岐・結合器と異なり、全く同質の光ファイバ同士の結合ではないため、最適な熔融・延伸方法の条件出し等の検討も必要となる。

<マルチコアファイバ側面の加工によりクラッドへ励起光を入射する方法>

側面加工により励起光を入射する方法はいくつか考えられる。図7はその一つであり、側面にV溝加工を施し、そこへ励起光を集光・反射させることでクラッドモードを伝搬させる。実際にはマルチコアファイバの場合、コアが二次元に広く分布するため、V溝加工に困難が生じる。加工精度とファイバ構造の関係等、検討が必要である。

<レンズ系を用いる方法>

空間光学系によって励起光を合波する方法が考えられるが、シングルモードのコア間の結合には高い位置決め精度が求められる。図8は、ロッドレンズを用い、V溝上におけるファイバの突合せで精度が出せるよう検討を進めているものであるが、取差の影響や安価なアセンブリ方法等の検討が必要である。

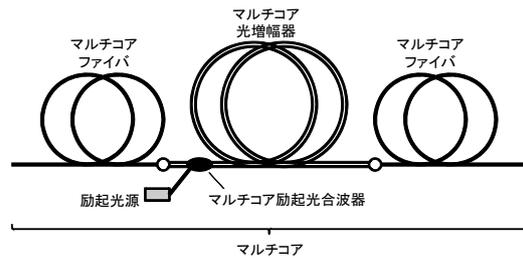


図 2-1. マルチコア励起光合波器を用いたマルチコア光増幅器の構成

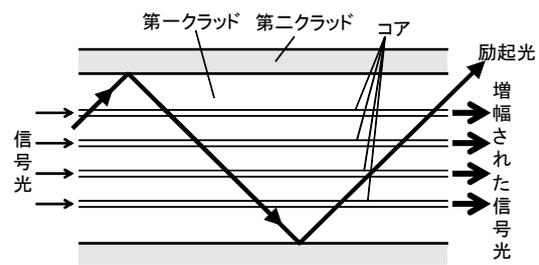


図 2-2. マルチコア光増幅器のクラッド励起

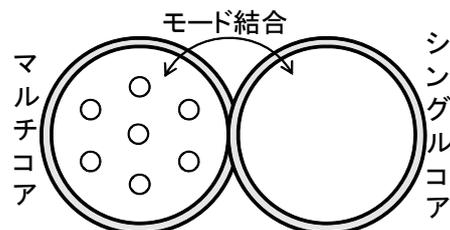


図 2-3. 第一クラッドへの励起光の結合

#### 4. 研究成果

まず、ビーム伝搬法 (BPM) による計算により、並行したマルチモードファイバ (MMF) 間のモード結合の様子を計算した。計算を行う MC-EDFA は、第一クラッドの直径を 100 [μm] とし、さらに簡単のためコア部分の計算を省略する形とした。また、使用波長は 1480 [μm]、比屈折率差を 0.35 [%] とした。このような構造を持つマルチモード導波路を接触させた状態で平行に配置し、片側の光ファイバから LP01、LP11 (a)、LP21、LP31 モードの光を選択的に入射させ、それぞれのモードにおける完全結合長と結合効率の計算を BPM により行った。LP01 モードを入射した場合におけるモ

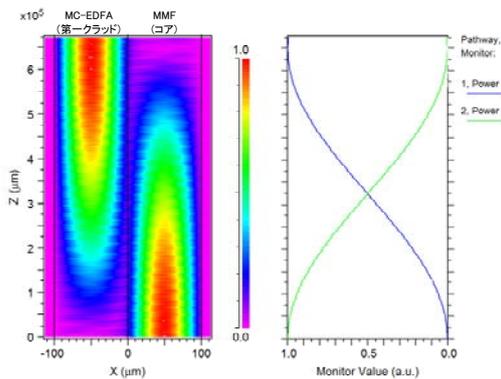


図 4-1. LP01 モードにおけるモード結合計算

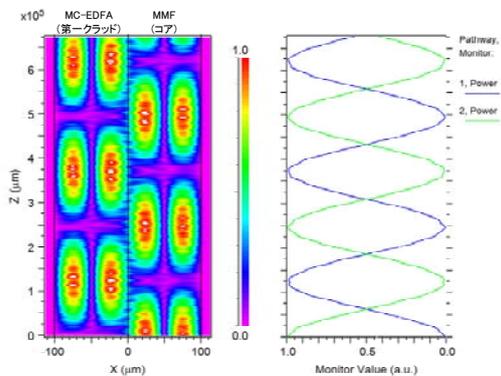


図 4-2. LP11(a) モードにおけるモード結合計算

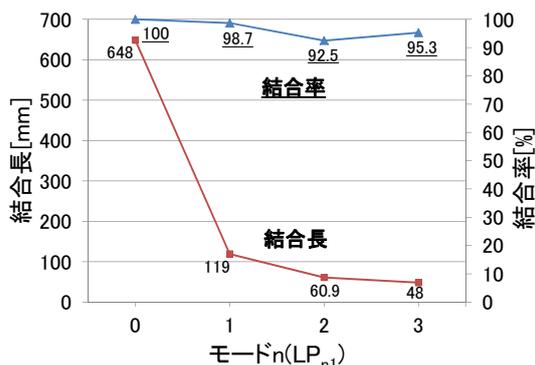


図 4-3. 各 LP モードの完全結合長と結合率

ード結合計算の結果を図 4-1 に示す。完全結合長は 648 [mm]、結合率はほぼ 100 [%] となった。また LP11 (a) モードの場合における計算結果を図 4-2 に示す。結合長は 119 [mm] と短くなり、結合率は 98.7 [%] となった。図 4-3 は、LP21、LP31 モードに関しても同様の計算を行い、結果をまとめたものである。高次のモードを用いることにより、完全結合長が大幅に短くなっている。高次のモード結合を利用した MC-EDFA への励起光入射を検討し、励起光に高次モードを用いることによって、MC-EDFA の第一クラッドへの短距離かつ高効率な励起光の入射が可能となる見込みが得られた。またさらに、コア径等のファイバパラメータを変化させた場合におけるマルチモードのモード結合の様子を定量的に評価した他、得られた成果を基にした光ファイバ増幅システムを用いたシステムへの応用における検討も実施した。これらは、光無線 (Radio on Fiber) システムや多値信号を用いたコヒーレント受信のシステムを含み広い領域をカバーしながら、その応用に関する研究を進め、学会発表を行った。下に記載するように雑誌論文への掲載は 3 件であるが、既に国際会議等において学会発表を行った成果が 15 件あり、それらについても現在論文文化を進めているところである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

K. Osato and M. Nakamura, "Two-tone signal generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator for third-order harmonics suppression," *IEICE Commun. Express*, vol. 6, no. 5, pp. 204-208, Feb. 2017.

R. Nakamura, K. Amino, K. Sekine, K. Wada, and M. Nakamura, "Multi-level pre-equalization using binary analog FIR filters based on 28-nm FD-SOI for 20-Gb/s 4-PAM multi-mode fiber transmission," *IEICE Commun. Express*, vol. 6, no. 4, pp. 154-159, Jan. 2017.

S. Owaki and M. Nakamura, "Compensation of optical nonlinear waveform distortion using neural-network based digital signal processing," *IEICE Commun. Express*, Article ID: 2017XBL0078, May 2017.

[学会発表] (計 15 件)

小池達也, 中村守里也, クラウド・ヴェルナ二, 淡路祥成, 和田尚也, "高次モード結合

を利用したダブルクラッド型マルチコアファイバの励起法,” 電子情報通信学会総合大会, B-10-54, Mar. 2015.

T. Koike, M. Nakamura, W. Klaus, Y. Awaji, and N. Wada, “Pumping method for multi-core erbium-doped double-clad fiber amplifier based on higher-order mode coupling,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2015, Shanghai, China), WPe.48, Jul. 2015.

R. Nakamura, T. Koike, M. Nakamura, W. Klaus, Y. Awaji, and N. Wada, “Pumping method for 7-core erbium-doped double-clad fiber amplifier,” The 7th International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies and International Symposium on extremely advanced transmission technology (ISUPT/EXAT2015, Kyoto, Japan), P-24, Jul. 2015.

R. Nakamura, T. Koike, M. Nakamura, W. Klaus, Y. Awaji, and N. Wada, “Pumping of 7-core erbium-doped double-clad fiber amplifier based on higher-order mode coupling,” Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD2015, Taipei, Taiwan), MP13, Sep. 2015.

F. Murakami and M. Nakamura, “Mode coupling between multi-mode fibers with different radii,” IEEE International symposium on circuits and systems (ISCAS2016, Montreal, Canada), ReSMiQ-Meiji-ISEP Symposium 2016, no. 8, May 2016.

K. Osato and M. Nakamura, “Distortion suppression in two-tone signal generation using a DP-QPSK modulator,” IEEE International symposium on circuits and systems (ISCAS2016, Montreal, Canada), ReSMiQ-Meiji-ISEP Symposium 2016, no. 2, May 2016.

K. Osato and M. Nakamura, “Third-order harmonics suppression in two-tone signal generation using a dual-parallel mach-zehnder modulator,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2016, Niigata, Japan), WA2-18, Jul. 2016.

R. Nakamura, K. Amino, K. Sekine, K. Wada, and M. Nakamura, “Multi-level pre-equalization using analog FIR filters based on 28-nm FD-SOI for 20-Gb/s 4-PAM multi-mode fiber transmission,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2016, Niigata, Japan),

WA2-37, Jul. 2016.

S. Owaki and M. Nakamura, “Equalization of optical nonlinear waveform distortion using neural-network based digital signal processing,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2016, Niigata, Japan), WA2-40, Jul. 2016.

K. Osato and M. Nakamura, “Quadruple frequency two-tone signal generation using a DP-QPSK modulator,” to appear in Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017, Singapore), P1-145, Aug. 2017.

S. Owaki and M. Nakamura, “Simultaneous compensation of waveform distortion caused by chromatic dispersion and SPM using a three-layer neural-network,” to appear in Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017, Singapore), P2-006, Aug. 2017.

Y. Fumumoto, S. Owaki, and M. Nakamura, “Effect of number of neurons of a neural-network on compensation performance of SPM non-linear waveform distortion,” to appear in Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017, Singapore), P2-012, Aug. 2017.

S. Kashiwagi, R. Nakamura, and M. Nakamura, “Novel twin-SSB-SC method using a DP-QPSK modulator,” to appear in Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017, Singapore), P2-013, Aug. 2017.

Y. Takanashi, S. Owaki, R. Nakamura, and M. Nakamura, “SPM and phase-noise compensation using a time-division-multiplexed and intensity modulated pilot-carrier,” to appear in Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017, Singapore), P2-014, Aug. 2017.

N. Sumimoto, R. Nakamura, and M. Nakamura, “SPM and phase-noise compensation using a polarization-multiplexed and intensity-modulated pilot-carrier,” to appear in Optoelectronics and Communications Conference (OECC2017, Singapore), P2-028, Aug. 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 守里也 (NAKAMURA, Moriya)

明治大学・理工学部・准教授

研究者番号：40359071

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

淡路 祥成 (AWAJI, Yoshinari)

国立研究開発法人情報通信研究機構・研究マ  
ネージャー

研究者番号：50358876

ヴェルナー クラウス (KLAUS, Werner)

国立研究開発法人情報通信研究機構・主任研  
究員

研究者番号：20358914

坂口 淳 (SAKAGICHI, Jun)

国立研究開発法人情報通信研究機構・主任研  
究員

研究者番号：40540034

(4) 研究協力者

なし