



マルチコア光ファイバ増幅技術の最新動向と今後の展望

古河電気工業株式会社 フォトニクス研究所 主席研究員

たかさか しげひろ
高坂 繁弘



1. はじめに

単一コアのエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier)は標準の光ファイバ増幅器として光ファイバ通信システムに広く採用されている。マルチコア(MC: MultiCore) EDFAは、単一コアEDFAよりも小型化と低消費電力化が期待される光ファイバ増幅器である。

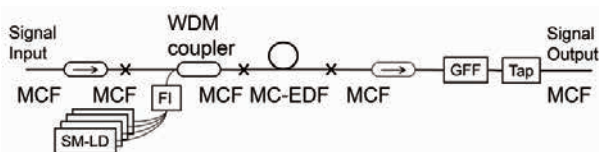
小型化は、マルチコアEDF(MC-EDF)をはじめアイソレータや波長分割多重(WDM) フィルタなどのマルチコア光デバイスと従来の単一コア型デバイスがほぼ同じ大きさで、部品点数がほぼ同じであることによる。MC-EDFAの実装体積は単一コアEDFAとほぼ同一であるため、コア当たりの体積がコア数分割程度に小さくなる。コア励起4コアEDFAは、実装体積の縮小や単一コアEDFAと同等の増幅特性に向けた改善が行われている。

低消費電力化は、クラッド励起型のMC-EDFAにのみ期待される。クラッド励起MC-EDFAの励起光源であるMM-LD(Multi-Mode Laser Diode)の電気-光変換効率が、コア励起型MC-EDFAの励起光源であるシングルモードLDのおよそ1.5倍あるためである。しかし、クラッド励起光がエルビウム添加コアに吸収される効率が著しく低いため、効率を向上させる試みがなされてきた。最近、Cバンドにおいては結合型12コアEDFAのコア当たりの消費電力が単一コアEDFAよりも低い消費電力に達した^[1]。Lバンドにおいては非結合型19コアEDFAのコア当たりの消費電力が単一コアEDFAと同等の消費電力に達した^[2]。

本稿では、小型化が期待されるコア励起MC-EDFA技術と低消費電力化が期待されるクラッド励起MC-EDFA技術の最新動向と今後の発展方向を紹介する。

2. コア励起MC-EDFA

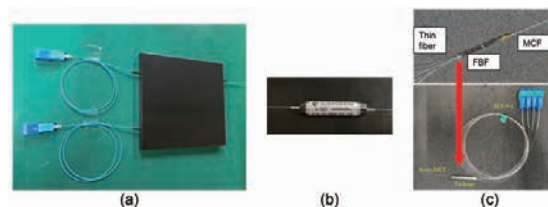
コア励起MC-EDFAの構成例を図1に示す。信号光の入



■ 図1. コア励起MC-EDFAの構成例。矢印: アイソレータ、×印: 融着点、GFF: 利得等価フィルタ、FI: ファンイン

出力は伝送用MCF(MultiCore Fiber)に融着接続することを想定している構成である^[3, 4]。励起光源の数がコア数と同じであるため、消費電力は単一コアEDFAと同一である。光学系は、信号光が伝搬するファイバがMCFで、光デバイスがマルチコアデバイスであることを除き単一コアEDFAと同一の構成であるため、実装体積も単一コアEDFAと同一になる。そのため、コア当たりの体積はコア数で分割した程度に小さくなる。

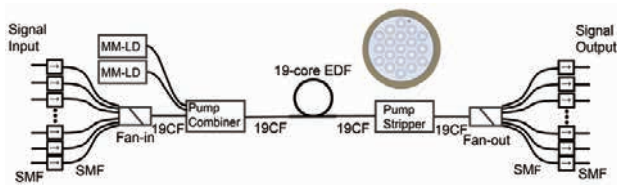
図2(a)は、図1からGFFとTapを省いた光学系を収納した124×135×10(mm³)の筐体の外観写真である。2本の入出力4コアファイバと4本のポンプ入力ファイバが筐体から出ている。4コアアイソレータの寸法はφ5.5×27mm(図2(b))^[5]、ファイババンドル型4コアFIの寸法は3×3.5×45(mm³)(図2(c))^[6, 7]である。4コアEDFAや光デバイスの寸法が、単一コアEDFAや単一コア用の光デバイスとほぼ同一であることが分かる。MCFの接続には、自動調芯機能を持つ融着器を用いた。2電極放電と3電極放電による平均融着損失は、それぞれ0.07dBと0.02dBと、単一コアファイバの融着損失と同等である^[8-10]。調芯を含む融着時間は、マーカ付き4コアファイバで90秒と短い。増幅特性は、1-2dB程度雑音指数(NF)が大きいものの単一コアEDFAと同一の利得が1dB未満のコア間利得差で得られている。光デバイス等による挿入損失の改善により、NFも単一コアEDFAと同一に近付くであろう。



■ 図2. コア励起4コアEDFA(a)、4コアアイソレータ(b)、ファイババンドル型FI(c)の外観写真

3. クラッド励起MC-EDFA

クラッド励起MC-EDFAの構成例を図3に示す^[2]。クラッドに励起光を伝搬させるために、図3中の19コアEDFの断面写真に示されるようにガラスクラッドの外側に低屈折率樹脂を被覆することでダブルクラッド構成をなす。ポンプコン

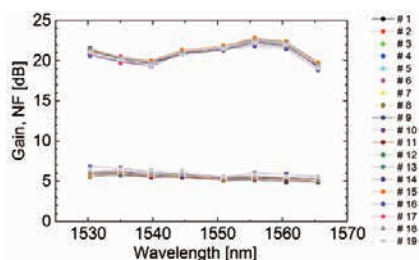


■ 図3. クラッド励起MC-EDFAの構成例。MCFはダブルクラッドファイバ。矢印：アイソレータ

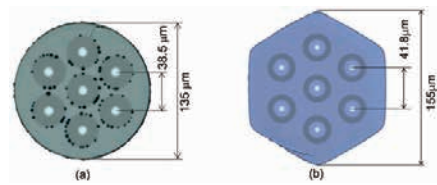
バイナにおいてMM-LDの出力光が内側クラッドに入射され、MC-EDFからの残留励起光をポンプストリッパで除去する点がコア励起構成と異なる。FIFOの外側に単一コアのアイソレータが設置されているが、マルチコアのアイソレータに置き換えると実装体積が小さくなる。図4にCバンドクラッド励起19コアEDFAの増幅特性を示す^[11]。増幅特性の形状は単一コアEDFAと同一であり、コア間利得差は1dB未満である。NFは光デバイスの挿入損失のために1dB程度大きい。

クラッド励起効率の低いことがクラッド励起型の課題である。MC-EDFの内側クラッド径が大きいいため、クラッドポンプ光の伝搬を計算しMC-EDFの最適化を行うことが困難である。そのため、クラッド励起効率を向上させる項目を実験的に確認してきた^[12]。その項目は、第1にクラッド径の縮小である^[13]。クラッド励起パワー密度に出力が比例するからである。第2にコア径の拡大である。これはクラッド励起光がコアに衝突する確率を向上させると考えられる。第3にコア数の拡大である^[14]。同一のコア特性とコア密度である場合、コア数が多いと利得が高い。クラッド励起光を散乱する効果が高いと考えられる。

以上の項目をすべて反映させ、クラッド径166 μm 、コア間距離30 μm 、モードフィールド径7 μm 、の19コアEDFを作製した。EDF長を8mに設定するとCバンド帯の増幅を行いポンプパワー 28W、-5dBm/coreの入力に対し17.5dBm/coreの出力が得られたが^[4]、実用に必要とされる20dBm/coreに出力が達していない。一方で、EDF長を50mに設定するとLバンド帯の増幅を行え、ポンプパワー 28W時に、7.5dBm/coreの入力に対し24.3dBm/coreと高い出力が得られる^[4]。



■ 図4. クラッド励起19コアEDFAの増幅特性例。入力信号光パワーは-5dBm/core。ポンプパワーは35W^[11]。



■ 図5. クラッドに空孔を挿入した7コアEDF (a)^[15]、六角形クラッドの7コアEDF (b)^[16]。

20dBm/coreの出力は11.2Wのポンプ光で得られ、消費電力は単一コアEDFAと同等の1.2W/coreである。長いEDF長が低いクラッド励起効率を補っていると考えている。

最近、さらにクラッド径を90 μm と小さくしコア密度を高めた12コアEDFは、ついにEDF長が短尺となるCバンドにおいても単一コアEDFAを下回る低消費電力を達成した^[1]。この12コアEDFのコア間距離は15.5 μm と縮小されるため、結合型MC-EDFとして動作する。コア間距離が、例えば30 μm 以上必要な非結合型におけるCバンド動作での利得向上が残った課題である。

さらにクラッド励起効率を向上させる項目として、クラッド内にミー散乱体として空孔を挿入する^[15]、クラッド形状を円から六角形に変える^[16]、などが有効であることが確認されている。このような技術が、クラッド励起MC-EDFAの消費電力削減に寄与するだろう。

4. おわりに

小型化が期待されるコア励起MC-EDFA技術と低消費電力化が期待されるクラッド励起MC-EDFA技術の最新動向と今後の技術の方向性について紹介した。

参考文献

- [1] T. Sakamoto et al, ECOC 2023, We.C3.3 (2023).
- [2] S. Takasaka et al, ECOC 2022, Th2A.4 (2022).
- [3] Y. Wakayama et al, OFC 2022, Th2A.5 (2022).
- [4] T. Ohtsuka et al, OFC 2023, M1B.4 (2023).
- [5] K. Iwasaki et al., ECOC 2023, P13 (2023).
- [6] T. Sasaki et al, OECC 2022, TuC4-3 (2022).
- [7] V. I. Kopp et al., OFC 2022, Th1E.2 (2023).
- [8] M. Ohzeki et al., OFC2022, M4E.4 (2022).
- [9] T. Kremp et al, ECOC 2022, Tu3A.3 (2022).
- [10] T. Fujii et al., OFC2023, Th2A.10 (2023).
- [11] S. Takasaka et al., ECOC 2018, Th1K.2 (2018).
- [12] S. Takasaka, ECOC 2021, Tu1A.1 (2021).
- [13] Y. Tsuchida et al., ECOC2016, M.2.A.2 (2016).
- [14] S. Takasaka et al., ECOC 2017, Th.2.D (2017).
- [15] S. Takasaka et al., ECOC 2020, Th2A (2020).
- [16] K. Maeda et al, ECOC 2023, P10 (2023).