

マルチコアファイバ用ファンイン／ファンアウトデバイス

国立大学法人 北海道大学 齊 藤 晋 聖¹

光電子技術研究所 植 村 仁²・竹 永 勝 宏³・大 道 浩 児⁴・松 尾 昌一郎⁵

Fan-in/Fan-out Devices for Multi-core Fiber

K. Saitoh, H. Uemura, K. Takenaga, K. Omichi, and S. Matsuo

光ファイバ 1 本あたりの伝送容量をさらに拡大する技術として、マルチコアファイバを用いた空間多重伝送が注目されている。この空間多重伝送の実現には、マルチコアファイバの各コアとシングルモードファイバを接続するファンイン／ファンアウトデバイスが必須である。本稿では、光増幅器用と伝送用の 2 種類のマルチコアファイバに対して接続損失を低減できるような異なるアプローチで設計した 2 種類のファンイン／ファンアウトデバイスの試作結果を報告する。作製したデバイスを短尺のマルチコアファイバの両端へ融着接続して 2 箇所の接続点を含む光学特性を評価し、いずれのデバイスにおいても、平均挿入損失 2.0 dB 以下、クロストーク -40 dB 以下という実用的な値を確認した。

Spatial division multiplexing (SDM) over a multi-core fiber (MCF) is one of the most promising technologies for further expansion of transmission capacity. To realize the SDM transmission, fan-in/fan-out devices are indispensable for connecting single mode fibers and each core of the MCF. In this paper, design, fabrication technique and optical properties of the fan-in/fan-out devices are reported. Two types of the devices are fabricated. Each of them is optimized for minimizing the splice loss with two different MCFs in different approaches respectively. One MCF is used for an optical amplifier and the other is used for the SDM transmission. They are spliced to both ends of the short MCFs and optical properties including two splice points are evaluated. In both types of devices, average insertion loss of less than 2.0 dB and crosstalk of less than -40 dB have been confirmed.

1. ま え が き

現状の光通信システムでは、シングルモードファイバ (Single mode fiber, 以下 SMF と記す) が主要な伝送路として用いられている。SMF を用いた光通信の伝送容量は、TDM, WDM などの多重化技術や、多値位相変調とデジタル信号処理を用いたデジタルコヒーレント通信技術の進展により飛躍的に増大した。しかしながら、これらの技術を活用しても光ファイバ 1 本あたりの伝送容量拡大のペースは減速してきており、既存の SMF を利用した伝送システムの伝送容量は光ファイバ 1 本あたり 100 Tbps が限界であるといわれている¹⁾。

この伝送容量限界を打破するための革新的な技術のひとつとして、マルチコアファイバ (Multi-core Fiber, 以下 MCF と記す) を用いた空間多重伝送に注目が集まっている。MCF は 1 本の光ファイバ中に複数のコアを設けたファイバであり、これらのコアに独立した光信号

を送信することで、光ファイバ 1 本あたりの伝送容量を飛躍的に拡大することができる。この MCF を用いた伝送実験は数多く行われており、伝送容量が 1 Pbps に達した報告もある²⁾。

MCF を用いた光通信システムの実用化には、MCF の各コアと SMF を接続するファンイン／ファンアウト (Fan-in/Fan-out, 以下 Fi/Fo と記す) デバイスが必要となる。表 1 は、これまでに提案されている Fi/Fo デバイスの代表例である。ファイババンドル型は、MCF のコア間距離と同じクラッド径となる細径 SMF をコア数分束ねたデバイスであり、コア配置に制限はあるものの比較的低コストかつ簡便に作製することが可能である³⁾。溶融延伸型は、複数のファイバを束ね溶融延伸することで MCF と同等のコア配置を実現する方式であり、生産性に優れ、低コストで実用性の高いデバイスの実現が期待されている^{4) 5)}。空間光学型は、レンズを用いて MCF と複数の SMF を空間結合するデバイスであり、レンズ系の調整により低挿入損失、低クロストークを実現することができる⁶⁾。また、平面光導波路型として、PMMA などの高分子材料を用いて 3 次元導波路を形成し、MCF とバットジョイント接続する方式などが報告されている⁷⁾。

1 国立大学法人北海道大学大学院情報科学研究科 教授

2 シリコン技術研究所

3 光ファイバ技術研究部主査

4 シリコン技術研究部グループ長

5 光ファイバ技術研究部長 博士 (工学)

略語・専門用語リスト

略語・専門用語 正式表記

説 明

TDM	Time Division Multiplexing	時分割多重通信。複数の異なる信号を時間的に配列して伝送する方式。伝送容量を拡大する方策のひとつ。
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重通信。複数の異なる波長の光信号を同時に伝送する方式。伝送容量を拡大する方策のひとつ。
MFD	Mode Field Diameter	モードフィールド径。ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。主として接続のし易さを示すときに用いられる。
A_{eff}	Effective Core Area	実効コア断面積。ファイバ中を伝搬する光の電界分布の広がりを示す指標のひとつ。主として非線形現象の起こりにくさを示すときに用いられる。
NFP	Near Field Pattern	近視野像。導波路端での光の分布を示しており、電界分布と関連づけられる。

これらの方式のなかで、われわれは将来的に低コストで大量生産が可能な熔融延伸型のFi/Foデバイスを開発している。この熔融延伸型は、MCFと融着接続可能という利点があるため、高出力光への耐性に優れ、高い信頼性を有するデバイスの実現が期待できる。本稿では、接続するMCFのコア仕様に合わせ、異なるアプローチで設計した2種類の熔融延伸型Fi/Foデバイスを報告する。

2. 熔融延伸型 Fi/Fo デバイス

図1は、熔融延伸型Fi/Foデバイスの作製工程を示す概念図である。最初に、MCFのコア数分の延伸用ファイバを多孔ガラスキャピラリに挿入する。次に、ガラスキャピラリを加熱しキャピラリとファイバを熔融・一体化し延伸する。延伸前と延伸後のキャピラリ径の比率を延伸比と定義すると、Fi/Foデバイス延伸後のコア間距離は延伸前のガラスキャピラリの孔間隔と延伸比によって決まる。そのため、適切な延伸比で延伸・切断することで、MCFと同等のコア間距離を得ることができる。しかしながら、熔融延伸型Fi/Foデバイスでは、延伸比に応じて延伸用ファイバのコア径が小さくなるため、延伸前（SMF端）と延伸後（MCF端）でMFDが変化する。実際の伝送路では、Fi/Foデバイスの両端にSMF、MCFを接続するため、それぞれの接続点においてMFD差に応じた過剰な接続損失が発生する。そのため、本デバイスではSMF端、MCF端の両端でのMFD差を小さくする延伸用ファイバの設計が重要となる。われわれは、SMF端、MCF端の両端においてMFD差を低減できる延伸用ファイバとして、

MFDの小さなMCFには高 Δ コアファイバ⁴⁾を、MFDの大きなMCFには2段コアファイバ⁵⁾を用いている。これらの延伸用ファイバ、およびそれらを用いたFi/Foデバイスの試作・評価結果について以下で述べる。

2. 1 高 Δ コアファイバを用いた Fi/Fo デバイス

近年、MCF用の光増幅器への応用を目指しマルチコアエルビウム添加ファイバ（Multi-core Erbium doped fiber, 以下MC-EDFと記す）が作製されている⁸⁾。このMC-EDF各コアのMFDは、一般的なEDFと同様に小さい。MC-EDFは、光増幅器として使用する際には高出力の励起光が入力される。そのため、MC-EDFとFi/Foデバイスの接続部に屈折率整合樹脂などガラス以外の物質が介在する場合、ガラスと介在物の界面における発熱や、温度上昇に起因する介在物の物性変化により光学特性が劣化することが懸念される。熔融延伸型Fi/Foデバイスは融着接続によりMC-EDFとFi/Foデバイスを直接接続するので、介在物は無くこの問題は構造的に発生しない。このため、MC-EDF用のFi/Foデバイスとしては熔融延伸型が適していると考えられる。

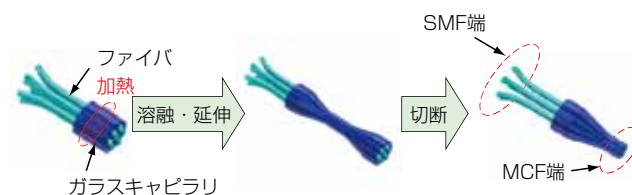


図1 熔融延伸型Fi/Foデバイス作製の概念図
Fig. 1. Schematic view of fabrication process of fused taper type Fi/Fo device.

表1 Fi/Foデバイスの代表例
Table 1. Typical types of Fi/Fo device.

方 式	ファイババンドル型	熔融延伸型	空間光学型	平面光導波路型
概念図				

しかし、通常のSMFと同等のコア設計で、クラッド径125 μm のファイバをキャピラリに挿入し延伸する場合、一般的なMCFのコア間距離 30–50 μm と整合させるためには、延伸比が4倍程度必要となる。その結果、延伸後にコアが細径化して光の閉じ込めが弱くなるため、延伸部での過剰損失が大きくなる。また、光の閉じ込めが弱くなることで延伸後のMFDは延伸前のSMFより大きくなり、MFDの小さなMC-EDFとの接続部においてMFD不整合による過剰な接続損失が生じる。この問題に対して、われわれはクラッド径が小さく、コアの比屈折率差 Δ が大きなファイバ（高 Δ コアファイバ）を用いる手法を提案している⁴⁾。コア Δ を大きくすることで光の閉じ込めを強くし、かつクラッド径を小さくすることでコア間距離をMCFと整合させるために必要な延伸比率を低減した。その結果、延伸後でもコアの光の閉じ込めを維持できる。このようなファイバを用いて熔融延伸型Fi/Foデバイスを試作した。作製したFi/Foデバイスの断面写真とNFP測定結果を図2に示す。図2(a), (c)から、延伸後においてもMFDの拡大を抑制できることが分かる。また、図3にMC-EDFの断面写真を示す。

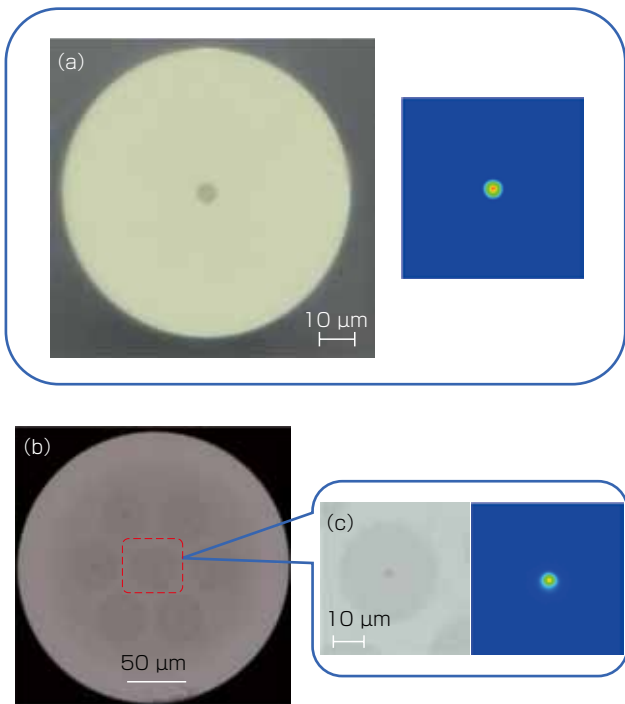


図2 高 Δ コアファイバを用いたFi/Foデバイス
(a) Fi/FoデバイスSMF端の断面図(左) およびNFP(右)
(b) Fi/FoデバイスMCF端の断面写真
(c) Fi/FoデバイスMCF端中心コアの拡大写真(左) およびNFP(右)
Fig. 2. High- Δ core fiber based Fi/Fo device.
(a) Cross-sectional view of the Fi/Fo device at SMF end (left) and its NFP (right).
(b) Cross-sectional view of the Fi/Fo device at MCF end.
(c) Zoom-up image of cross-sectional view for center core (left) and its NFP (right).

図2(b)に示すFi/FoデバイスのMCF端がMC-EDFとほぼ同等のコア配置を実現できていることが分かる。

更に、MC-EDFとFi/Foデバイスを、特殊光ファイバ融着接続機FSM-100 P+⁹⁾を用いて融着接続した。この融着接続機は端面観察機能、画像処理によるファイバ非軸方向の角度自動調心機能、および放電電極を上下に振ることで広範囲を均一に加熱する機能を有しており、これらの機能を活用することでMCFの全コアを均一に低損失で融着接続することができる¹⁰⁾。短尺のMC-EDFの両端にFi/Foデバイスを融着接続し、本デバイスが伝送路に使用される系を模擬した。この系において、各コアの挿入損失に加え、コア間の信号漏話（クロストーク）を測定した。ここで、MC-EDFは波長1550 nm付近の吸収が大きいため、測定は吸収が比較的小さい1625 nmでおこなった。挿入損失とクロストークの測定結果を図4に示す。横軸のコア番号は0が中心コアを、1–6が外周コアを表している。クロストークは対象コアの最悪値をプロットしている。7コアの平均挿入損失は2.0 dB、クロストークは−50 dB以下と良好な光学特性が得られた。

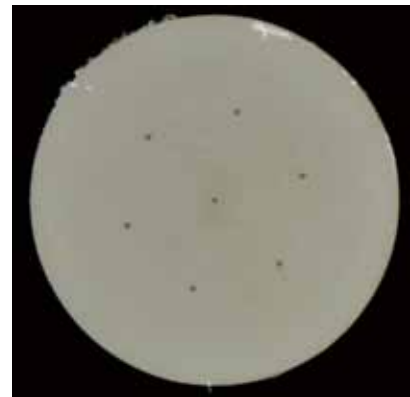


図3 MC-EDF断面写真
Fig. 3. Cross-sectional image of MC-EDF.

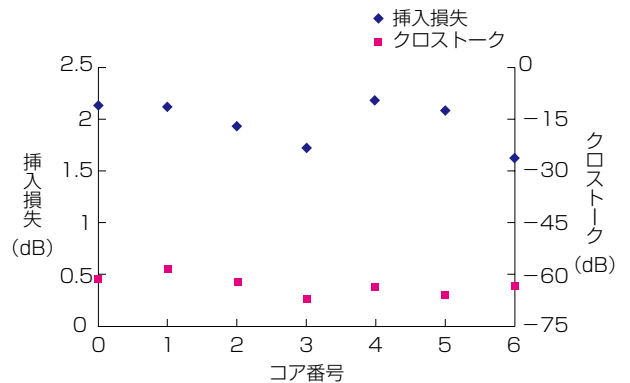


図4 高 Δ コアファイバを用いたFi/Foデバイスの挿入損失、およびクロストークの測定結果
Fig. 4. Measurement results of insertion loss and crosstalk of high- Δ core fiber based Fi/Fo device.

2. 2 2 段コアファイバを用いたFi/Foデバイス

近年、伝送用MCFのひとつとして、非線形現象の抑制などを意図した A_{eff} 拡大MCFが開発されている。このMCFはMFDが大きいいため、前述の高 Δ コアファイバを用いたFi/FoデバイスではMCF端でのMFD不整合による接続損失が大きくなる問題がある。この課題を解決する手法として、2段コアファイバを延伸用ファイバとする手法がある^{5), 11)}。図5は、2段コアファイバを用いたFi/Foデバイスの動作原理を示す概念図である。このファイバは、図に示すように2段の階段型屈折率分布を持ち、延伸前（SMF端）は主に中心コアを光が伝搬

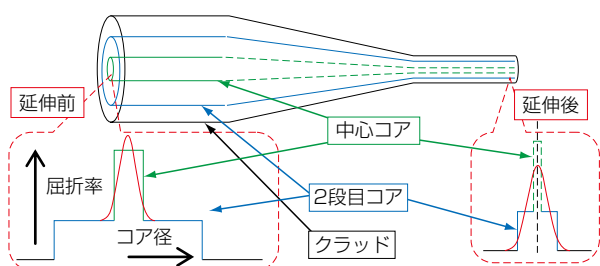


図5 2段コアファイバを用いたFi/Foデバイスの動作原理

Fig. 5. Operation principle of double-core fiber based Fi/Fo device.

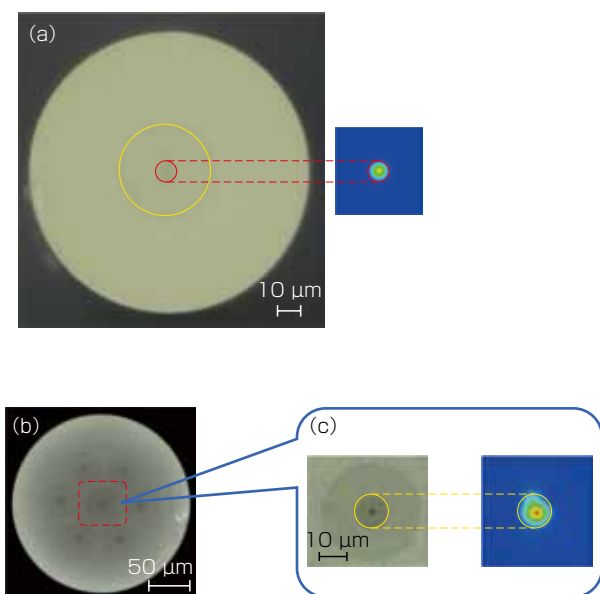


図6 2段コアファイバを用いたFi/Foデバイス
(a) Fi/FoデバイスSMF端の断面図(左) およびNFP(右)
(b) Fi/FoデバイスMCF端の断面写真
(c) Fi/FoデバイスMCF端中心コアの拡大写真(左) およびNFP(右)

Fig. 6. Double-core fiber based Fi/Fo device.

- (a) Cross-sectional view of the Fi/Fo device at SMF end (left) and its NFP (right).
- (b) Cross-sectional view of the Fi/Fo device at MCF end.
- (c) Zoom-up image of cross-sectional view for center core (left) and its NFP (right).

搬する。この中心コアは一般的なSMFと同等の約10 μm のMFDを有しているため、SMF端において低損失でSMFと融着接続できる。一方、延伸後は、延伸によりコア径が小さくなるため中心コアに伝搬モードが存在せず、外周の2段目コアを光が伝搬するようになる。このとき、MFDは2段目コアの Δ 、コア径、延伸比により決定される。今回、MFDが12 μm の A_{eff} 拡大MCFとの接続を想定し、2段コアファイバを作製した。Fi/Foデバイスを試作し、延伸前後でのNFPを観察した。延伸前後での断面写真とNFPを図6に示す。図6(a)から、延伸前は中心コアに光が集中し、図6(c)から延伸後では2段目コアを光が伝搬していることが確認できた。また、図7に接続する A_{eff} 拡大MCFの断面図を示す。図6(b)に示すFi/FoデバイスのMCF端がMCFとほぼ一致したコア配置であると確認できた。

試作したFi/Foデバイスを短尺の A_{eff} 拡大MCFの両端に融着接続し、2箇所接続点を含む挿入損失とクロストークを評価した。結果を図8に示す。7コアの平均挿入損失は1.8 dB、クロストークは-40 dB以下と、良好な結果が得られた。

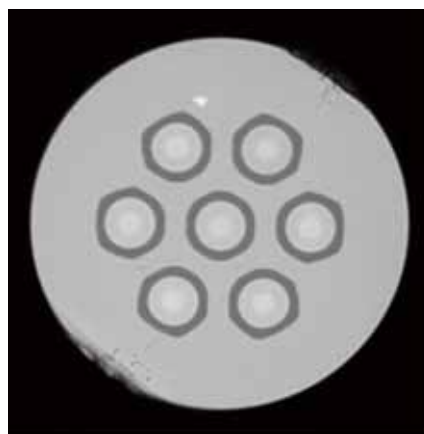


図7 A_{eff} 拡大マルチコアファイバ断面写真
Fig. 7. Cross-sectional image of large A_{eff} MCF.

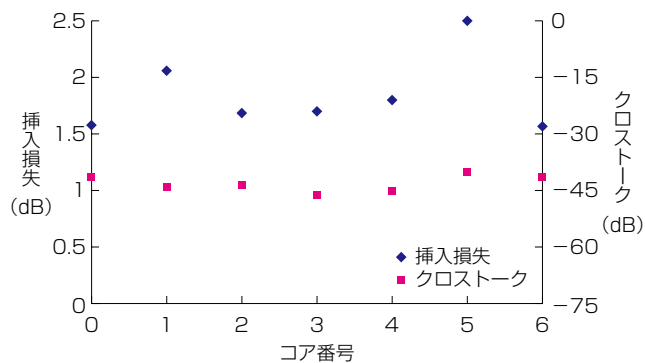


図8 2段コアファイバを用いたFi/Foデバイスの挿入損失、およびクロストークの測定結果

Fig. 8. Measurement results of insertion loss and crosstalk of double-core fiber based Fi/Fo device.

4. む す び

本報告では、高 Δ コアファイバ、2段コアファイバの2種類の延伸用ファイバを用いたFi/Foデバイスを作製した。MCFとFi/Foデバイスを融着接続し伝送路に使用される系を模擬し、光学特性を評価した。いずれの延伸用ファイバを用いたデバイスでも全コアの平均挿入損失2.0 dB以下、クロストーク-40 dB以下と実用的な光学特性を達成した。

Fi/FoデバイスはMCFを用いた空間多重伝送実現に向けて必須となる光部品であり、MCF実用化に向けた動きに合わせ更に開発を加速させる。

謝 辞

本研究は、独立行政法人情報通信研究機構（NICT）の高度通信・放送研究開発の委託研究／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" towards 2020 and beyond," OECC 2009, FT4, 2009
- 2) H. Takara, et al.: "1.01-Pb/s (12 SDM/ 222WDM/ 456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency," ECOC 2012, Th.3.C.1, 2012
- 3) 斎藤ほか:「マルチコアファイバ用ファイババンドルタイプファンアウト」, 2012年信学総大講演論文集2, no. B-10-26, p. 349, 2012
- 4) 植村ほか:「溶融延伸型マルチコアファイバ用ファンイン／ファンアウトデバイス」, 2013年信学総大講演論文集2, no. B-10-11, p. 342, March 2013
- 5) 植村ほか:「2段コアファイバを用いた溶融延伸型ファンイン／ファンアウトデバイス」, 2013年信学ソ大講演論文集2, no. B-10-37, p. 251, 2013
- 6) 鳥取ほか:「集積化マルチコアファイバファンイン／ファンアウトデバイス」, 2013年信学ソ大講演論文集2, no. B-13-26, p. 378, 2013
- 7) T. Watanabe, et al.: "Laminated polymer waveguide fan-out device for uncoupled multi-core fibers," Opt. Express, vol. 24, pp. 26317-26325, 2012
- 8) 竹永ほか:「遠隔励起増幅システム用マルチコアEDF」2013年信学総大講演論文集2, no. B-10-27, p. 358, 2013
- 9) 吉田ほか:「高機能特殊光ファイバ融着接続機」, フジクラ技報第120号, pp. 12-15, 2011
- 10) 安間ほか:「太径マルチコアファイバの低損失融着技術」, 信学技報, vol. 113, no. 182, OCS2013-41, pp. 27-32, 2013
- 11) 増本ほか:「融着延伸マルチコアファイバカプラのMFDに関する検討」2013年信学総大講演論文集2, no. B-13-15, p. 480, 2013