空間分割多重用マルチコアファイバ

竹永 勝宏

(株)フジクラ(〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440)

Multi-Core Fibers for Space Division Multiplexing Transmission

Katsuhiro TAKENAGA

Fujikura Ltd., 1440 Mutsuzaki, Sakura, Chiba 285-8550

(Received April 3, 2018)

Multi-core fibers (MCFs) and few-mode fibers (FMFs) are expected as a good candidate for overcoming the capacity limit of a current optical communication system. This paper reviews the classification and recent works of MCFs, FMFs and few-mode multi-core fibers for space division multiplexing transmission. In addition, design concept and characteristics of a single-mode 37-core fiber, which has largest core number so far, are presented. Here, tradeoff requirements such as core count, A_{eff} , inter-core crosstalk, and cladding diameter are discussed.

Key Words: Space division multiplexing, Optical fiber, Multi-core fiber, Spatial channel count

1. はじめに

これまでの光通信システムは、シングルモード光ファイバ(Single-Mode Fiber: SMF)を用いて、伝送容量の拡大を実現してきた。しかし、スマートフォンの普及により、爆発的に通信容量も増えている。今後もIoT (Internet of Things)や、5G(第5世代)モバイルの普及、データセンタの活用が増々進み、通信容量の増大が続くと予想されている。一方、現在一般的に用いられているSMFの伝送容量は、光パワーの入力限界やシャノンリミットにより制約され、その限界はファイバ1本当たり100 Tb/sと言われている¹⁾。すでに研究段階ではこの限界に達しており、将来必要とされる通信容量に対応できない可能性がある。そこで、伝送容量を飛躍的に拡大する技術として、マルチコアファイバ(Multi-Core Fiber: MCF)や数モードファイバ(Few-Mode Fiber: FMF)といった新しい光ファイバを用いた空間分割多重(Space Division Multiplexing: SDM)伝送技術の研究開発が盛んに行われている。

本稿では、大容量伝送を実現するSDM用光ファイバについて説明するとともに、最新動向について述べる。最後に我々が設計、作製した37 コアのシングルモードMCF²⁾を紹介する。

2. 空間分割多重用光ファイバ

2.1 空間分割多重用光ファイバの分類

近年、SDM伝送への期待が高まり、SDM伝送システムと共に、伝送媒体であるSDM用光ファイバの研究が精力的に進められている。その結果、SDM用光ファイバの特性に応じて、Fig. 1に示すような分類がされるようになってきた。SDM用光ファイバは、大きく分けると1つのクラッドに複数のコアを持つMCFと複数のモードを持つFMFに分類される。MCFは各コアが、FMFは各モードが個別の伝送路となる。MCFについては、各コアがシングルモード(Single Mode: SM)で伝搬するSM-MCFと各コアが数モード(Few Mode: FM)伝搬可能なFM-MCFとが存在する。さらに、各コアを伝搬するモードの干渉であるコア間クロストーク(Inter-core Crosstalk: IC-XT)を抑制した非結合型MCF(Uncoupled MCF)や各コアの光が結合する結合型MCF(Coupled MCF)に分類され

Fig. 1 Classification of optical fibers for SDM.

る。また、FMFでは、各モードがほとんど結合しない非結合型FMF(Uncoupled FMF)と各モードが強く結合した結合型FMF(Coupled FMF)に分類される。但し、研究段階であるため、分類した名称は異なる表現である場合もある。

次の節では、MCFに着目し、各分類のファイバの特徴について述べながら、最新動向についても触れる。

2.2 非結合型マルチコアファイバ

MCFは一つのクラッド内に複数のコアを配置し、各コアに信号を伝搬させることで、SDMを実現する光ファイバであり、伝送容量をコア数に比例して大きくすることが可能である。非結合型SM-MCFは、伝送システムの受信端でMultiple-Input Multiple-Output (MIMO)の処理を必要としないため、陸上幹線系中の既存の光トランスポンダや光通信システムとの親和性が高く、既設ファイバとの置き換えへの障壁がSDM用ファイバの中では小さい。この非結合型SM-MCFでは、機械的信頼性の観点から限られるクラッド径の範囲内でいかにIC-XTを抑制するかが設計の課題となっている。Fig. 2に代表的なIC-XT抑制法を模式的に示す。Fig. 2(a)に示すようにコア間距離を拡大することで、IC-XTを抑制する方法であるが、クラッド径の拡大につながり望ましくない。そこで、コアの周りにトレンチと呼ばれる低屈折率部や空孔を設けることで電界分布の重なりを抑制する手法(Fig. 2(b), (c))や実効屈折率が異なる異種コア(Heterogeneous Core)を2種類以上組み合わせることで使用ファイバ曲げ径での位相整合を抑制する手法(Fig. 2(d))が提案されている³⁾。

Fig. 3に、これまで報告された同種コア(Homogeneous Core)および異種コアのSM-MCFの波長1550 nmにおける合計IC-XT(Total IC-XT)とコア数の関係を示す。ここで、合計IC-XTとは、全コアに光を入射した際の、すべてのコアからのIC-XTの総和である。異種コアSM-MCFは同種コアSM-MCFと比較して、低い合計IC-XTでコア数の拡大を実現している。現在最もコア数が多い通信用

Fig. 2 Diagram of IC-XT reduction methods.

Fig. 3 Relation between total IC-XT and core count of the heterogeneous SM-MCFs and homogeneous SM-MCFs.

SM-MCFはクラッド径が $248\text{ }\mu\text{m}$ の異種37コアファイバとなっている²⁾。近年、非結合型SM-MCFを用いた長距離の大容量伝送実験が数多く行われており、32コアの非結合型SM-MCF⁴⁾を用いて、1 Pb/sの容量を205.6 km伝送した報告⁵⁾や、12コアの非結合型SM-MCFを用いて0.52 Pb/sの容量を8,830 km伝送した報告がされている⁶⁾。また、クラッド径を既存のSMFと同じ $125\text{ }\mu\text{m}$ とした非結合型SM-MCF⁷⁻¹⁰⁾も早期の実用化を目指し、研究開発が進められている。非結合型SM-MCFは、SDM用ファイバの中で、最も早く実用化が期待されている。

2.3 結合型マルチコアファイバ

コア間距離を適切に短くしてコアモードを積極的に結合させた結合型MCFは、空間モード分散(Spatial Mode Dispersion: SMD)の累積が伝送距離の平方根に比例し、SMDの累積が抑制されるため、SDM用光ファイバとして近年注目されている。コア間距離が短くでき、クラッド径 $125\text{ }\mu\text{m}$ の制限下であっても、非結合型MCFと比べ、より多くのコアを収容することが可能である。また、非線形の抑制効果やモード依存損失(Mode-Dependent Loss: MDL)の差が小さいという利点もある。最近では $125\text{ }\mu\text{m}$ のクラッド径で3~6コアを持つ結合型MCF^{11,12)}や現時点で最高のコア数を持つ結合型12コアファイバの試作結果¹³⁾が報告されている。結合型MCFは、長距離伝送への適応が期待されている。

2.4 数モードマルチコアファイバ

FMFは一つのコアに異なる信号をのせた複数のモードを伝搬させることで、SDMを実現するファイバであり、伝送容量をモード数に比例して大きくできる。FM-MCFは、そのFMコアを一つのクラッド内に複数持つファイバである。ここで、空間多重数(Spatial Channel Count: SCC)をコア数×モード数と定義する。FM-MCFは、最もSCCを拡大できるファイバとして注目され、最新の研究では、SCCが114となる6モード19コアファイバが報告されている^{14,15)}。さらに、SCCが114のFM-MCFを用いて、10.16 Pb/sの超大容量伝送を達成した結果も報告されている¹⁶⁾。これはSMFの伝送容量限界のおよそ100倍である。また、FM-MCFでは、接続点でのMDL抑制が

重要であり、融着点起因のMDLを1 dB以下に抑制するため、コアをクラッドの中心と外側1層のみに配置した6モード7コアファイバの試作結果が報告されている¹⁷⁾。融着点での各コアのMDLが0.6 dB以下に抑制され、6モードMCFとして初めて100 kmを超える伝送を達成している。さらに、SDMとMDLの補償技術を用いて、3モード12コアのFM-MCFで、2500 km伝送した結果なども報告されている¹⁸⁾。今後、高SCCのFM-MCFにおける伝送距離の長距離化への検討が一層進むことが期待される。

3. 37 コアファイバの設計及び、作製結果

3.1 37 コアファイバの設計

ここでは、我々が検討した、伝送用MCFでは最大コア数を有するシングルモード異種37 コアファイバ²⁾の設計について記述する。

SM-MCFの設計はコア数、 A_{eff} 、IC-XT、クラッド径を考慮して行われる。IC-XTの低減にはコア間距離の拡大が有効だが、クラッド径が大きくなってしまう。引っ張りプルーフレベルを2%、また、曲げ半径の下限を15 mmとすると、最大クラッド径は250 μm に制限される¹⁹⁾。さらに、 A_{eff} の縮小もIC-XT低減に効果があるが、非線形現象の抑制のため波長1550 nmで80 μm^2 以下にすることは望ましくない。そこで、我々は、コア間距離の拡大と A_{eff} の縮小を伴わないIC-XT低減の手法として、下記の3つを適用することとした。

- ① トレンチ構造の導入
- ② 異種コアの導入
- ③ カットオフ波長の長波長化

①、②は、それぞれFig. 2(b), (d)に対応し、③では、カットオフ波長の定義に用いる長さを22 mから1 kmとした。従来の22 mカットオフ波長の測定の定義ではコアのLP₁₁モードの閉じ込め損失の下限は19.3 dB/22 mであるが²⁰⁾、長さを1 kmとすることで0.02 dB/mまで下限を下げる事ができた。これにより従来のSM-MCFよりもトレンチを深く、または、広げることができ、XTの改善を見込むことができる。

この設計方針に基づき検討した結果、ファイバの機械的信頼性を確保可能なクラッド径(250 μm 以下)で、37 コアファイバが実現可能であることを見出した。コアの配置は、Fig. 4 に示すように、最密配置とし、隣り合うコアがすべて異種となるように3種類のコアを導入した。屈折率分布は、トレンチ型屈折率分布(Fig. 5(a))を2種類、ディプレストクラッド型(Depressed Cladding)の屈折率分布(Fig. 5(b))を1種類用いることとした。波長1550 nmでの A_{eff} は、約80 μm^2 とし、カットオフ波長は1 kmカットオフ波長を1530 nm以下とした。上記の設定において、IC-XTが低くなるように設計の最適化を行い、Table 1 に示す3種類のコア(Core H, Core M, Core L)のコアパラメータを得た。

Fig. 4 Core arrangement of 37-core fiber.

Fig. 5 Schematics of core profile.

Table 1 Optimized core parameters of 37-core fiber.

	Core H	Core M	Core L
Δ (%)	0.344	0.305	0.250
r_1 (μm)	4.78	4.61	6.01
r_2/r_1	1.7	1.7	—
W/r_1	0.70	0.79	0.92

3.2 37 コアファイバの試作結果

Table 1 の設計に基づき、Fig. 6 に示す断面をもつ短尺(7.9 km)の37 コアファイバ作製した。37 コアファイバの寸法、及び光学特性をそれぞれTable 2, Table 3 示す。Table 2 の記号は、Fig. 4 に図示している。 A_{eff} は、およそ80 μm^2 で、コア間距離(Λ)、クラッド径(D_c)はそれぞれ、約29 μm 、248 μm であった。クラッド径は250 μm 以下であり、機械的信頼性の観点からも問題は

Fig. 6 Cross-section of the fabricated 37-core fiber.

Table 2 Measured dimensions of the fabricated fiber.

Item	Target	Measured
Δ (μm)	> 28.5	29.1
T_c (μm)	> 35.0	36.8
D_c (μm)	< 250	248.3

Table 3 Measured optical characteristics of the fabricated fiber ($\lambda = 1550$ nm).

Item	Core H	Core M	Core L
Attenuation (dB/km)	0.260	0.238	0.284
MFD (μm)	10.0	10.0	9.5
A_{eff} (μm^2)	80.4	80.4	81.2

ない値である。次に、カットオフ波長の測定結果をFig. 7に示す。1 kmカットオフ波長は、全てのコアで1530 nm以下となっていることを確認した。また、合計IC-XTの波長依存性測定結果をFig. 8に示す。作製した37コアファイバは、C~Lバンド帯(波長1530 nm~1625 nm)の1000 km当たりの合計IC-XTが-20 dB以下であり、1000 km以上の長距離で4位相変異変調(Quadrature Phase Shift Keying: QPSK)の多値伝送が可能であることを確認した。Fig. 9に、コア数と長さ1000 kmにおける合計IC-XTの関係について既報告の非結合型SM-MCFと合わせて示す。作製したファイバは、低いクロストーク特性を維持し、コア数を37まで拡大できたことが分かる。

Fig. 7 Measured cutoff wavelength.

Fig. 8 Estimated total IC-XT of the fabricated fiber.

Fig. 9 Relation between total IC-XT and core count of the fabricated fibers and reported SM-MCFs.

4. まとめ

空間分割多重伝送を実現するマルチコアファイバの分類を示し、各種マルチコアファイバに対して最新動向を述べた。さらに、伝送用マルチコアファイバとして最大コア数を有する37コアファイバの設計、作製結果について報告した。

謝 辞

本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構の「高速通信・放送研究開発委託研究/革新的光ファイバ技術の研究開発」、及び総務省ならびにEC Horizon 2020による「再構成可能なインフラのためのスケーラブル・フレキシブル光通信技術の研究開発(SAFARI)」の一環としてなされたものである。

参考文献

- 1) T. Morioka: *Proc. Opto-Electronics and Communication Conference (OECC2009)* (2009) FT4.
- 2) Y. Sasaki, K. Takenaga, K. Aikawa, Y. Miyamoto, and T. Morioka: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2017)* (2017) Th1H.2.
- 3) M. Koshiba, K. Saitoh, and Y. Kokubun: *IEICE Electron. Exp.* **6** (2009) 98.
- 4) Y. Sasaki, R. Fukumoto, K. Takenaga, K. Aikawa, K. Saitoh, T. Morioka, and Y. Miyamoto: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2016)* (2016) W.2.B.2.
- 5) T. Kobayashi, M. Nakamura, F. Hamaoka, K. Shibahara, T. Mizuno, A. Sano, H. Kawakami, A. Isoda, M. Nagatani, H. Yamazaki, et al.: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2017)* (2017) Th5B.1.
- 6) A. Turukhin, H. G. Batshon, M. Mazurczyk, Y. Sun, C. R. Davidson, J.-X. Cai, O.V. Sinkin, W. Patterson, G. Wolter, M. A. Bolshtyansky, et al.: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2016)* (2016) Tu.1.D.3.
- 7) T. Matsui, T. Sakamoto, Y. Goto, K. Saito, K. Nakajima, F. Yamamoto, and T. Kurashima: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2015)* (2015) We.1.4.5.
- 8) T. Gonda, K. Imamura, R. Sugizaki, Y. Kawaguchi, and T. Tsuritani: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2016)* (2016) W.2.B.1.
- 9) T. Hayashi, T. Nakanishi, K. Hirashima, O. Shimakawa, F. Sato, K. Koyama, A. Furuya, Y. Murakami, and T. Sasaki: *IEEE J. Lightwave. Tech.* **34** (2016) 85.

- 10) T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. de Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, *et al.*: *Proc. Opto-Electronics and Communication Conference (OECC2017)* (2017) PDP2.
- 11) T. Hayashi, R. Ryf, N. K. Fontaine, C. Xia, S. Randel, R. J. Essiambre, P. J. Winzer, and T. Sasaki: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2015)* (2015) We.14.1.
- 12) T. Hayashi, Y. Tamura, T. Hasegawa, and T. Taru: *IEEE J. Lightwave. Tech.* **35** (2017) 450.
- 13) T. Sakamoto, S. Aozasa, T. Mori, M. Wada, T. Yamamoto, S. Nozoe, Y. Sagae, K. Tsujikawa, and K. Nakajima: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2017)* (2017) Th1H.1.
- 14) T. Hayashi, T. Nagashima, K. Yonezawa, Y. Wakayama, D. Soma, K. Igarashi, T. Tsuritani, and T. Sasaki: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2016)* (2016) W1F4.
- 15) T. Sakamoto, T. Matsui, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Takenaga, T. Mizuno, Y. Abe, K. Shibahara, Y. Tobita, S. Matsuo, *et al.*: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2016)* (2016) Th5A.2.
- 16) D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, T. Nagashima, M. Suzuki, H. Takahashi, K. Igarashi, *et al.*: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2017)* (2017) Th.PDP.A.1.
- 17) T. Sakamoto, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Shibahara, M. Wada, Y. Abe, A. Urushibara, K. Takenaga, T. Mizuno, T. Matsui, *et al.*: *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2017)* (2017) Th.PDP.A.6.
- 18) K. Shibahara, T. Mizuno, L. Doowhan, Y. Miyamoto, H. Ono, K. Nakajima, S. Saitoh, K. Takenaga, and K. Saitoh: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2018)* (2018) Th4C. 6.
- 19) T. Sakamoto, T. Matsui, K. Saitoh, S. Saitoh, K. Takenaga, T. Mizuno, Y. Abe, K. Shibahara, Y. Tobita, S. Matsuo, *et al.*: *IEEE J. Lightwave. Tech.* **35** (2017) 443.
- 20) International Telecommunication Union, ITU-T G.650.1, July 2010.

レーザーワード

空間モード分散 (spatial mode dispersion)

シングルモードファイバは、伝搬するモードが一つであるが、数モードファイバや結合型マルチコアファイバでは、伝搬モードが複数存在し、一般的には各モードの伝搬速度は異なる。空間モード分散とは、伝搬モードによる光の到達時間の差である。シングルモードファイバは、モードが一つであるため、空間モード分散は生じな

いが、数モードファイバや結合型マルチコアファイバでは空間モード分散を生じる。近年、注目されているモード多重伝送では、空間モード分散が大きいと、受信端での信号復調に必要な計算量が非常に多くなるという問題が生じるため、長距離大容量伝送では空間モード分散が小さい光ファイバが望まれている。(竹永 勝宏)

モード依存損失 (mode-dependent loss)

数モードファイバや、結合型マルチコアファイバでは、伝搬モードが複数存在する。モード依存損失とは、各伝搬モードの損失のことである。光通信において、モード多重伝送を行った場合、伝送システムのモード依存損失の差が大きくなると、受信端で信号復調が難しく

なる。モード依存損失の差は、伝送媒体である光ファイバではあまり大きくないが、接続点やモード合分波器で大きくなりやすい。モード多重伝送を用いた長距離大容量伝送では、伝送システム全体のモード依存損失の差を低減することが望まれている。(竹永 勝宏)