

双方向伝送用マルチコアファイバ

古河電気工業(株)

今村 勝徳, 権田 智洋, 杉崎 隆一

Multicore fiber for bi-directional transmission

Katsunori Imamura, Tomohiro Gonda, and Ryuichi Sugizaki

Furukawa Electric co., Ltd

1. はじめに

伝送容量の増大はとどまるところを知らず、さらなる容量拡大が要求されている。容量拡大のためには波長多重 (WDM) のような高密度伝送が有効であるが、コア内に入力される光パワーにはファイバフェーズによる限界がある。この限界を超えるシステムとして空間多重伝送が注目を集めており、様々な実験によりその有効性が実証されている [1-6]。近年特に注目を集めているのは、数モードを伝搬可能なマルチコアファイバである [6]。数モードマルチコアファイバでは、コア数とモード数の積の分だけ多重度を上げることが可能となるため、究極の高密度多重伝送として注目を集めているが、入出力デバイスの実現が難しい。一方、シングルモードのマルチコアファイバは、入出力デバイ

スの作製が比較的容易であり、最も現実的な解と言える。シングルモードマルチコアファイバでは、単純にコア数だけ多重度を上げることが可能である。これまで、19, 22, 31 コアのシングルモードマルチコアファイバが報告されているが、コア数の増大に伴うクラッド径増大は避けられなかった。またクラッド径の拡大は、ファイバ曲げによる機械的信頼性低下を招くという課題もあった [7]。クラッド径の極端な増大を回避しつつ、同時にコア数を拡大する方向性は、シングルモードマルチコアファイバの特性向上におけるキーポイントと言える。

クラッド径はコア間の距離 (= コアピッチ) によって決まる。コアピッチはクロストーク特性によって制限を受けるため、クロストーク低減とコアピッチ縮小の両立がマルチコアファイバ設計上の重要なポイントとなる。近年、隣接するコアに伝搬方向の異なる信号光を配置することによってクロストークを大幅に低減する双方向 (Bi-directional Signal Assignment: BSA) 伝送方式が提案された [8, 9]。本論文で

〒100-8322 東京都千代田区丸の内 2-2-3
TEL 03-3286-3428
FAX 03-3286-3190
E-mail: imamura.katsunori@furukawa.co.jp

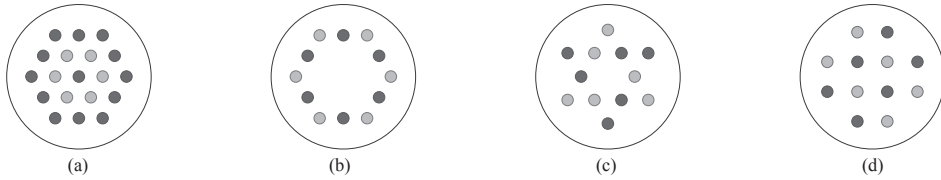


図1 双方向信号配置 (a) 最密充填19コア (b) 一重リング12コア (c) 二重リング12コア (d) 四角配置12コア [10]

は、双方向伝送のための最適なシングルモードマルチコアファイバのコア配置ならびにコア数について検討したので、報告する。

2. 四角配置を有するMCFの設計

A. 様々な構造を有するマルチコアファイバの比較

マルチコアファイバの中で最も一般的なのは、三角格子型 (Triangle Lattice Structure: TLS) の7コアファイバである。この構造は、全てのコアが等距離に配置されており、もっとも効率的な構造である。三角格子型のマルチコアファイバとしては7コア, 19コア, 37コアファイバが検討されている。クロストーク増大に関して、コアピッチとクロストークの関係を調査した。三角格子型の場合、最大6個のコアが周辺に存在し、最大7.8 dBのクロストーク増大が発生するため、低クロストーク特性を有する伝送路実現の上で大きな障壁となる。一方、双方向伝送に適した構造として、四角配置の構造 (Square Lattice Structure: SLS) も考えられる。隣接するコア間で逆方向の信号を配置することにより、クロストークを大幅に抑制することが可能となる。この手法は、1本のケーブル中で2方向の伝送を行う伝送システムにおいて有効である。隣接コアからのクロストークの影響を抑制する手段としていくつかの手法が提案されている。例えば文献[9]で示されているように、後方散乱光とのクロストークは、同方向に伝搬する光とのクロストークと比較して-20 dB程度と小さいことから、クロストーク低減に有効であることが報告されている。四角配置以外にも、BSAに有効な構造が

いくつか提案されている (文献[10])。ひとつは一重リング構造 (One Ring Structure: ORS) であり、もうひとつは二重リング構造 (Dual Ring Structure: DRS) である。12コアファイバで比較した場合、TLS, ORS, DRSと比べてSLSがクロストーク低減の観点から最もメリットを有することが示されていることから、本検討では双方向伝送BSA用途のSLSを対象として議論を進めることとする。

B. 四角配置でのマルチコアファイバ設計

SLSのマルチコアファイバにおける最適設計について検討した。コアの屈折率プロファイルは図2に示すトレンチ型のプロファイルとした。図3と表1には、文献[9]で報告されてい

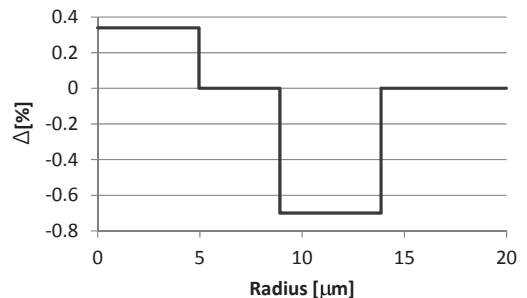


図2 コア屈折率プロファイル設計

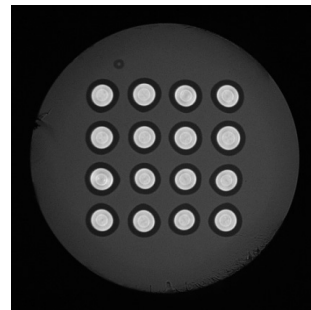


図3 16コアファイバ断面写真 [9]

表1 試作 16 コアファイバの構造特性ならびに光学特性[9]

項目	値
ファイバ長	55 km
クラッド径	235 μm
コアピッチ	37.5 μm
Aeff@1550 nm	87 μm^2
XT @1550 nm*	-40.5 dB

*) 55 km伝送後, R=140 mm

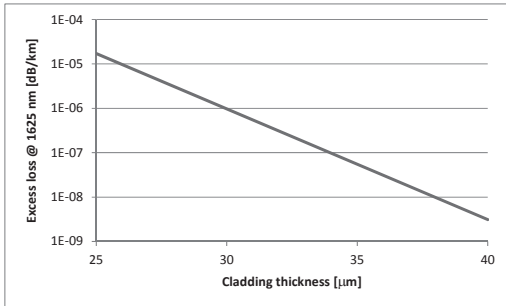


図4 クラッド厚と過剰損失の関係

る 16 コアファイバの断面写真と光学特性である。このとき、コアピッチは 37.5 μm であり、クラッド外周から最外周コアの中心までの距離であるクラッド厚は 38.0 μm であった。図4はクラッド厚と波長 1625 nm における過剰損失との関係を示す図である。過剰損失に関しては、C+L 帯での良好な伝送特性を保証するために、C+L 帯の中で最も長波長に位置する 1625 nm での過剰損失値が 0.001 dB/km 以下となるように設定した。一方、図5にはコアピッチとクロストークの関係を示している。クロストークに対する要求は、マルチコアファイバが使用される状況によって変化するが、ここでは例として 100 km 伝送後のクロストークが

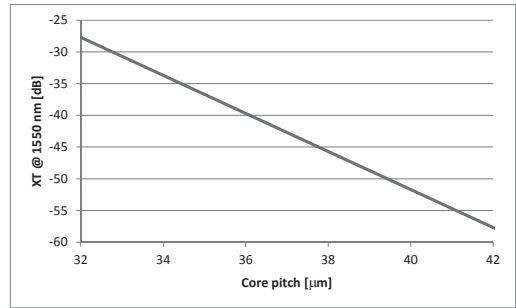


図5 コアピッチとクロストークの関係

40 dB 以下となるように目標を設定した。文献 [9] の 16 コアファイバの場合、クラッド厚とコアピッチのいずれも目標を満たしていることから、良好な伝送特性が実現されている。

C. 四角配置マルチコアファイバの最適コア数

四角配置のマルチコアファイバの中で例としていくつかのコア数を挙げ、比較した。比較したコア数は 4, 5, 9, 12, 16, 21, 24, 25 である。各コア数を有する四角配置マルチコアファイバの断面構造模式図を表2に示す。全ての場合において、前節で示した 16 コアファイバと同じコアピッチ、クラッド厚とした場合のクラッド径を示している。合わせて、それぞれのクラッド径から見積もられるコア密度も合わせて示している。ここでコア密度とは、従来のクラッド径 125 μm のファイバのクラッド断面積を基準としたときのコア数として定義されている。この中で、12 コアファイバと 21 コアファイバはコア密度を効率良く向上するという観点でメリットを有する構造と言える。一方、実使用環境に

表2 四角配置 (SLS) マルチコアファイバ
(クラッド径は、コアピッチ=37.5 μm , クラッド厚=38.0 μm のときに該当)

コア数	4	5	9	12	16	21	24	25
断面図								
クラッド径	129	151	182	195	235	244	267	288
コア密度	3.8	3.4	4.2	5.0	4.5	5.5	5.3	4.7

おいては2, 4, 8, 12個のコアを一組としたファイバが広く使われていることから, その倍数に相当する4, 12, 16, 24コアファイバが使用上好ましいと考える。さらに, 信頼性の観点からクラッド径を $250\ \mu\text{m}$ 以下に抑えようとする場合, コア数は21以下であることが好ましい。これらの制限の中で最も大きいコア数を実現できるという意味で, 16コアファイバは, BSA伝送向けの最も現実的な構造であると言える。

3. まとめ

双方向伝送を実現するためのマルチコアファイバの最適構造について検討した。コアピッチとクラッド径の検討結果から, 双方向伝送のためには四角配置の16コアファイバが最も適した構造であることを示した。

謝辞

有益なご討論をいただいた日本電気株式会社殿に感謝します。この研究は, 独立行政法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究／革新的光ファイバの実用化に向けた研究開発の一環としてなされたものである。

参考文献

- [1] J. Sakaguchi, et al., "109-Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," in OFC/NFOEC 2011, PDPB 6 (2011).
- [2] J. Sakaguchi, et al., "19-core fiber transmission of 19 x 100 x 172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s," in OFC/NFOEC 2012, PDP 5 C. 1 (2012).
- [3] H. Takahashi, et al., "First Demonstration of MC-EDFA-Repeated SDM Transmission of 40 x 128-Gbit/s PDM-QPSK Signals per Core over 6, 160-km 7-core MCF," in ECOC 2012, Th. 3. C. 3 (2012).
- [4] H. Takara, et al., "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," in ECOC 2012, Th. 3. C. 1 (2012).
- [5] B. J. Puttnam, et al., "2.15 Pb/s Transmission Using a 22 Core Homogeneous Single-Mode Multi-Core Fiber and Wideband Optical Comb," in ECOC 2015, PDP 3. 1 (2015).
- [6] D. Soma, et al., "2.05 Peta-bit/s Super-Nyquist-WDM SDM Transmission Using 9.8-km 6-mode 19-core Fiber in Full C band," in ECOC 2015, PDP 3. 2 (2015).
- [7] K. Imamura, et al., "A Study on Reliability for Large Diameter Multi-core Fibers," in IWCS 2011, P-2 (2011).
- [8] T. Ito, et al., "Experimental Evaluation of the Reduction of the Received Signal Penalty due to Inter-core Crosstalk in a Lossy 7-core Multi-core Fiber by Using Bidirectional Signal Assignment," in IEEE Summer Topical Meetings 2013, WC 3. 2 (2013).
- [9] M. Arikawa, et al., "Crosstalk Reduction Using Bidirectional Signal Assignment over Square Lattice Structure 16-Core Fiber for Gradual Upgrade of SSMF-Based Lines," in ECOC 2015, Th. 1. 2. 3 (2015).
- [10] F. Ye, et al., "High-count Multi-Core Fibers for Space-Division Multiplexing with Propagation-Direction Interleaving," in OFC/NFOEC 2015, Th 4 C. 3 (2015).