低損失低非線形マルチコア光ファイバ

笹岡 英資

住友電気工業(株) 光通信研究所 (〒244-8588 神奈川県横浜市栄区田谷町1)

Low Loss Low Nonlinearity Multi-core Optical Fiber

Eisuke SASAOKA

Optical Communications R&D Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1 Taya-cho, Sakae-Ku, Yokohama 244-8588

(Received January 24, 2013)

Multi-core optical fibers are eagerly developed recently, because they are one of strong candidates to overcome transmission capacity limit of existing optical fibers. Number of cores and inter-core crosstalk are often highlighted in multi-core optical fiber development, because they are unique parameters of multi-core optical fibers. But, transmission loss and nonlinearity of each core are also important parameters especially for multi-core optical fibers for long-haul and large capacity transmission systems. In this paper, following brief description of issues and measures to realize a low loss low nonlinearity multi-core optical fiber, an example of design and characteristics of a fabricated multi-core fiber is described. Impacts and future challenges of low loss low nonlinearity multi-core optical fibers are also mentioned.

Key Words: Multi-core optical fiber, Transmission loss, Nonlinearity

1. はじめに

近年既存の単一コア光ファイバの伝送容量限界を開拓する手段としてマルチコア光ファイバの研究開発が積極的に進められている。マルチコア光ファイバの研究開発においては、そのコア数、および、マルチコア光ファイバ固有の特性であるコア間クロストークが注目されるが、マルチコア光ファイバを使用した長距離大容量伝送においては、光ファイバの基本的な特性である伝送損失・非線形性が単一コア光ファイバと同様に重要である。

本稿では、低損失低非線形マルチコア光ファイバの必要性和それを実現するための課題を概説した後、低損失低非線形マルチコア光ファイバの一例を示す。さらに、既報のマルチコア光ファイバと低損失低非線形マルチコア光ファイバと比較することで、本ファイバのインパクトを整理し、今後の研究開発の方向性についても言及する。

2. 低損失低非線形マルチコア光ファイバの必要性

マルチコア光ファイバは、複数のコアにおいてそれぞれ独立に光伝送を行うことにより、従来からの単一コア光ファイバに対して、光ファイバ一本当たりの伝送容量を大幅に増大させる可能性を有している。伝送実験にお

いては、従来からの単一コア光ファイバの限界レベルと考えられていた100 Tbit/sを1桁上回る1 Pbit/s以上の伝送容量が実証されている¹⁾。

マルチコア光ファイバ一本当たりの伝送容量をさらに増大させるためには、マルチコア光ファイバのコア数を増大させると共に、一つのコア当たりの伝送容量を増大させることが考えられる。後者に関しては、波長多重伝送における波長数を増やす、光信号の変調速度を上げると共に、多値変調技術により一波長・一変調信号当りの情報量を増大させることが考えられる。

Fig. 1には4値の多値変調であるQPSK: Quadrature Phase Shift Keyingと16値の多変調である16-QAM: Quadrature Amplitude Modulationを比較した概念図を示した。QPSK

Fig. 1 Schematic diagram of higher level modulation with higher power (Comparison between QPSK and 16-QAM).

に対して16-QAMの振幅を2倍、パワーを4倍とすることで、各変調点間の距離と雑音による変調点の広がりをQPSKと同等とすることが可能であり、この結果として誤り率をQPSKの場合と同等に保ったまま、一波長、一変調信号(Symbol)当りの情報量を2倍にすることが可能となる。

光伝送における誤り率を一定レベル以下に保ったまま、多値変調技術により一波長・一変調信号当りの情報量を増大させるためには、受信端における信号対雑音比(SNR)を増大させる必要がある。低損失光ファイバは、光ファイバへの入力パワーが一定であれば、通常損失光ファイバに対して受信端での信号強度が強くなるため、受信端でのSNRを増大させることが可能となる。一方、低非線形光ファイバは光ファイバ中の非線形現象の影響を一定レベル以下に保つという前提であれば、通常非線形光ファイバに対して入力パワーを増大させることが可能となり、受信端でのSNRを増大させることが可能となる。

3. 低損失化の課題と対処策

マルチコア光ファイバ用母材の代表的な製造方法としては、Fig. 2に示したコアとなるロッドを穴の開いた母材に挿入して一体化するロッドイン法、および、コア・クラッドの一部となる複数本のロッドをパイプ内で束ねて一体化するスタック法が挙げられる。

どちらの製造方法においても、ロッド間、ロッドと穴内面間に異物が混入すると損失増加の原因となるため、製造工程において異物の混入を抑制することがマルチコア光ファイバの低損失化においては必須となる。

一方、マルチコア光ファイバの究極的な損失は、単一コア光ファイバと同様に光ファイバ材料である石英ガラス固有の散乱・吸収損失に支配される。単一コア光ファイバにおいては、コア部分に屈折率を増加させる GeO_2 等を添加せず、クラッド部分に屈折率を低下させるフッ素Fを添加する純石英コア光ファイバが低損失化に有効であることが実証されており、世界最低損失の光ファイバも純石英コアである²⁾。このため、マルチコア光ファイバにおいても、低損失化を追求するためには純石英コアとすることが必須と考えられる。

Fig. 2 Examples of multi-core optical fiber fabrication methods.

4. 低非線形化の課題と対処策

光ファイバの非線形性を低減させるためには、光ファイバ材料自体の非線形性を低減させる手段も考えられるが、石英ガラスを使用する限りは、従来からの光ファイバに対して材料面からの大幅な非線形性低減は期待出来ない。このため、光ファイバ内での光パワー分布広がり の指標である実効断面積 A_{eff} を拡大して、光パワー密度を低減させることが有効な非線形性低減手段となる。

一般的に A_{eff} を拡大すると、光ファイバに一樣曲げを加えた際に発生するマクロベンド損失、ランダム曲げを加えた際に発生するマイクロベンド損失共に増大し、これらの損失の許容レベルから A_{eff} の上限が制限される。

さらに、マルチコア光ファイバ固有の特性であるコア間のクロストークも光パワー分布の広がりに依存し、コア間隔が一定であれば、光パワー分布広がりが多いほど(A_{eff} が多いほど)増大する。このため、マルチコア光ファイバの A_{eff} 設計においては、マクロ・マイクロベンド損失と共に、コア間クロストークの許容レベルにも配慮する必要がある。

マルチコア光ファイバにおけるコア間クロストーク低減の手段としては、各コアの周囲に低屈折率のトレンチ部³⁾・空孔⁴⁾を付与する、あるいは、コア間に障壁層⁵⁾・遮断層⁶⁾を設ける方法等が提案されている。障壁層・遮断層はトレンチ部・空孔に比較して各コアから相対的に離れた位置に設置されているため、コア内を伝搬する光への影響を抑えつつコア間クロストークを低減可能な手段と言える。一方、各コア周囲へのトレンチ部・空孔付与はマクロベンド・マイクロベンド損失低減の効果も期待出来る。上述の通り、マルチコア光ファイバの A_{eff} 拡大による非線形性低減においては、マクロベンド・マイクロベンド低減とコア間クロストーク低減の両面に配慮する必要があるため、各コア周囲へのトレンチ部・空孔付与が有効な対処策であると考えられる。

5. 低損失低非線形マルチコア光ファイバの現状

前記「3. 低損失化の課題と対処策」、および、「4. 低非線形化の課題と対処策」を考慮して設計・製造した低

Fig. 3 Refractive index profile design of fabricated multi-core optical fiber.

損失低非線形マルチコア光ファイバのコア部分の屈折率分布設計をFig. 3に、クラッド部分も含めた断面写真をFig. 4に示す⁷⁾。

Fig. 3の屈折率分布では最外クラッド部分の屈折率を基準に比屈折率差の径方向分布を記載しているが、コア部分が純石英であり、それ以外の部分はそれぞれの比屈折率差に応じたF添加量を調整することにより、コア部分よりも低屈折率としている。トレンチ部分の屈折率が最も低く、この部分がFig. 4の断面写真では最も暗くなっている。なお、#2コアの左上に見えるのはコア番号を識別するためのマーカーであり、クラッド部分よりもF添加量の多い石英ガラスが使用されているため、トレンチ部分と同様に暗く見えている。

製造したマルチコア光ファイバの損失波長特性をFig. 5に示した。波長1550 nmにおける伝送損失の平均値は0.17dB/km以下と実用化されている単一コアの純石英コア光ファイバと同等レベルであり、コア部分にGeO₂が添加された汎用のシングルモード光ファイバ(SSMF)よりも0.02dB/km程度損失が低減されている。この結果から、マルチコア光ファイバにおいても純石英コアを使用することが低損失化に有効であることが確認された。また、7つのコアそれぞれの伝送損失の平均値からの乖

Fig. 4 Cross-sectional photograph of fabricated multi-core optical fiber.

Fig. 5 Wavelength dependence of transmission loss of fabricated multi-core optical fiber.

Table 1 A_{eff} , macrobending loss and λ_{cc} of fabricated multi-core optical fiber.

Core#	A_{eff} (μm^2)	Macrobend (dB/turn)	λ_{cc} (nm)
#1	121.3	0.08	1458
#2	123.5	0.08	1458
#3	125.9	0.11	1468
#4	124.3	0.11	1459
#5	126.9	0.11	1470
#6	122.4	0.10	1457
#7	124.1	0.12	1466
Avg.	124.1	0.10	1462

Fig. 6 Inter-core crosstalk of fabricated multi-core optical fiber.

離は最大でも0.005dB/kmと小さな値に抑えられており、製造工程の管理により異物混入による損失増加が防止されていると考えられる。

製造したマルチコア光ファイバの波長1550 nmにおける A_{eff} 、マクロベンド損失、および、ケーブルカットオフ波長 λ_{cc} をTable 1にまとめた。 A_{eff} は設計通り120 μm^2 台とSSMFの1.5倍程度となっていることが確認された。また、 A_{eff} を有意に拡大しているにも関わらず、曲げ半径10 mmでのマクロベンド損失は0.1dB/turn程度とSSMFよりも小さな値に抑えられており、トレンチ部付与によるマクロベンド損失低減効果も確認された。

7つの全てのコアについて、光を入射したコア以外へのクロストークを、製造したマルチコア光ファイバ全長6.99 kmを半径140 mmのボビンに巻いた状態で評価した結果をFig. 6に示した。クロストークの平均値は-60dB程度と概ね設計通りであり、クロストーク低減の上でもトレンチ部付与が効果を発揮していることが確認された。なお、マルチコア光ファイバのコア間クロストークは、ファイバ長、および、ファイバの曲げ径に依存することが知られているが、これらの依存性を元に考えると、国内で一般的に使用されている光ケーブルに製造したマルチコア光ファイバを収納し、伝送距離数百kmの国内幹線系に適用しても、コア間クロストークによる伝送性能の有意な劣化は発生しないレベルと推測される。

Table 2 Transmission loss, A_{eff} and Crosstalk of multi-core optical fibers for system impact comparison.

Ref.	Loss (dB/km)	A_{eff} (μm^2)	XT (dB)	length (km)
SSMF	0.19	80		
(1)	0.199	80.7	-32	52
(6)	0.214	133.4	-43.5	5.0
(7)	0.168	124.1	-61.3	6.99
(8)	0.198	112.4	-56	1.905
(9)	0.242	116	-40	3.962
(10)	0.195	110	-65	75

6. 低損失低非線形マルチコア光ファイバのインパクトと今後

今回製造した低損失低非線形マルチコア光ファイバが2. 低損失低非線形マルチコア光ファイバの必要性で記載した受信端におけるOSNR: Optical Signal to Noise Ratioの観点でどのようなインパクトを持つものかを明らかにするため、既報のマルチコア光ファイバも含めて、OSNRに影響を与えるマルチコア光ファイバの特性パラメータである伝送損失、 A_{eff} 、クロストーク(XT)をTable 2にまとめた。

さらに、Table 2に記載の特性パラメータを元に、一般的な幹線系のシステム構成を想定した中継スパン80 kmでの出射端におけるSNRを試算し、この結果をFig. 7に示した⁷⁾。Fig. 7の横軸は80 km伝搬時のクロストークが最大となるコアにおけるクロストーク値、縦軸は伝送損失・ A_{eff} により決定されるクロストークの影響を考慮しないSNRとした。SNR算出のための前提条件、および、算出方法の詳細は参考文献7)に譲るが、Table 2に記載したSSMFのSNRは30dB弱となる。また、Fig. 7中にはSSMFを基準としたSNR(クロストークの影響も考慮)の相対値を等高線として示した。SSMFと同等な伝送損失・ A_{eff} を有するマルチコア光ファイバを想定すると、クロストークが-50dB程度以下であれば、SSMFと同等なSNRが維持され、クロストークによる有意なSNR劣化は発生しないことがFig. 7から判る($\Delta\text{SNR} = 0\text{dB}$)。一方、クロストークが-50dB以上になるとSNR劣化が発

Fig. 7 Relative estimated SNR to SSMF for low loss low nonlinearity multi-core optical fiber (7) and existing multi-core optical fibers (1, (6), (8), (9), (10).

生し、例えば、クロストーク-30dBでは約3dBのSNR劣化となる($\Delta\text{SNR} = -3\text{dB}$)。SSMFと同等な30dB程度のSNRの場合に限らず、Fig. 7の左側の領域では等高線がほぼ水平方向に走っており、この領域ではクロストークの影響は事実上無視出来る状況であり、SNRは伝送損失・ A_{eff} に支配されることを意味している。一方、Fig. 7の右側の等高線が垂直方向に走っている領域では、クロストークの影響が大きく、小さなクロストークの違いが大きなSNRの差をもたらすことを意味している。

5. 低損失低非線形マルチコア光ファイバの現状に記載したマルチコア光ファイバはFig. 7中の⑦⁷⁾であり、SSMFに対して伝送損失が0.19から0.168dB/kmに低減され、 A_{eff} が80から124.1 μm^2 に拡大されていることから、クロストークを考慮しないSNRは約3dB向上している。本ファイバの6.99 kmでのクロストークは-61.3dBであり、これを80 km換算すると-43.1dBとなるため、クロストークによるSNR劣化が若干見られるものの、クロストークの影響も考慮したSNRはSSMFに対して2.4dBと有意に向上している。一方、1000 kmの伝送実験に使用されたマルチコア光ファイバ⑩¹⁰⁾を除いた既存のマルチコア光ファイバは、クロストークによるSNRの劣化が見られ、SNRはSSMFに対して劣化している。1 Pbit/s以上の伝送実験に使用されたマルチコア光ファイバ①¹⁾もこの領域に位置しており、これと比較すると低損失低非線形マルチコア光ファイバ⑦はSNRが約6dB向上することになる。SNR向上を多値変調による伝送容量増に活用すると、1コア当りの伝送容量倍増の可能性が考えられ、マルチコア光ファイバ①が12コア、⑦は7コアであることを考慮しても、低損失低非線形マルチコア光ファイバ⑦の光ファイバー本当たりの潜在的な伝送容量は①を上回る可能性があると考えられる。

上記の通り、マルチコア光ファイバを用いて光ファイバー本当たりの伝送容量増大を図る場合、光ファイバー本当たりのコア数とコア当りの伝送容量をどのように組み合わせるかが重要である。後者については、本稿で記載した通りマルチコア光ファイバの伝送損失と A_{eff} が重要な特性パラメータとなるが、 A_{eff} はコア間クロストークを介して、コア数とも相互に関連している(一定クラッド径内のコア数を増やせば、コア間隔が狭くなりコア間クロストークは増大する)。この様に、マルチコア光ファイバは依然開発途上であるため、究極的な大容量伝送用光ファイバを確定する上では、コア間クロストークのさらなる低減策の解明等、種々の課題を解決する必要があると考えられる。本稿がこの様な複雑な状況を俯瞰する上での参考となり、マルチコア光ファイバによる超大容量伝送の実現に向けた一助となれば幸いである。

謝 辞

この研究の一部は、(独)情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究/革新的光ファイバ技術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) H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, *et al.*: *ECOC postdeadline papers* (2012) Th.3.C.1.
- 2) K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh, and Y. Chigusa: *Electron. Lett.* **38** (2002) 1168.
- 3) T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki and E. Sasaoka: *OFC/NFOEC2011* (2011) OWJ3.
- 4) K. Saitoh, T. Matsui, T. Sakamoto, M. Koshiba, and S. Tomita: *OECC2010* (2010) 7C2-1.
- 5) 田中正俊, 山本 哲也, 木下 貴陽, 楠 修一, 谷口 浩一:
2012年電子情報通信学会総合大会(2012)B-10-19.
- 6) B. Yao, K. Ohsono, N. Shiina, K. Fukuzato, A. Hongo, E. Haruhico Sekiya, and K. Saito: *OFC/NFOEC2012* (2012) OM2D.5.
- 7) T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, and E. Sasaoka: *Opt. Express* **20** (2012) B94.
- 8) K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba: *Opt. Express* **19** (2011) B543.
- 9) S. Matsuo, K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, K. Saitoh, and M. Koshiba: *Opt. Lett.* **36** (2011) 4626.
- 10) H. Takara, H. Ono, Y. Abe, H. Masuda, K. Takenaga, S. Matsuo, H. Kubota, K. Shibahara, T. Kobayashi, and Y. Miyamoto: *Opt. Express* **20** (2011) 10100.

レーザーワード

光ファイバの非線形性(nonlinearity of optical fiber)

光ファイバに入射する光のパワーに応じて、光ファイバの特性、特に、屈折率が変化する性質。光ファイバの材料として使用される石英ガラスの非線形屈折率(光パワーに比例して変化する屈折率の係数)は $2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 程度と極めて小さいが、直径 $10 \mu\text{m}$ 程度のコア部分に光が閉じ込められ、光ファイバ中での光パワーの減衰が少

ないことから、長距離伝送においては非線形性の影響が無視できなくなる。具体的な影響としては、光パワーが増大する過程では屈折率上昇、減少する過程では屈折率低下と、屈折率が時間と共に変化するため光信号波形に歪が発生し、これが光伝送における誤り率を増大させることになる。(笹岡 英資)