

空間多重伝送用マルチコアファイバ

国立大学法人 北海道大学 小柴正則¹・齊藤晋聖²
光電子技術研究所 竹永勝宏³・佐々木雄佑³・荒川葉子³
谷川庄二⁴・官寧⁵・松尾昌一郎⁶

Multi-Core Fiber for Space-Division Multiplexing

M. Koshiha, K. Saitoh, K. Takenaga, Y. Sasaki,
Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, 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ための技術として、マルチコアファイバが注目されている。マルチコアファイバの伝送容量をより高めるためには、高密度のコア配置とともに、低いコア間クロストークが要求される。本稿では、高密度かつ低クロストークな構造のマルチコアファイバとして、トレンチ型マルチコアファイバを提案するとともに、実際に設計・試作したトレンチ型マルチコアファイバの検証結果を報告する。従来の単峰型構造と比較し、20 dB以上のクロストークの低減や、断面積で20%以上の高密度配置を実現した。

Multi-core fiber is of great interest as a candidate of future expansion of transmission capacity per fiber. High-dense core packing and low-crosstalk characteristic are required to realize the high transmission capacity in a multi-core fiber. In this paper, trench-assisted multi-core fiber (TA-MCF) is proposed as high-capacity multi-core fiber. The verified results of fabricated TA-MCFs are also reported. Improved characteristics of the TA-MCF of 20 dB lower crosstalk and 20% higher core density compared to step-index multi-core fiber, are realized.

1. ま え が き

1990年代のEDFAの発明を契機とするWDM技術の進展により、光通信システムの伝送容量は飛躍的に拡大した。しかし、インターネットトラフィックはいまだ増大を続けており、それを支える光通信システムにも伝送容量の拡大が求められ続けている。

近年、多値変調技術やMIMO技術、デジタル信号処理等を用いたデジタルコヒーレント受信技術の導入により伝送容量の拡大が図られ、光ファイバ1本あたり100 Tb/sの伝送実験結果が報告されるに至っている¹⁾。

しかし、これらの技術を持ってしても、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いる。既存のシングルモード光ファイバをベースにした伝送システムでは実用ベースで100 Tb/s程度が限界であるといわれており、さらなる伝送容量の拡大には

革新的な新技術が必要であるという認識が広がりつつある²⁾。必要とされる革新的技術のひとつとして、新規の伝送光ファイバの開発も含まれる。

われわれは、革新的技術の一候補である空間多重伝送用マルチコアファイバに注目し、開発を進めてきた^{3)~13)}。本稿では、トレンチ型屈折率分布によるマルチコアファイバのコア高密度化の検討結果について報告する。

2. 空間多重伝送用マルチコアファイバの構造と要求される特性

2.1 空間多重伝送用マルチコアファイバの基本構造

空間多重伝送用マルチコアファイバの断面写真を図1に示す。空間多重伝送用マルチコアファイバは、1

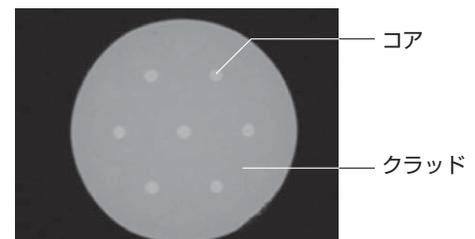


図1 マルチコアファイバの断面写真
Fig. 1. Cross sectional view of a multi-core fiber.

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 国立大学法人北海道大学大学院情報科学研究科准教授
3 光ファイバ技術研究部
4 光ファイバ技術研究部主席研究員
5 応用電子技術研究部 フェロー 上席研究員 学術博士
6 光ファイバ技術研究部グループ長 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
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	増幅（アンプ）媒体として希土類の一種であるエルビウムを用いた増幅器
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乗せる伝送方式. 伝送容量を拡大する方策のひとつ
MIMO	Multiple Input Multiple Output	複数の送信機で同時に異なるデータを送信し, 受信時に合成することで広帯域を実現する伝送技術
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

本の光ファイバ中に、各々独立した信号を伝送するためコアを複数個配置したファイバである。図1には、7つのコアを有しているマルチコアファイバの例を示した。

2.2 空間多重伝送用マルチコアファイバに要求される特性

空間多重伝送用マルチコアファイバでは、各コアは独立した信号（情報）を伝送するので、各コアの伝送容量を高めるためには、各コア間の信号の干渉や漏話（クロストーク）は出来得る限り低減する必要がある。一方、光ファイバあたりの伝送容量を高めるためには、ひとつひとつのコアの伝送容量を高めるとともに、コアの密度（コア多重度）を高めることも効果がある。これら、低クロストーク特性と高密度コア配置は空間多重伝送用マルチコアファイバ特有の要求特性であり、後述するように互いに相反する要求特性である。他にも、相互接続性や敷設容易性の観点から各コアのMFDや波長分散等の光学特性が概ね均質であることや、非線形現象による伝送品質劣化の回避の観点から各コアの A_{eff} が大きいことも空間多重伝送用マルチコアファイバに望まれる特性である。

2.3 マルチコアファイバのコア間のクロストーク

長手方向に均質な近接した2つのコアが存在する導波路において、あるコアからもう一方のコアへの光パワーの移行率 $P(z)$ は、モード結合理論から次式を用いて計算することが可能である¹⁴⁾。

$$P(z) = \eta \sin^2\left(\frac{\pi z}{2L_c}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 z はファイバの長手方向の位置、 η はパワー移行係数、 L_c はモード結合長を示している。 η なら

びに L_c はそれぞれ、

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2\kappa}\right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_1 - \beta_2} \dots\dots\dots (3)$$

である。ここで、 β_1 と β_2 は各コアを互いに独立したコアとみなした時の各コア伝搬モードの伝搬定数であり、 κ は各コアの伝搬モードの電界分布の空間的重なりから決まるモード結合係数である。また、光パワー移行率とクロストーク $X(z)$ の関係は、

$$X(z) = \frac{P(z)}{1 - P(z)} \dots\dots\dots (4)$$

なので⁷⁾、光パワー移行率を小さくすることとクロストークを低減することは同義である。光パワー移行率の振動成分を無視すれば（実際、伝送距離に比べて結合長 L_c は短いので光パワー移行率の振動成分を実用上無視できる）、光パワー移行率はパワー移行係数 η のみで決まる。 η に関する式 (2) を見れば、 η は2つのコアのモードの伝搬定数差 $\beta_1 - \beta_2$ とモード結合係数 κ に依存し、 $\beta_1 - \beta_2$ が大きいほど、また κ が小さいほど、 η は小さくできてクロストークを低減できることがわかる。

図2に、コア径差のコア径との比（相対コア径差） $\delta d/d$ と η の関係を示す（計算波長：1.55 μm ）。計算モデルを図3に示す。コア径 $d = 6 \mu\text{m}$ 、比屈折率差 $\Delta = 0.7\%$ の場合に、いくつかのコア間距離 Λ に対して計算を行った。計算には有限要素法¹⁵⁾を用いた。

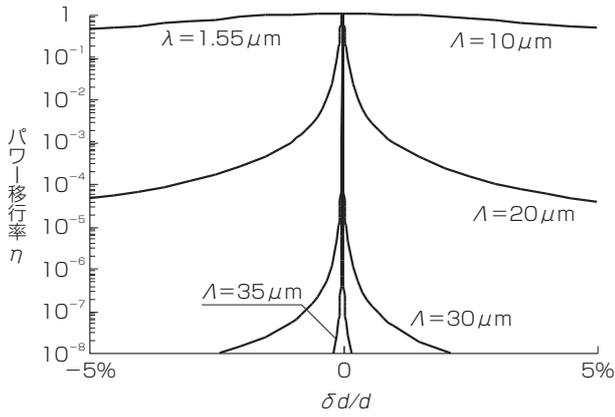


図2 相対コア径差とパワー移行率 (計算)
Fig. 2. Simulated power-conversion efficiency as a function of $\delta d/d$.

式 (2) より, 相対コア径差 $\delta d/d = 0$, すなわち同一なコア同士の場合, どのコア間距離 Λ においてもパワー移行率 η の値は 1 であり, 隣接コアに 100% パワーが移行してしまう. $\delta d/d$ を 0 からずらす, すなわち 2 つのコア径に差をつけると, η は低下し, その効果はコア間距離 Λ が広い場合により大きくなる. 例えば, Λ が $30 \mu\text{m}$ の場合, 2 つのコア径を高々 1% 違えるだけで, パワー移行率 η は 10^{-8} のオーダーとなり, パワーの移行を非常に小さくすることが可能である. なお, 図 2 においては, 伝搬定数 β に差をつけるためにコア径を変化させたが, 屈折率を変化させることでも同様の効果がある.

これらの結果からわかるように, クロストークを低減するためには, ある程度コアの間隔を保って電界分布の重なりを抑制するとともに, 各コアの伝搬定数に微小な違いを持たせることが重要となる. 一般に, 伝搬定数 β はコアの構造だけでなく曲がりや側圧等の外乱によっても変化し, またコア構造の長手方向の変動も影響するため, 伝送路全体にわたって安定的に伝搬定数に差を持たすことは難しい. 一方, β に大きく差をつけることは, 各コアの光学的性質が大きく異なることを意味しており, 相互接続性の観点から望ましくない³⁾.

以上から, クロストークを敷設状態によらず安定的に低く抑制しつつコア多重度を高めるためには, 各コアの伝搬モードの電界分布の空間的重なりから決まるモード結合係数 κ を小さくするマルチコアファイバの構造を実現することが望ましい.

モード結合係数 κ を小さくするマルチコアファイバの構造については, 図 4 のようにコアの周囲にトレンチや空孔¹⁶⁾を配置する方法が提案されている. いずれの構造もシングルコアとしては宅内配線用の低曲げ損失ファイバとして提案されている構造である^{17, 18)}.

われわれは, 空孔付与に比較して製造性の高いトレンチ構造に着目し, 低クロストークかつ高密度なマル

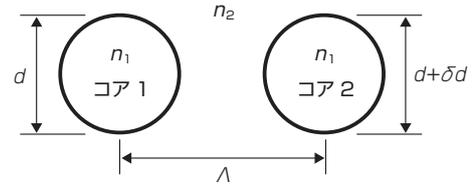


図3 2 コアモデル
Fig. 3. Two-core model for simulation.

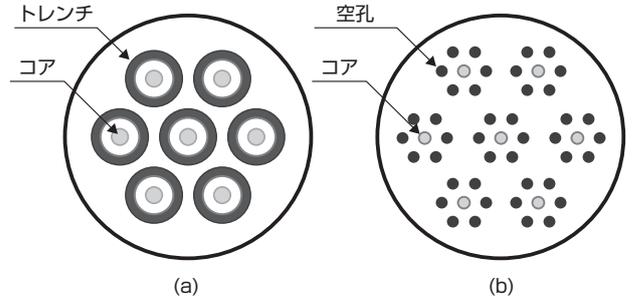


図4 低クロストークマルチコアファイバの提案例
(a) トレンチ型マルチコアファイバ (b) 空孔アシスト型マルチコアファイバ
Fig. 4. Proposed low-crosstalk multi-core fibers;
(a) Trench-assisted multi-core fiber, and (b) Hole-assisted multi-core fiber.

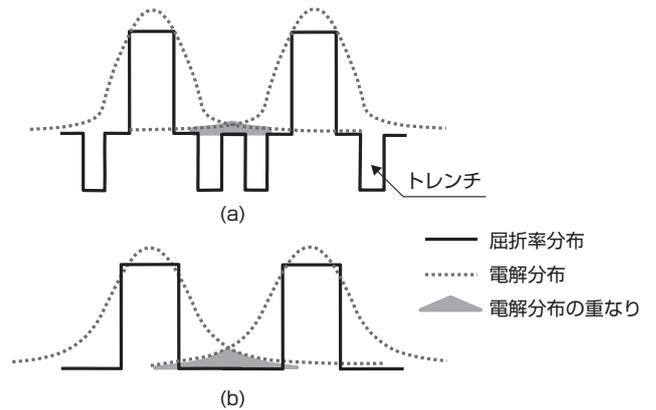


図5 屈折率分布と電界分布の重なり
(a) トレンチ型2コアファイバ (b) 単峰型2コアファイバ
Fig. 5. Refractive index profile and overlapping of electromagnetic field distribution;
(a) Trench-assisted two-core fiber, and (b) Step-index two-core fiber.

チコアファイバとしてトレンチ型マルチコアファイバを提案している^{9,10)}.

3. トレンチ型マルチコアファイバ

3.1 ファイバ設計

トレンチを付与することによる電界分布の重なり低減の効果を図 5 の模式図を用いて説明する. 図 5 は, トレンチ型 2 コアファイバと単峰型 2 コアファイバの屈折率分布と電界分布を模式的に示したものである. トレンチとは, コアの周囲に配置された環濠状の低屈折率部のことを指す (図 4 (a) および図 5 (a) 参照).

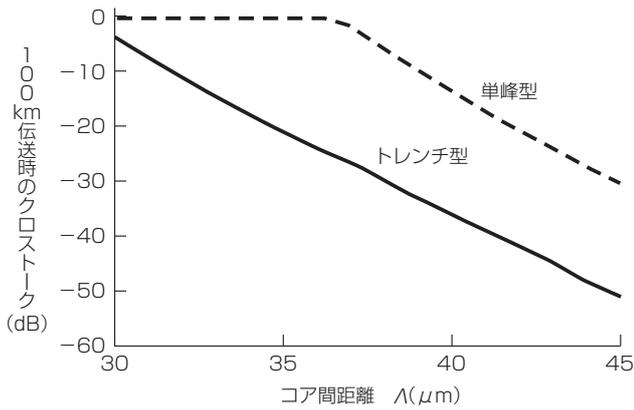


図6 コア間距離とクロストークの関係 (計算)

Fig. 6. Simulated relationship between core pitch and crosstalk.

表1 計算に用いたファイバ構造パラメータ
Table 1. Structural parameter values of fibers for simulations.

パラメータ (単位)	トレンチ型	単峰型
r_1 (μm)	4.10	4.04
r_2/r_1	2.23	—
r_3/r_1	3.23	—
W/r_1	1.00	—
Δ_1 (%)	0.375	0.413
Δ_2 (%)	-0.650	—
MFD @1.55 μm (μm)	9.46	9.46
ケーブルカットオフ波長 (μm)	1.24	1.24

トレンチ部は低屈折率なので光が導波しにくく、位置を適切に配置すれば図5に示すように、電界分布の裾の部分をつレンチの内側に閉じ込める効果がある。そのため、同じコア間距離でコアを配置しても、隣接したコアの電界分布の重なりを低減することが可能になる。

図6は、トレンチ型マルチコアファイバと単峰型マルチコアファイバのクロストークのコア間距離依存性の計算結果である。計算には長手方向の伝搬定数の変化も考慮に入れたパワー結合理論⁷⁾を用い、伝送距離が100 kmの時のクロストークの値を採用している。コアが7つの場合を想定し、各コアの構造パラメータの値を表1のように設定した。表1中のパラメータの意味は図7に示した。概ね同等の条件で計算するため、両構造でMFDとカットオフ波長がほぼ同じになるように構造パラメータを調整した。

比較的クロストークが小さい領域においては、同じコア間距離の場合、トレンチ型マルチコアファイバは単峰型マルチコアファイバと比べて20 dB程度クロストークが小さい。また、同等のクロストーク値を実現する場合、トレンチ型マルチコアファイバは単峰型マルチコアファイバと比べて約7 μm 程度コア間距離を近づけることができることが計算から求められた。

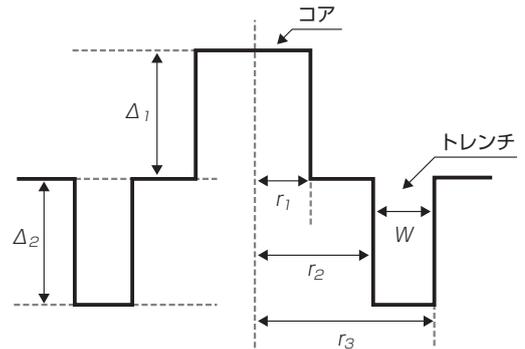


図7 ファイバ構造パラメータ

Fig. 7. Structural parameters of a fiber for simulations.

表2 試作ファイバの構造パラメータ
Table 2. Structural parameter values of fabricated fibers.

パラメータ (単位)	トレンチ型		単峰型
	Fiber A	Fiber B	S-MCF
Δ_1 (%)	0.37	0.36	0.40
Δ_2 (%)	-0.73	-0.70	—
Λ (μm)	38.3	35.4	39.4
ファイバ径 (μm)	136.9	125.4	137.5

3.2 ファイバ試作

計算結果をもとに、トレンチ型マルチコアファイバを試作した。試作したファイバの構造パラメータを表2に示す。コア間距離依存性を確認するために、コア間距離の異なるトレンチ型マルチコアファイバを2種類試作した (Fiber A, Fiber B)。また、比較のために、単峰型マルチコアファイバも試作した (S-MCF)。試作したファイバの光学特性測定結果を表3に示す。また、Fiber Bの断面写真を図8に示す。MFDはいずれも波長1.31 μm で9 μm 前後であり、汎用のシングルモードファイバ(G.652ファイバ¹⁹⁾)とほぼ同等である。

Fiber AとFiber Bの中心コアの波長1.55 μm における伝送損失はそれぞれ0.24 dB/kmおよび0.21 dB/kmであり、比較的 low 損失である。曲げ損失もトレンチの効果により非常に小さく、曲げ損失低減型ファイバの規格であるG.657.A2ファイバ相当の曲げ損失耐性を有している。カットオフ波長も概ねG.652ファイバの規格である1.26 μm 以下を実現しているが、コア間距離が最も近いFiber Bにて、中心コアのカットオフ波長のみ、1.39 μm と長かった。これは、中心コアは外側コアよりも隣接しているコア数が多い(6個)ため隣接コアのトレンチにより、高次モードの閉じ込めが強くなったためだと考えられる。

表3 試作ファイバの光学特性測定結果 各項目は中心コアの測定値。—は未測定を示す。

Table 3. Measurement results of fabricated fibers.

パラメータ (単位)		トレンチ型		単峰型
		Fiber A	Fiber B	S-MCF
MFD (μm)	@1.31 μm	8.7	9.2	8.6
	@1.55 μm	9.5	10.0	9.6
A_{eff} (μm^2)	@1.55 μm	70.7	76.6	71.6
伝送損失 (dB/km)	@1.31 μm	0.38	0.38	—
	@1.55 μm	0.24	0.21	—
曲げ損失 (dB/turn)	@ $r=7.5$ mm, 1.625 μm	0.15	0.070	1.1
	@ $r=5$ mm, 1.625 μm	0.17	0.34	3.4
ケーブルカットオフ波長 (μm)		1.26	1.39	1.26
零分散波長 (μm)		1.303	1.306	1.316
分散スロープ (ps/nm ² /km)	@ 零分散波長	0.094	0.092	0.086
波長分散 (ps/nm/km)	@1.55 μm	19.0	18.5	16.2

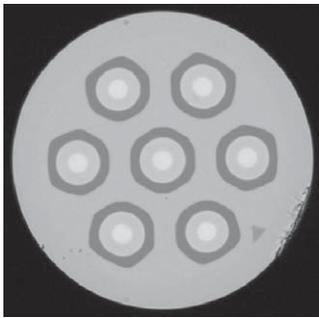


図8 試作したトレンチ型マルチコアファイバの断面写真 (Fiber B)

Fig. 8. Cross sectional view of fabricated trench-assisted multi-core fiber (Fiber B).

図9は、試作したトレンチ型マルチコアファイバの内側コアと外側コアのカットオフ波長のコア間距離依存性をプロットしたものである。図中の実線と点線はそれぞれ試作したファイバのコア構造を用いて計算した内側コアと外側コアのコア間距離依存性の計算結果である。計算と実測でカットオフ波長のコア間距離依存性が良く一致している。この結果から、本設計では、1.31 μm 帯も伝送に使用する場合、コア間距離は約 38 μm 程度が限界となる。1.55 μm 帯の伝送であれば、Fiber B (コア間距離 35.4 μm) で問題なく伝送できるだけでなく、コア間距離をさらに 33 μm 程度まで近づけても (カットオフ波長的には) 問題ないとの結果が得られた。

波長分散およびその他の光学特性に関しても各コアで大きな差は無く、汎用光ファイバに近い光学特性を有していた。

3.3 検証実験

試作したファイバのコア間のクロストークを測定した。クロストークの測定結果および測定結果から推算⁷⁾した 100 km 伝送時のクロストーク推算値を表4に示す。ここで、記載されているクロストークの値は表4

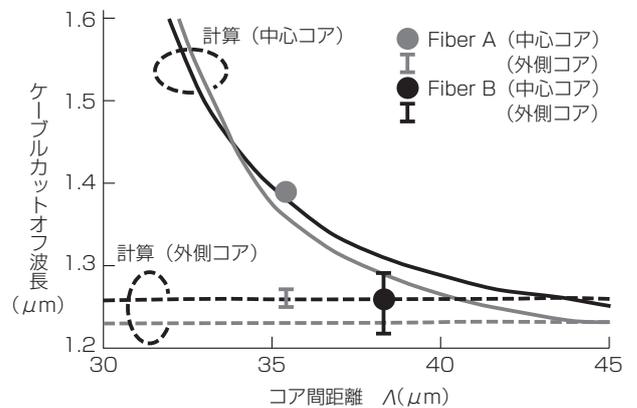


図9 カットオフ波長のコア間距離依存性

Fig. 9. Core pitch dependence of measured and simulated cutoff wavelengths.

表4 試作ファイバのクロストーク測定結果

Table 4. Measured crosstalk of fabricated fibers.

パラメータ (単位)		トレンチ型		単峰型
		Fiber A	Fiber B	S-MCF
ファイバ長 (m)		3,010	2,063	5,000
コア間距離 (μm)		38.3	35.4	39.4
クロストーク (dB)	平均	-50	-42	-27
	最大	-49	-41	-25
	最小	-53	-44	-29
推定クロストーク @100 km 伝送時 (dB)		-35	-25	-14

に記載のファイバ長における中心コアから外側コアへのクロストークの測定結果を示している。単峰型である S-MCF と比較すると、Fiber A はコア間距離が約 1 μm 近いにも関わらずクロストークは約 20 dB 改善しており、Fiber B にいたってはコア間距離が約 4 μm も近いのにも関わらずクロストークも約 10 dB 改善している。これらから、トレンチ型マルチコアファイバ

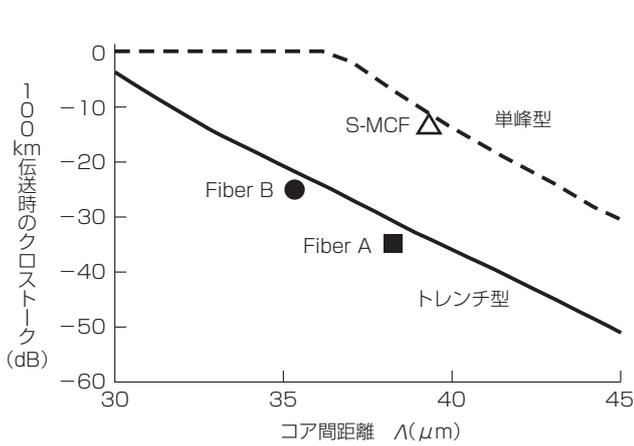


図10 コア間距離とクロストークの関係
Fig. 10. Relationship between core pitch and crosstalk.

構造が、クロストークを低減しつつ高密度配置ができるマルチコアファイバとして非常に有効であることが確認できた。

図10は、図6の計算結果に試作したファイバのコア間距離とクロストークの測定値をプロットしたものである。実測結果は計算結果と良く一致しており、われわれの計算手法⁷⁾の実用性についても確認がなされた。また、図10の結果をもとにすれば、100 km 伝送時のクロストークが-30 dB以下であることをクロストークの設計指標とした場合、われわれが開発したトレンチ型マルチコアファイバは単峰型マルチコアファイバと比較してコア間距離を約16% (約7 μm) 近づけることが可能になる。これは、コア密度を約20%高めることに相当する。

4. トレンチ構造による高密度化の検証

われわれは、コア密度を評価する指標として、コア多重度指数 (CMF) を提案している²⁰⁾。ある A_{eff} の n 個のコアを直径 D のクラッド内に収容した MCF のコア多重度指数を以下の式で定義する。

$$CMF = \frac{nA_{eff}}{\pi(D/2)^2} \dots\dots\dots (5)$$

CMF が大きいほど、クラッド領域を効率的に利用し多くの領域を光の伝搬に使っていることを示す。以下の議論では、MCF の CMF を汎用のシングルモードファイバの CMF で除した相対多重度指数 (RCMF) を用いる。

RCMF を指標に、本稿のトレンチ型マルチコアファイバと既報告のマルチコアファイバを比較した結果を以下に示す。比較対象としては、本稿のファイバとほぼ同一のクロストーク (100 km 伝送時に -25 dB 以下) と推測されるファイバを用いた。いずれのファイバもコア数は7である。図11に比較結果を示す。図中の

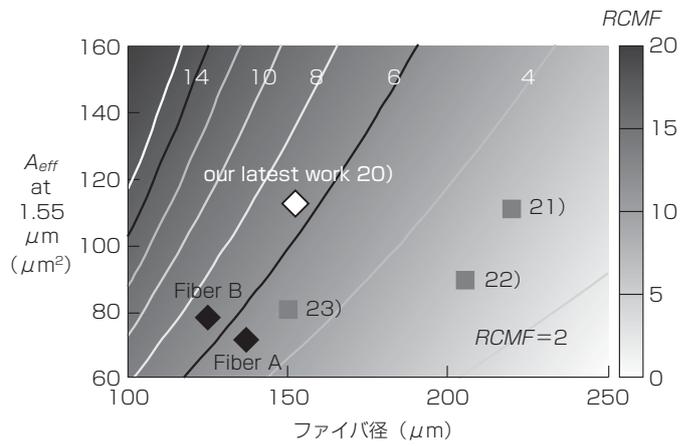


図11 相対コア多重度指数の比較
Fig. 11. Comparison of relative core multiplicity factor.

線は、7コアのマルチコアファイバに対して、ファイバ径 (クラッド径) と A_{eff} から算出される RCMF である。

既報告のマルチコアファイバ^{21) 22) 23)} の RCMF は3~5程度であったのに対して、われわれが開発したトレンチ型マルチコアファイバでは、6.7という世界最高の RCMF を示している。また、 A_{eff} を $110 \mu m^2$ まで拡大しても、同程度の RCMF を有する MCF が実現可能である²⁰⁾。

以上の結果から、今回開発したトレンチ型マルチコアファイバが多重度の面でも、クロストーク特性の面でも非常に優れた特性を有しているといえる。

5. むすび

マルチコアファイバの伝送容量をより高めるために、高密度かつ低クロストークな構造のマルチコアファイバとしてトレンチ型マルチコアファイバを提案し、設計、試作した。

従来の光ファイバと同等の MFD を維持しつつ、コア間距離 $35.4 \mu m$ の設計で100 km 伝送時のクロストークは -25 dB となった。従来の単峰型構造と比較し、20 dB 以上のクロストークの低減と20%のコア高密度化を実現した。

また、既報告のマルチコアファイバとのコア多重度の比較を行い、現時点で最も多重度の高いマルチコアファイバであることを示した。

参 考 文 献

- 1) D. Qian, et al.: "101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PMD-128QAM-OFDM transmission over 3 × 55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation," OFC/NFOEC 2011, PDPB5, 2011
- 2) T. Morioka: "New generation optical infrastructure technologies: "EXAT initiative" towards 2020 and beyond," OECC 2009, FT4, 2009
- 3) K. Takenaga, et al.: "Reduction of crosstalk quasi-homogeneous solid multi-core fiber," OFC/NFOEC 2010, OWK7, 2010
- 4) 荒川ほか:「準均一マルチコアファイバによるクロストークの低減」, 2010年信学総大, B-10-19, 2010
- 5) 荒川ほか:「準均一マルチコアファイバによるクロストークの低減」, 信学技報, OCS2010-48, 2010
- 6) 竹永ほか:「準均一マルチコアファイバ」, 2010年信学ソ大, BS-6-6, 2010
- 7) K. Takenaga, et al.: "An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction," IEICE Trans. on Commun., Vol. E94-B, pp.409-416, 2011
- 8) S. Matsuo, et al.: "Crosstalk behavior of cores in multi-core fiber under bent condition," IEICE Electron. Express, Vol.8, pp.285-390, 2011
- 9) K. Takenaga, et al.: "Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber," OFC/NFOEC 2011, OWJ4, 2011
- 10) 荒川ほか:「トレンチ型マルチコアファイバによるクロストークの低減」, 2011年信学総大, B-10-2, 2011
- 11) 松尾ほか:「マルチコアファイバのクロストーク特性における曲げの影響」, 2011年信学総大, B-10-4, 2011
- 12) Y. Arakawa, et al.: "Length dependence of cutoff wavelength of trench-assisted multi-core fiber," OECC 2011, 6C2-5, 2011
- 13) 松尾ほか:「伝送容量の更なる拡大にむけたマルチコア・マルチモード技術」, 信学技報, OPE2011-32, 2010
- 14) M. Koshihara, et al.: "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," IEICE Electron. Express, Vol. 6, pp. 98-103, 2009
- 15) K. Saitoh, et al.: "Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: Application to photonic crystal fibers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 38, pp. 927-933, 2002
- 16) K. Saitoh, et al.: "Multi-core hole-assisted fibers for high core density space division multiplexing," OECC 2010, 7C2-1, 2011
- 17) 周ほか:「フォトニック結晶ファイバの構内, 宅内配線への適用に関する検討」, 信学技報, OFT2002-81, 2003
- 18) S. Matsuo, et al.: "Bend-insensitive and low-splice-loss optical fiber for indoor wiring in FTTH," OFC/NFOEC 2004, ThI4, 2004
- 19) ITU-T Recommendation G.652 (11/2009), "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," Version 6, 2009
- 20) K. Takenaga, et al.: "A large effective area multi-core fibre with an optimised cladding thickness," ECOC 2011, Mo. 1. LeCervin. 2, 2011
- 21) K. Imamura, et al.: "Design optimization of large A_{eff} multi-core fibers," OECC 2010, 7C2-2, 2010
- 22) K. Imamura, et al.: "Effective space division multiplexing by multi-core fibers," ECOC 2010, P1.09, 2010
- 23) T. Hayashi, et al.: "Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission," OFC/NFOEC 2011, PDPC2, 2011