

空間多重伝送を実現するマルチコアファイバ伝送路

Multi Core Fibers to Realize Space Division Multiplexing

今村 勝徳^{*}
Katsunori Imamura

武笠 和則^{*}
Kazunori Mukasa

杉崎 隆一^{*}
Ryuichi Sugizaki

概要 有効コア断面積 (A_{eff}) を拡大したマルチコアファイバを実現するために、クロストークを抑制可能とする設計方法の開発と、クラッド径によるマイクロバンド損失への影響について検討した。その結果、 $100 \mu\text{m}^2$ を超える大 A_{eff} 特性及び低マイクロバンド損失特性を有するマルチコアファイバの開発に成功した。この過程では、大 A_{eff} のマルチコアファイバを実現するため、マイクロバンド損失に大きな影響を及ぼすクラッド径を考慮に入れてファイバ設計することが重要であった。さらに、設計の最適化により、クロストーク特性を改善するとともに、伝送損失特性も改善された大 A_{eff} マルチコアファイバを実現した。

1. はじめに

マルチコアファイバは、空間多重 (space division multiplexing; SDM) により伝送容量を劇的に拡大できる可能性を有している。マルチコアファイバのコンセプト自体は30年以上も前から提案されていたが¹⁾、それ以来、センサやファイバレーザなど、長距離伝送路以外の分野が検討の対象となっていた^{2)~4)}。しかし最近になって、近い将来に伝送容量が不足する可能性が指摘され、伝送路にも革新的な技術の導入が要求されることが報告された⁵⁾。それ以来、長距離伝送を目的としたマルチコアファイバが急速に注目を集めるようになり、図1のようなソリッド型あるいはホーリー型のマルチコアファイバが提案されている^{6), 7)}。一方、ファイバ1本あたりの伝送容量を拡張する検討も精力的に進められているが^{8), 9)}、これらの検討では、変調フォーマットの改良もさることながら、有効コア断面積 (A_{eff}) の拡大などファイバの特性改善も大きく貢献すると期待されている。そのため、マルチコアであり、かつ A_{eff} も拡大したファイバが実現できれば、空間多重に加えて非線形性の抑制も可能となり、伝送容量に及ぼすインパクトは大きいと予想される。

マルチコアファイバの A_{eff} 拡大を検討するにあたり、コア間干渉の増大とマイクロバンド損失が、解決すべき最も重要な課題である。本稿では、ソリッド型のマルチコアファイバにおいて、 A_{eff} 拡大に伴うコア間干渉増大を抑制する設計について検証した結果、曲げ損失を一定に保つことでコア間干渉を増大することなく A_{eff} の拡大が可能であるという設計指針を得た。また、クラッド径によるマイクロバンド損失への影響についても

検証した結果、マイクロバンド損失を低減するためには、十分なクラッド径を確保する必要があることを明らかにした。これらの最適設計に基づき試作を行い、 A_{eff} が $100 \mu\text{m}^2$ 以上に拡大され、マイクロバンド損失も抑制されたマルチコアファイバを実現した。クロストーク特性も2 km 伝搬後に -38 dB (100 km 伝搬後の推定値は -33 dB) と十分良好な特性が得られた。

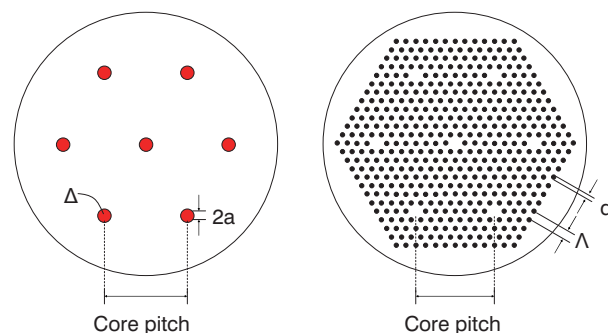


図1 マルチコアファイバの断面模式図(左:ソリッド型, 右:ホーリー型)
Cross sections of multi core fibers (Left: Solid fiber type, Right: Holey fiber type).

2. クラッド径最適化によるマルチコアファイバのマイクロバンド損失低減検討

2.1 大 A_{eff} 、低クロストークのマルチコアファイバの設計

まず、マルチコアファイバにおいて A_{eff} を拡大するために必要となる設計事項について検討を行った。マルチコアファイバの A_{eff} 拡大に伴い、コア間干渉が増大することに注意する必要がある。そこで、 A_{eff} 及び曲げ損失とコアピッチの関係についてシミュレーションを行った。プロファイルはステップインデックス型とし、コアピッチは100 km 伝送後のクロストーク

^{*} 研究開発本部ファイナルフォトニクス研究所

が-30 dBとなるコアピッチを算出した。その結果、図2に示すように、曲げ損失を一定に保つことにより、 A_{eff} を拡大しても必要となるコアピッチをほぼ一定に保てることを見出した。曲げ損失を一定に保ったままカットオフ波長(λ_c)をシフトさせる設計指針を適用することで、コア間干渉を増大させることなく A_{eff} の拡大を可能とさせる。

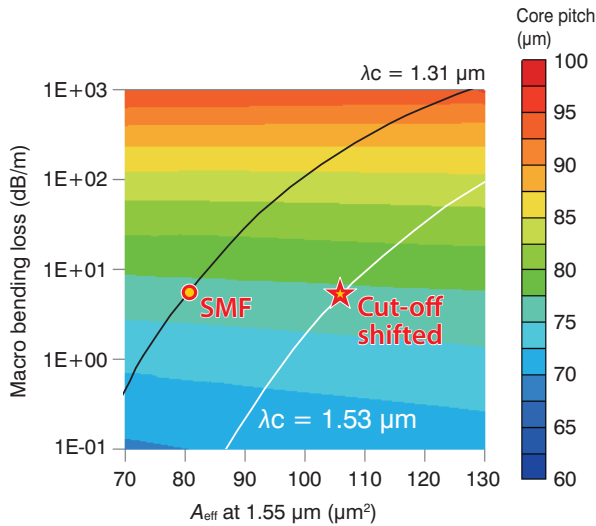


図2 A_{eff} 、及び曲げ損失と100 km 伝送に必要なクロストークとの関係(波長：1550 nm)
Relationship between A_{eff} , macro bending loss and core pitch required to realize 100 km transmission with low cross-talk (@1550 nm).

マルチコアファイバの高コア密度化技術を小柴らが提案している⁶⁾。実効屈折率がわずかに異なるコアを導入することにより、パワー変換効率を劇的に向上させ、クロストークを抑制可能にすることが示されている。ただし、これまで報告されている A_{eff} は従来の標準単一モードファイバ(SMF)と同等若しくはそれ以下であった。この異種コアを用いた高密度化手法は A_{eff} を拡大した場合でも適用可能であると考えられるので、今回の設計における効果を検証した。設計の結果を図3及び表1に示す。図3には、コア配置の模式図を合わせて示した。実効屈折率の異なる3種類のコアを色分けして示している。このように、隣り合うコア同士が必ず異種コアになるように設計している。今回、工程簡素化の可能性を考慮して、コアの比屈折率差(Δ)を0.31%に固定したまま、コア径を変化させた場合のクロストークについて検証を行った。図3に示すように、コア径をわずかに0.2 μm 離すことにより、-60 dBを下回る良好なクロストークを実現可能であることが確認された。ここで、コアピッチは42 μm としており、これは同種コア同士の間隔が75 μm のクロストークに相当していることが図3のコア断面図から分かる。Cバンドでの使用を想定してケーブルカットオフ波長(λ_{cc})を1530 nm以下に設定し、直径20 mmにおける曲げ損失が5 dB/m以下となるように最適化設計を行った。その結果、表1に示すように、 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ のコア径差を設けた場合でも、いずれのコア径においてもカットオフ波長を1530 nm以下、曲げ損失を5 dB/m以下に保ちつつ、100 μm^2 以上の大 A_{eff} 特性を実現可能であることが明らかである。すなわち、これらの設

計結果から、100 μm^2 以上の大 A_{eff} 特性と高コア密度を同時に実現可能であることが示された。

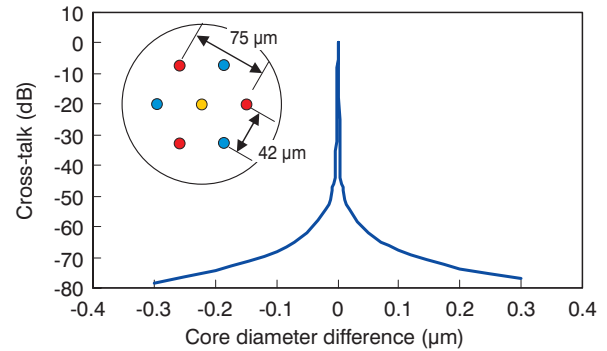


図3 クロストークのコア径差依存性(波長：1550 nm)
Cross-talk between neighboring cores (@1550 nm).

表1 各コア径に対する A_{eff} 、 λ_{cc} 及び曲げ損失の計算値
Design properties of each core.

コア径	A_{eff}	λ_{cc}	曲げ損失*
μm	μm^2	nm	dB/m
10.2	100	1460	3.2
10.4	102	1490	2.3
10.6	104	1520	1.6

*直径20 mmにおける曲げ損失

2.2 クラッド径によるマイクロバンド損失特性への影響

上記の設計結果に基づき、スタック&ドロウ法を用いて実際にファイバを試作した。ここで、マルチコアファイバの外側コアはクラッド外縁に近い部分に配置されることから、マイクロバンド損失が大きくなることが懸念される。そこで、クラッド径のマイクロバンド損失に対する影響についても調査を行った。すなわち、クラッド径を変えた2種類のファイバ(ファイバ#1:クラッド径 141 μm , ファイバ#2:クラッド径 215 μm)を試作し、マイクロバンド損失の比較を行った。試作したファイバの設計模式図と断面写真を図4及び図5に示す。コアピッチはいずれも40 μm であり、設計とはほぼ同程度であった。被覆によるマイクロバンドへの影響を同等として比較するために、被覆の厚みが両ファイバで等しくなるように試作した。さらに、ファイバ化した際、コアの配置を識別できるよう、光学特性に影響を及ぼさない位置に3箇所の空孔を設けて、コア配列識別用のマーカとした。

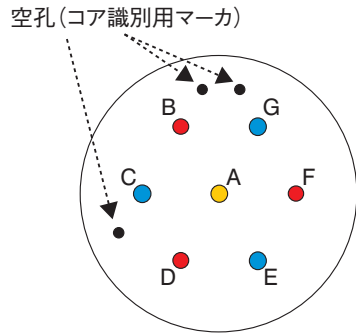


図4 試作ファイバの設計模式図（空孔：コア識別用マーカー，A～G：コア）
Cross section of designed fiber with air holes as markers.

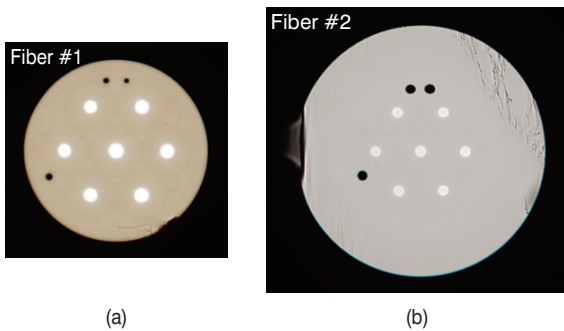


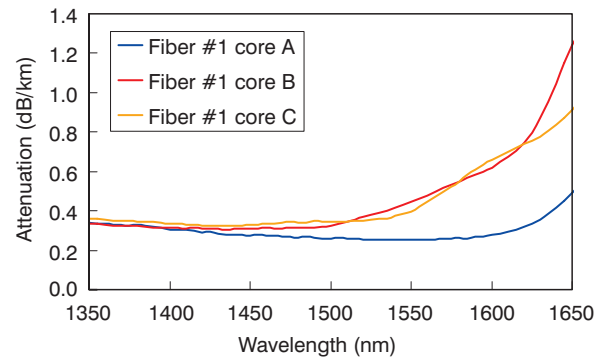
図5 2種の試作ファイバの断面図
(a) ファイバ #1 (クラッド外径：141 μm)，
(b) ファイバ #2 (クラッド外径：215 μm)
Cross sections of fabricated fibers
(a) Fiber #1: 141 μm, (b) Fiber #2: 215 μm.

ファイバ #1 及びファイバ #2 の評価結果を表2に示す。今回、3種類のコアを用いていることから、各ファイバについて、中心のコアAと、隣り合う2つの外側コア(B及びC)を選択し、測定を行った。図6に示した損失スペクトルの結果から、クラッド径の小さいファイバ #1 においては、外側のコア(B及びC)の長波長領域での損失増大が著しいのに対して、クラッド径を拡大したファイバ #2 ではいずれのコアでも長波長の損失増大が抑制されており、クラッド径拡大によるマイクロバンド抑制の効果を確認することができた。

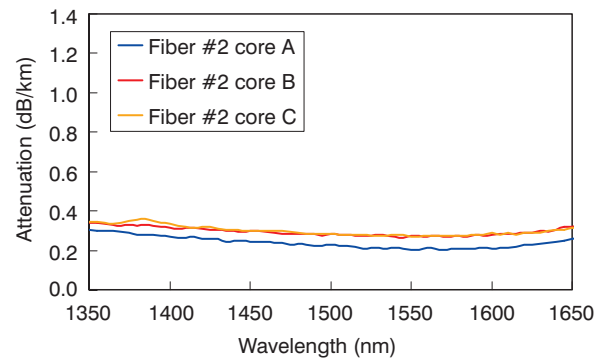
表2 試作ファイバ #1 及び #2 の光学特性 (波長：1550 nm)
Optical properties of Fiber #1 and Fiber #2 (@1550 nm).

ファイバ名	コア No.	損失	分散	スロープ	A_{eff}	λ_{cc}	曲げ損失*
		dB/km	ps/nm/km	ps/nm ² /km	μm ²	nm	dB/m
ファイバ #1	A	0.254	19.0	0.062	110	1367	10.1
	B	0.444	18.1	0.060	103	1337	16.7
	C	0.398	18.6	0.060	106	1357	7.1
ファイバ #2	A	0.205	19.1	0.062	101	1378	4.4
	B	0.273	18.6	0.060	103	1367	7.2
	C	0.270	18.4	0.061	99	1357	13.3

* 直径 20 mm における曲げ損失



(a)



(b)

図6 試作ファイバの損失スペクトル
(a) ファイバ #1 (クラッド径：141 μm)，
(b) ファイバ #2 (クラッド径：215 μm)
Attenuation spectra of fabricated fibers
(a) Fiber #1: 141 μm, (b) Fiber #2: 215 μm.

3. コアピッチ最適化によるクロストーク特性の改善

3.1 コア密度を考慮に入れたコアピッチ設計の最適化

前述のように、十分な大きさのクラッド径とすることで損失特性が大幅に改善されることが確認できたが、もうひとつ解決すべき課題として、クロストークが挙げられる。表3に示すように、2 km のファイバにおけるクロストーク (コア A に光を入射したときのコア B, C における透過パワー比) は、100 km 伝搬後に -60 dB 以下という設定値に比べて約 -20 dB という高い値であった。加えて、ファイバ #1 のコア A についてはクラッドが十分厚いにもかかわらず、長波長での損失増大が確認されたが、これにも高クロストークが影響していると考えられる。

クロストークが増大した理由として、コア径差やコアピッチが設計よりも小さくなってしまったことが推測される。そこで、大 A_{eff} マルチコアファイバの光学特性を改善すべく、これらの要因を考慮に入れた設計の最適化を実施した。

表3 2 km 伝搬後のクロストーク (波長: 1550 nm)
Cross-talk after 2 km transmission (@1550 nm).

Core No.	Fiber #1	Fiber #2
B	-17 dB	-21 dB
C	-20 dB	-18 dB

まず、コア径差が小さくなった点に関しては、設計段階でマージンを持たせることで改善を試みた。一方、最適なコアピッチに関しては、クロストークとコア密度の観点から再検討を行った。コア密度は、次式 (1) で定義される『規格化コア数』を用いて評価した。

$$\text{規格化コア数} = N_{\text{MCF}} \frac{S_{\text{SMF}}}{S_{\text{MCF}}}$$

ここで、 N_{MCF} とはマルチコアファイバ(MCF)のコア数であり、 S_{SMF} 、 S_{MCF} はそれぞれ基準となる標準SMF並びにMCFの各ファイバの占める面積である。すなわち、 N_{MCF} は単位面積 (従来の250 μm の被覆外径を有する標準SMFの占める面積) 当たりの実効的なコア数を表す値であり、マルチコアファイバにおける空間の有効利用率を指標化したものである。この様子を図7に示している。マルチコアファイバの被覆の厚みは従来SMFと同等とした。クロストークと規格化コア数のコアピッチ依存性を図8に示す。クロストークとしては、最も支配的となる同種コア間のクロストーク値を示している。その結果、コアピッチを大きくすることで、クロストークが急激に抑制されるのに対し、規格化コア数への影響は比較的小さいことが確認された。このことから、コアピッチの拡大は、クロストーク特性改善の手段として効果的であると言える。そこで今回は、コアピッチが40 μm であったファイバ#2に対して30 dBのクロストーク抑制を可能とすべく、コアピッチを46 μm として試作を行うこととした。

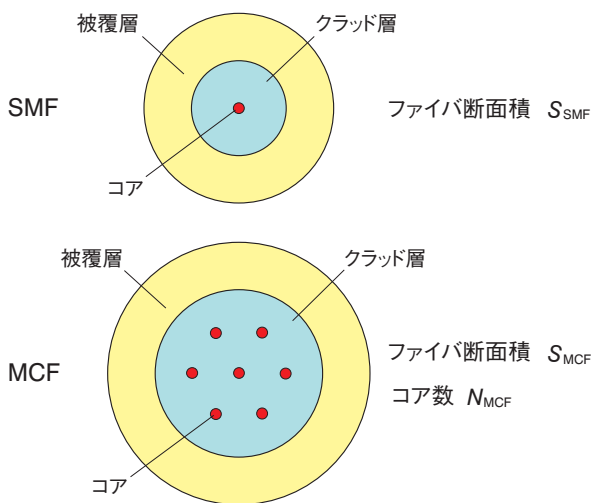


図7 規格化コア数の定義
Definition of the normalized core numbers of MCFs.

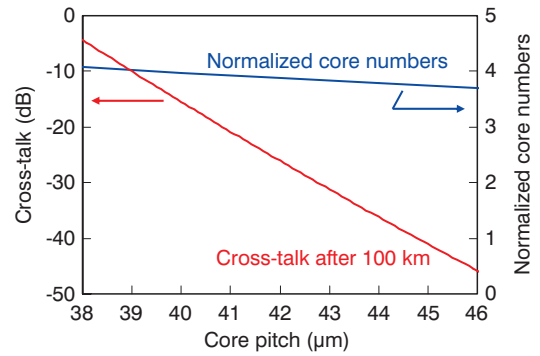


図8 クロストーク及び規格化コア数のコアピッチ依存性
Core pitch dependence of cross-talk after 100 km transmission and normalized core numbers.

3.2 最適設計に基づくファイバ試作

試作したファイバ (ファイバ#3) の断面写真を図9に、コア径のそれぞれ異なる3つのコア (A, B, C) の光学特性を表4に示す。ファイバ#3のクラッド径は217 μm であった。カットオフ波長の結果から、設計と同程度のコア径差を実現できていることが推定できる。その他の光学特性についても、設計と同様の結果が得られており、 A_{eff} は100 μm^2 以上に拡大できている。各コアの損失スペクトルを図10に示す。比較のために、ファイバ#3と同程度のクラッド厚、被覆厚を有するシングルコアファイバの損失スペクトルも合わせて示している。ここでクラッド厚とは、クラッドの外周に最も近いコアとクラッド外周との距離を表しており、マルチコアファイバでは外側コアの中心位置からクラッド外周までの距離、シングルコアファイバではクラッド半径を表している。外側コアの損失は中心コアよりも若干高めの値となっているが、シングルコアファイバのスペクトルとはほぼ重なっていることから、マルチコアファイバに必要なクラッド厚をシングルコアファイバの特性から予測することが可能であると考えられる。

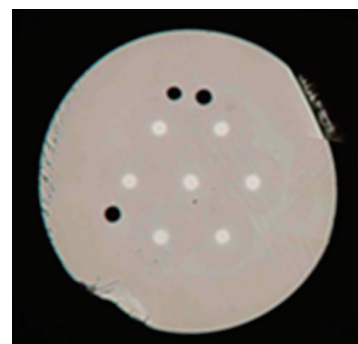


図9 ファイバ #3 の断面写真
Cross section of Fiber #3.

表4 試作ファイバ#3の光学特性(波長:1550 nm)
Optical properties of Fiber #3 (@1550 nm).

ファイバ名	コアNo.	損失	分散	スロープ	A_{eff}	λ_{cc}	曲げ損失*
		dB/km	ps/nm/km	ps/nm ² /km	μm^2	nm	dB/m
ファイバ #3	A	0.213	19.6	0.062	110	1491	3.0
	B	0.237	19.4	0.062	107	1470	3.9
	C	0.237	19.0	0.061	99	1408	8.1

*直径20 mmにおける曲げ損失

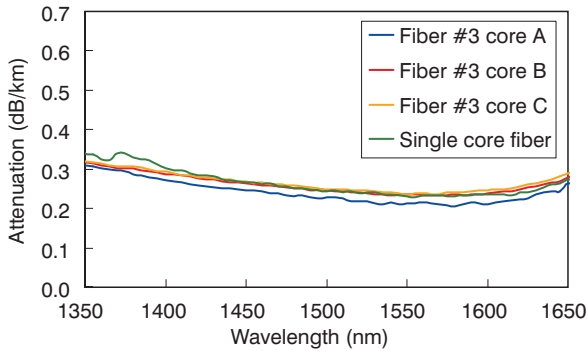


図10 試作マルチコアファイバ(ファイバ #3) 及びシングルコアファイバの損失スペクトル
Attenuation spectra of fabricated multi core fiber (Fiber #3) and single core fiber.

クロストークの条長依存性を測定した結果を図11に示す。3.5 km伝送後のクロストークが-38 dBとなっており、ファイバ#1及びファイバ#2の結果(2 km伝送後に約-20 dB)と比べて大きく改善された。クロストークの条長依存性の結果から、100 km伝送後のクロストークは約-33 dBとなることが推測される。すなわち、ファイバ設計を最適化したことにより、長距離伝送用マルチコアファイバに求められる低クロストーク特性を実現することができた。

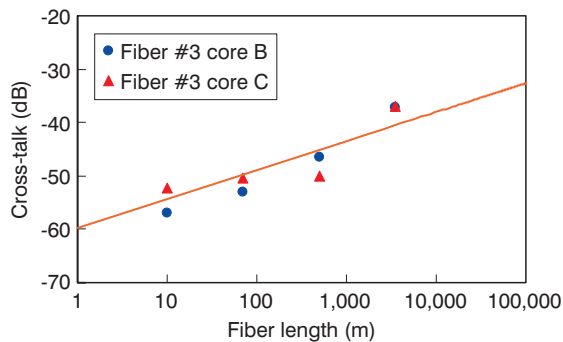


図11 クロストーク条長依存性(波長:1550 nm)
Fiber length dependence of cross-talk (@1550 nm).

4. まとめ

大 A_{eff} マルチコアファイバを実現すべく、コア間クロストーク低減のための設計指針と、マイクロバンド損失についての検証を行った。その結果、 A_{eff} が100 μm^2 以上に拡大され、マイクロバンド損失も抑制されたマルチコアファイバの開発に成功

した。大 A_{eff} マルチコアファイバ実現のためには、マイクロバンド損失に大きな影響を及ぼすクラッド径を考慮に入れた設計が重要であることが示された。また、設計の最適化により、クロストーク特性を改善するとともに、伝送損失特性も改善されたマルチコアファイバを実現した。

謝辞

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) S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, T. Kuroha, and Y. Nishimura, "Multicore optical fiber," in Technical Digest of Optical Fiber Communication (1979), paper WB1.
- 2) M. J. Gander, W. N. MacPherson, R. McBride, J. D. C. Jones, L. Zhang, I. Bennion, P. M. Blanchard, J. G. Burnett, and A. H. Greenaway, "Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre," Electron. Lett., **36** (2000), 120-121.
- 3) Y. Huo, P. K. Cheo, and G. G. King, "Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier," Opt. Express, **12** (2004), 6230-6239.
- 4) N. N. Elkin, A. P. Napartovich, V. N. Troshchieva, and D. V. Vysotsky, "Diffraction modeling of the multicore fiber amplifier," IEEE J. Lightwave Technol., **25** (2007), 3072-3077.
- 5) T. Morioka, "New Generation Optical Infrastructure Technologies: "EXAT Initiative" Towards 2020 and Beyond," in Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference, (2009), paper FT4.
- 6) M. Koshiba, K. Saitoh, and Y. Kokubun, "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," IEICE Electronics Express, **6** (2009), 98-103.
- 7) K. Imamura, K. Mukasa, and T. Yagi, "Multi-core holey fibers for the long-distance (>100 km) ultra large capacity transmission," in Proceedings of Optical Fiber Communications Conference, (2009), paper OTuC3.
- 8) C. Sethumadhavan, X. Liu, B. Zhu, and D. W. Peckham, "Transmission of a 1.2-Tb/s 24-Carrier No-Guard-Interval Coherent OFDM Superchannel over 7200-km of Ultra-Large-Area Fiber," in Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communications, (2009), paper PD2.6.
- 9) G. Charlet, M. Salsi, P. Tran, M. Bertolini, H. Mardoyan, J. Renaudier, O. Bertran-Pardo, and S. Bigo, "72x100Gb/s Transmission over Transoceanic Distance, Using Large Effective Area Fiber, Hybrid Raman-Erbium Amplification and Coherent Detection," in Proceedings of Optical Fiber Communications Conference, (2009), paper PDPB6.