

平成24年度研究開発成果概要書

「革新的光通信インフラの研究開発」(150ウ01)

課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術

副題 マルチコア/マルチレベル/マルチモード光伝送技術の研究

(1) 研究開発の目的

光通信技術は過去40年間、超低損失光ファイバ、狭線幅半導体レーザ、低雑音光検出器、高速電子回路、広帯域光増幅器などの数多くの革新的な発明により着実に伝送容量を増加させており、特に過去20年間では1,000倍の大容量化を実現している。現在、我が国の基幹系商用システムでは1ファイバあたり1.6 Tb/sが、また実験レベルでは100 Tb/s伝送が実現している。

この超大容量光通信技術は伝送路である光ファイバや光増幅器の物理的限界に達しつつある。具体的には、超大容量化に伴う光信号の高パワー化により光ファイバ中に誘起される非線形光学効果と、パワー集中により光ファイバのコア部が溶融して光ファイバを逆走するファイバフェーズ、光ファイバの低損失波長域と光増幅器の帯域制限などである。これに対して、現在我が国の通信トラヒックは依然として年率1.4倍で伸びており、20年後には1,000倍の需要が予想される。

技術が確立している石英系光ファイバを使用しつつこの物理限界を打破するためには、コア部に集中する光信号パワー密度の最大値を下げる事が必要になる。

光信号パワー密度低減方法として最も有効なものは複数のコアに光信号を分散させるマルチコア伝送である。マルチコア伝送によって、通常の単一モードファイバを使用した場合に比べるとコア数分の伝送容量の拡大が期待できる。光信号パワー密度低減の別法としては単一モードファイバに比べてコア径の大きいマルチモードファイバを用いる伝送がある。従来マルチモードファイバ中をシングルモード伝送させる研究は行われているが、各伝搬モードを個別の伝送チャネルとして用いるモード多重伝送を行う事により伝送容量の拡大も可能となる。また、モード多重伝送においては、伝搬モードごとにコア断面中の強度分布が異なるため、光信号パワー密度の最大値を低減できる可能性がある。

さらに、マルチコア・マルチモードに加え、3つ目の超多重化技術としてマルチレベル(超多値)伝送方式を導入することにより、光ファイバの伝送能力をさらに向上させることが出来る。光の振幅と位相を同時に用いるQAM(Quadrature Amplitude Modulation)方式は、周波数利用効

率を 10 b/s/Hz 以上に拡大できるため、限られた帯域の中で伝送容量を飛躍的に増大させることが出来る。この技術に空間多重を組み合わせることが出来れば、ファイバ 1 本あたりの周波数利用効率を一挙に 100 b/s/Hz にまで引き上げることが可能となり、光通信のパラダイムシフトを引き起こすことが出来るものと期待される。

本研究開発では、これらマルチコア伝送とマルチモード伝送、およびマルチコア伝送と超多値伝送を併用した革新的光伝送方式を採用することで将来の超大容量光通信の需要に対応する技術を開発する。

(2) 研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度（5 年間）

(3) 委託先

日本電信電話株式会社〈幹事〉、
国立大学法人東北大学、
国立大学法人島根大学、
国立大学法人大分大学、
国立大学法人横浜国立大学、
国立大学法人九州大学

(4) 研究開発予算（百万円単位切上げ）

平成 23 年度	95 百万円	(契約金額)
平成 24 年度	90 百万円	(契約金額)
平成 25 年度	84 百万円	(契約金額)
平成 26 年度	79 百万円	(契約金額)
平成 27 年度	75 百万円	(契約金額)

(5) 研究開発課題と担当

課題ウー 1：マルチコア伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計・評価技術（日本電信電話株式会社）
2. マルチコア MIMO 信号処理技術（日本電信電話株式会社）
3. マルチコア光増幅中継技術（島根大学）
4. マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術（大分大学）
5. マルチコア伝送の実証（日本電信電話株式会社）

課題ウー 2 : 超多値マルチコア伝送技術の開発

1. 超多値マルチコア送受信技術技術 (東北大学)
2. 超多値信号のマルチコア伝送評価および総合実験 (東北大学)

課題ウー 3 : マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術 (日本電信電話)
2. マルチモード光増幅中継技術 (島根大学)
3. 単一コア伝送用モード合分波技術 (日本電信電話)
4. 結合マルチコア伝送用モード合分波技術 (横浜国立大学)
5. マルチモード光源技術 (九州大学)
6. マルチモード伝送の実証 (日本電信電話)

課題ウー 4 : マルチコア・マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術 (日本電信電話)
2. マルチコア・マルチモード伝送の実証 (日本電信電話)

(6) これまで得られた研究開発成果

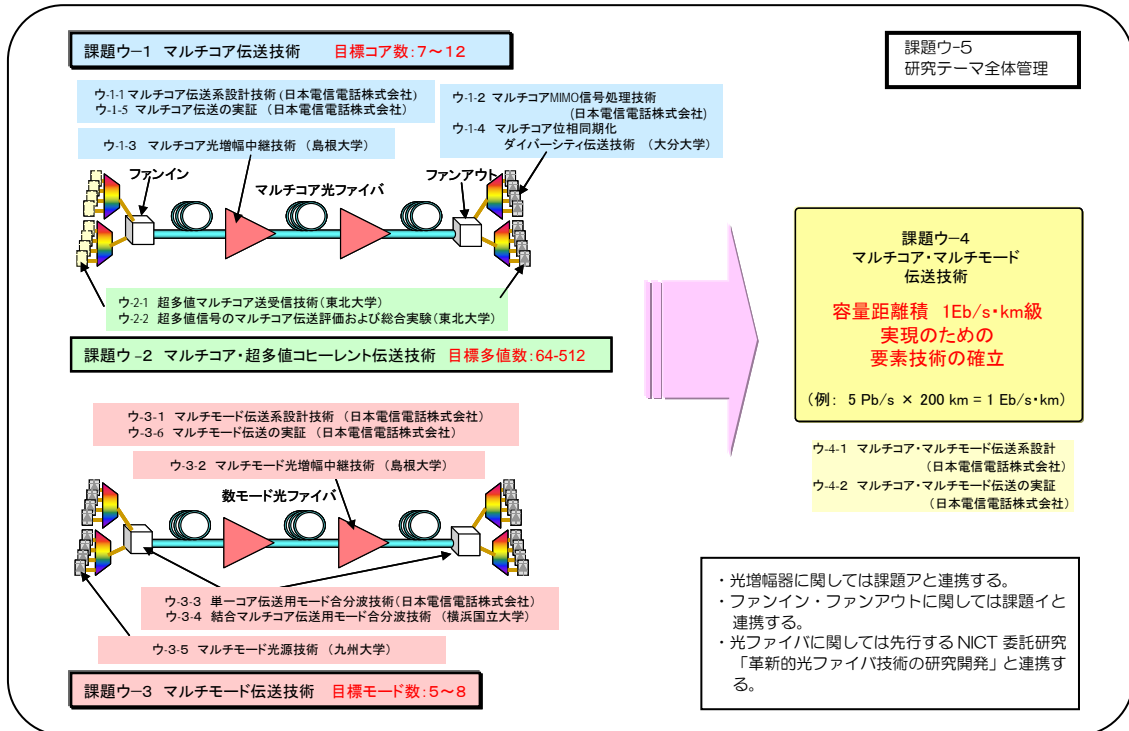
		(累計) 71 件	(当該年度) 44 件
特許出願	国内出願	5	4
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	7	4
	その他研究発表	52	29
	プレスリリース	1	1
	展示会	7	7
	標準化提案	0	0

具体的な成果

- (1) マルチコア伝送では、課題 150 ア、イおよび課題 146 との連携のもと、12 コアファイバおよびファンイン・ファンアウトを用いたマルチコア伝送系を設計・構築して伝送実験を行った。クロストークに応じた最適伝送方式設計を行い、偏波多重 32 値 QAM デジタルコヒーレント技術および上記ファイバ・デバイスを用いることにより、光ファイバ当たり 1 Pb/s を超える大容量光伝送（距離 52 km）に世界で初めて成功した。また、マルチコアファイバに固有の特性を活かした光ダイバーシティ伝送/最大比合成方式について、光ファイバ伝送における最大比合成に関する設計理論を具体化してシミュレーションを行った結果、ゼロ分散波長では 3 dB の復元、SSMF である波長分散 16 ps/nm/km では 2 dB の復元が可能であることを確認した。マルチコア分布ラマン増幅に関して、混在系の提案を行いクロストーク特性のシミュレーション及び実験による明確化を行った。(150 ウ 1)
- (2) 超多値マルチコア伝送では、ファイバ 1 本あたり 100 bit/s/Hz の超高周波数利用効率を目指して、変調多値度の拡大により 1 コアあたり 14 bit/s/Hz を上回る周波数利用効率(7 コア伝送で 100 bit/s/Hz に相当)の実現に取り組んだ。その結果、QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 信号の多値度を 1,024 まで拡大し、14.8 bit/s/Hz の周波数利用効率 (FEC オーバーヘッドを考慮すると 13.8 bit/s/Hz) で 150 km の伝送に世界で初めて成功した。(150 ウ 2)

- (3) マルチモード伝送では、マルチモード光源に関して、単一の高次モード発振が可能な構造の検討をさらに進展させ、垂直方向の高次モード化も考慮した LP21 モードにまで対応可能な構造を提案・確認し、試作を進めた。また、同種結合型マルチコアファイバ用のテーパ結合逐次分岐型モード合分波器に関して、素子長を半分に短縮してクロストークを 1.0 ～ 6.7 dB 改善するため曲線状テーパを導入する再設計を行った。モード分割多重伝送用ファイバにおける伝送チャンネル数を計算し、4 コア同種結合マルチコアを異種非結合化したハイブリッドマルチコアファイバが最多であることを明らかにした。前年度に開発した結合モードの選択的励振とモード励振分布測定技術が数モードファイバへも適用可能であることを実証した。また、PLC 方向性結合器型モード合分波器の検討では、矩形型の数モードファイバと試作した合分波器を用いてマルチモード伝送実験を行い、3 つのモードを光学的に多重分離ができることを示した。(150ウ3)

(7) 研究開発イメージ図



平成24年度「革新的光通信インフラの研究開発 課題ウ マルチコア・マルチモード 伝送技術の研究開発」の目標・成果と今後の研究計画

1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆ 実施機関 日本電信電話株式会社(幹事者)、東北大学、島根大学、大分大学、横浜国立大学、九州大学
- ◆ 研究開発期間 平成23年度から平成27年度(5年間)
- ◆ 研究開発費 422百万円(平成23年度 95百万円、平成24年度 90百万円、平成25年度 84百万円、平成26年度 79百万円、平成27年度 75百万円)

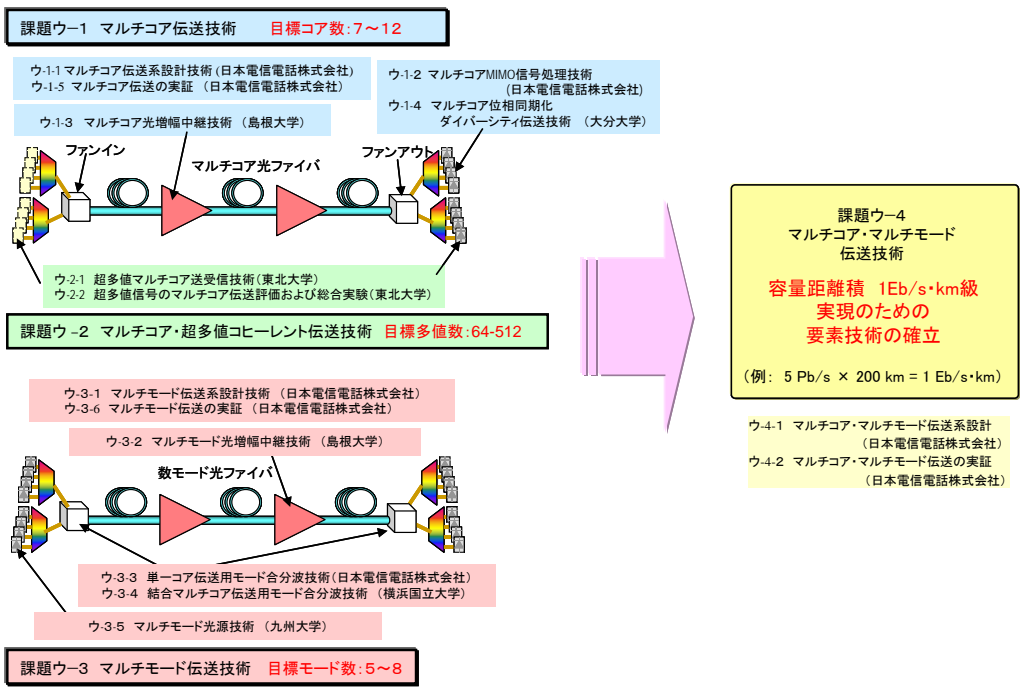
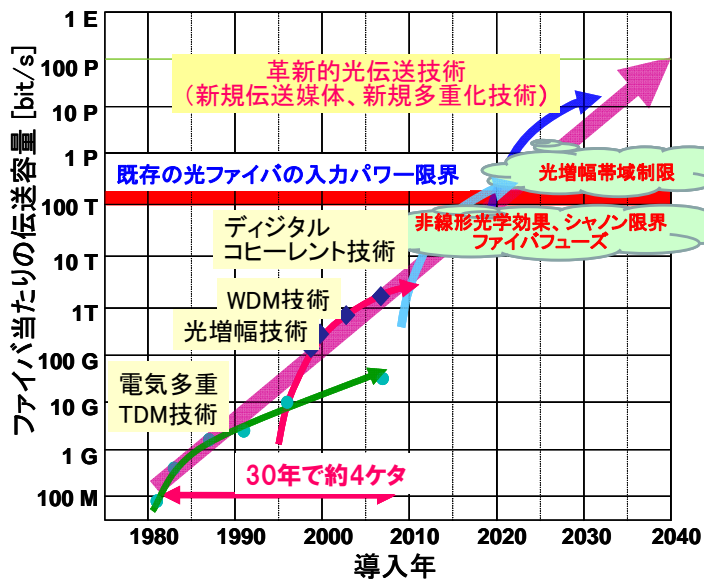
2. 研究開発の目標

- ◆ マルチコアファイバを用いた大容量空間多重光伝送技術、「周波数」および「空間」の2つの資源を最大限に活用した超多重化コヒーレント伝送技術、およびマルチモード伝送技術を研究開発し、1 Eb/s・kmを達成する大容量空間多重光伝送技術の見通しを得る。

3. 研究開発の成果

革新的光通信インフラの研究開発

マルチコア／マルチレベル／マルチモード光伝送技術の研究開発



平成24年度「革新的光通信インフラの研究開発 課題ウ マルチコア・マルチモード 伝送技術の研究開発」の目標・成果

①マルチコア伝送技術（課題ウー1）

目的: マルチコア伝送について伝送設計および伝送特性向上技術の開発を行い、大容量空間多重光伝送技術を確立する。

成果:

◆マルチコア伝送系設計・評価技術、マルチコア伝送の実証（日本電信電話株）

- ・課題 150 ア、イおよび課題 146 と協力して、マルチコア EDFA、ファンイン・ファンアウトデバイスおよび 12 コアファイバを用いたマルチコア伝送系を設計・構築し伝送実験を実施(図 1-1)。
- ・クロストークに応じた最適伝送方式設計を行い、偏波多重 32 値 QAM デジタルコヒーレント技術および上記技術を用いることにより、周波数利用効率 91.4 b/s/Hz、光ファイバ当たり 1 Pb/s の大容量光伝送(距離 53 km)に初めて成功した(図 1-2)。

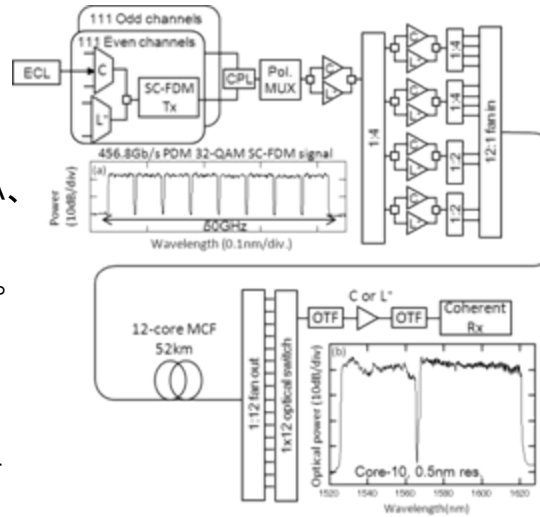


図1-1 1 Pb/s マルチコア伝送実験系

◆分布ラマン混在系の提案とクロストーク特性明確化（島根大学）

- ・分布ラマン混在系(コア間ラマン利得ばらつきを含む)を提案し、クロストーク特性のシミュレーション及び実験による明確化を行った(図 1-3、1-4)。

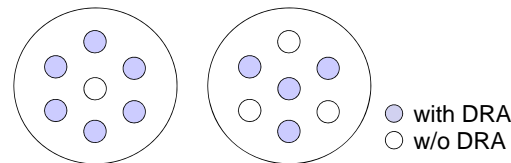


図1-3 分布ラマン混在系の構成例

◆マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術(大分大学)

- ・最大比合成理論のマルチコア光ファイバ伝送系への理論展開を行った。
- ・SNR 回復値の波長分散依存性(シミュレーション)を行い、ゼロ分散波長では 3 dB の復元、波長分散 16 ps/nm/km では 2 dB の復元が可能であることを確認した(図 1-5、1-6)。

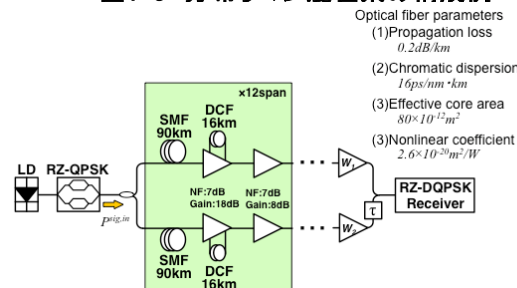


図1-5 2 コアファイバ伝送系モデル

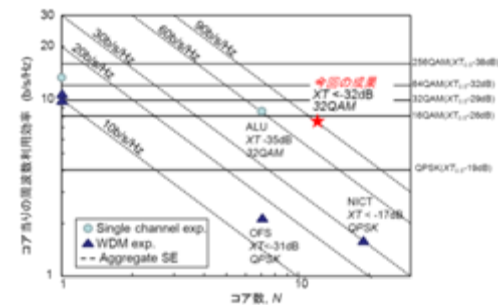


図1-2 コア数と周波数利用効率の関係

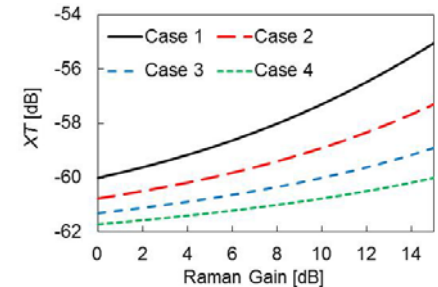


図1-4 クロストークのラマン利得依存性

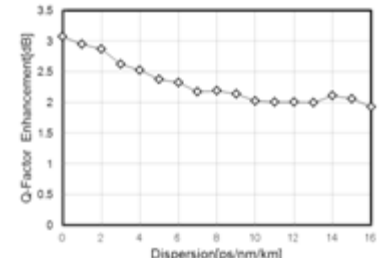


図1-6 波長分散による SNR 回復力の違い

平成24年度「革新的光通信インフラの研究開発 課題ウ マルチコア・マルチモード 伝送技術の研究開発」の目標・成果

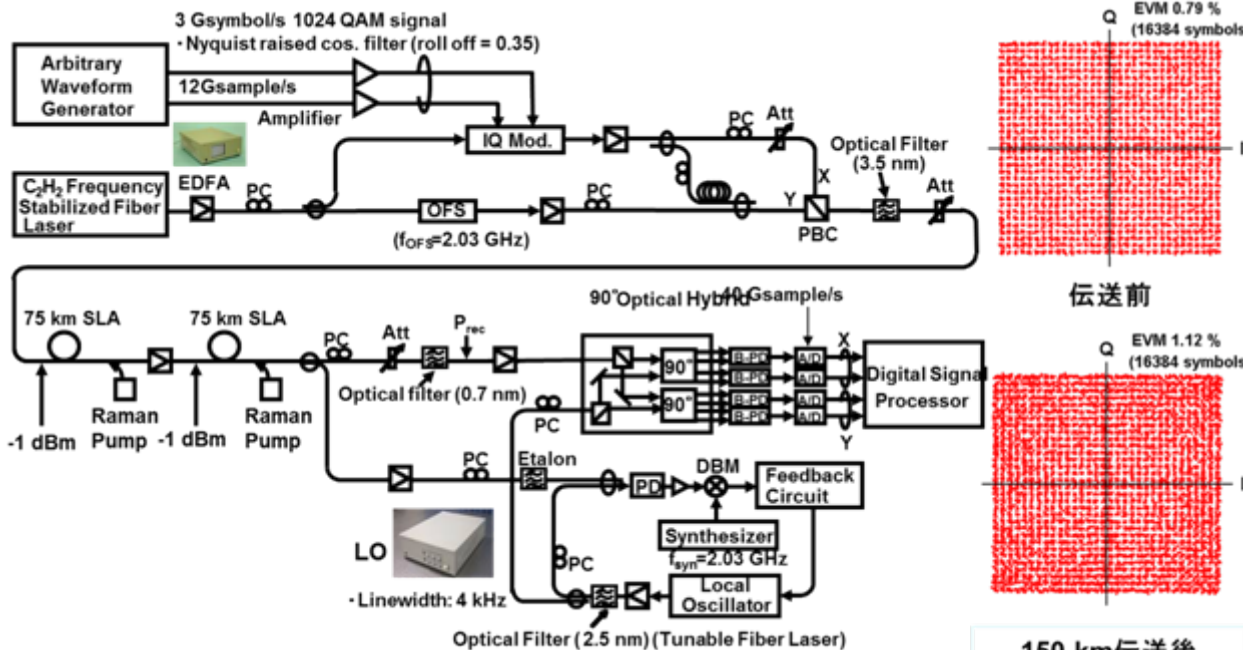
②超多値マルチコア伝送技術 (課題ウ-2)

・目標:

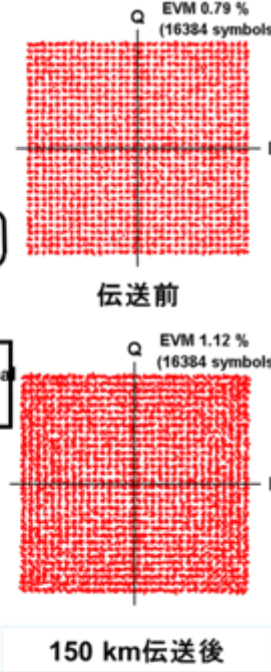
ファイバ 1 本あたり 100 bit/s/Hz の超高周波数利用効率を目指して、変調多値度の拡大により 1 コアあたり 14 bit/s/Hz を上回る周波数利用効率(7 コア伝送で 100 bit/s/Hz に相当)を実現する。

・成果:

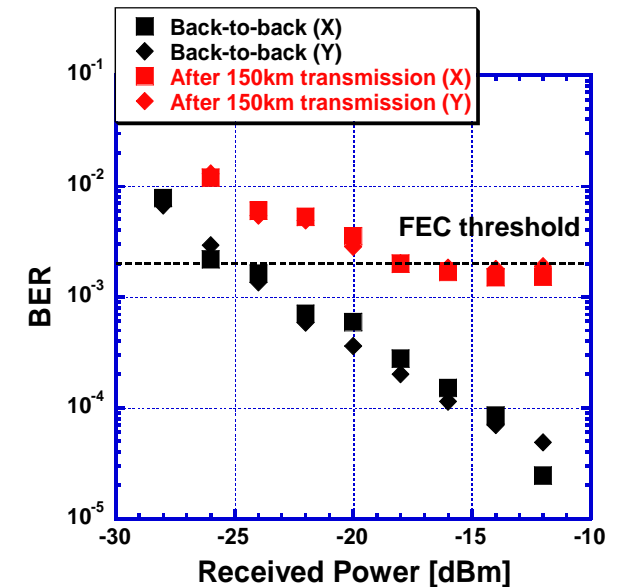
1024 値の超多値コヒーレント光伝送に世界で初めて成功。1 シンボルで 10 ビットの情報量を実現し、14.8 bit/s/Hz の周波数利用効率(FEC オーバーヘッドを考慮すると 13.8 bit/s/Hz)で 150 km の伝送を達成(東北大学)



(a)



(b)



(c)

1024 QAM (60 Gbit/s) - 150 km 光伝送実験系 (a)、伝送前後のコンステレーションマップ (b)、ならびに符号誤り率特性 (c)

平成24年度「革新的光通信インフラの研究開発 課題ウ マルチコア・マルチモード 伝送技術の研究開発」の目標・成果

③マルチモード伝送技術 (課題ウー3)

目的: 伝送技術、合分波技術、光源技術、伝送ファイバに要求される特性等の検討を行い、大容量モード多重伝送の見通しを得る。

◆結合型マルチコア伝送用モード合分波技術 (横浜国立大学)

4 コア結合型マルチコアファイバの低クロストークモード合分波器の設計

- ・テーパ結合逐次分岐型モード合分波器の小型化のための再設計。
- ・素子長を前年度比 2 分の 1 に短縮(図 3-1)。

モード分割多重用マルチコアファイバの最大伝送チャンネル数の解明

- ・同種および異種による非結合マルチコア化の最大伝送チャンネル数比較。
- ・実効コア直径 115 μm 以上では同種結合型4コアの異種非結合マルチコア化が最大伝送チャンネル数の点で最も有利(図 3-2)。

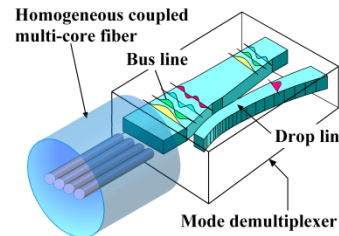


図3-1 テーパー結合逐次分岐型モード合分波器

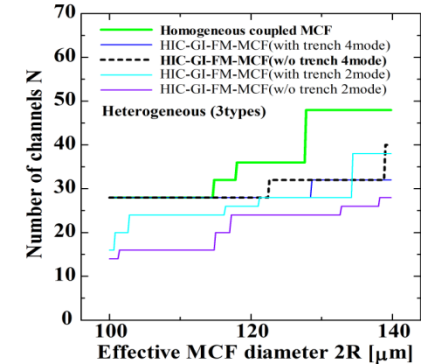


図3-2 モード多重伝送用 MCF のチャンネル数

◆マルチモード光源技術 (九州大学)

単一の高次モード発振構造で、さらなる高次モード(LP21 まで)を実現する構造の検討。

- ・MMI 構造に基づき、LP21 モードをシミュレーションにより確認(図 3-3)
- ・パッシブデバイスによる原理実証を進め、デバイス試作条件検討を行った(図 3-4)。

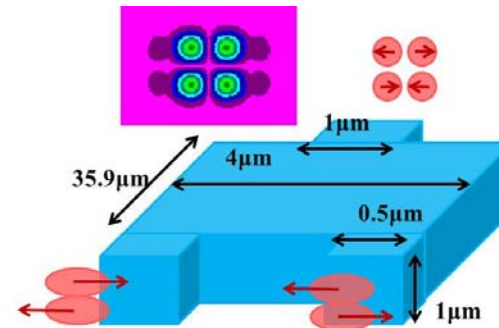


図3-3 MMI 構造

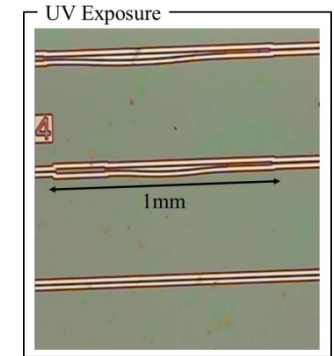


図3-4 試作デバイス¹³

◆単一コア伝送用モード合分波技術 (日本電信電話株)

- ・3 モード合分波平面光波回路の設計、作製および評価(図 3-5)
- ・対向によりモード合分波時のモードクロストークとして 20 dB 以上を確認。
- ・アライメント精度向上によりクロストーク改善の見通しを得た。

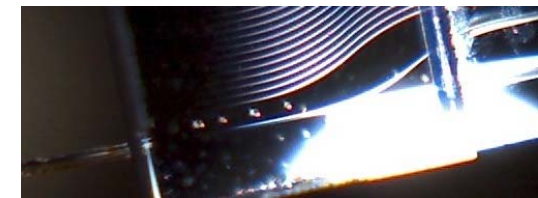


図3-5 3モード合分波回路

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等) ※成果数は累計件数と()内の当該年度件数です。

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	展示会	標準化提案
革新的光通信インフラの研究開発課題ウ	5 (4)	0 (0)	7 (4)	52 (29)	1 (1)	7 (7)	0 (0)

5. 研究成果発表会等の開催について

(1) 学会発表・表彰

- ・Chitose International Forum on Photonics Science & Technology(平成21年10月)、Optics & Photonics Japan 2011(平成21年11月)の基調講演にて研究概要を発表(H23)
- ・ECOC2012(2012年7月)ポストデッドライン論文に採択。世界初の1Pb/s光伝送実験に成功(H24)
- ・中沢正隆, 第13回応用物理学会業績賞(2013年3月)(H24)

(2) 展示会

- ・第26回 光通信システム(OCS)シンポジウム(2012年12月、静岡県三島市)でパネル展示(H24)
- ・九州大学筑紫地区オープンキャンパス(2013年5月、九州大学)でパネル展示(H24)
- ・東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究発表会(2013年2月、東北大学)でパネル展示(H24)
- ・フォトニックネットワークシンポジウム2013(2013年3月、神奈川県横須賀市)でパネル展示(H24)

(3) 報道発表

- ・毎秒1ペタビット、50kmの世界最大容量光伝送に成功～光ファイバ1本でハイビジョン映画 約5000本分を1秒で伝送可能に～(H24)

6. 今後の研究開発計画

- ・マルチコア伝送技術:
大容量光伝送を実現するためのマルチコア伝送系の基本構成を明確化して伝送実験を実施し、マルチコア伝送を実現する上での問題点・課題を抽出する。
- ・超多値マルチコア伝送技術:
QAM信号をマルチコアファイバを用いて伝送させ、マルチコアファイバによる超多値QAM信号の空間多重伝送に伴う問題点を抽出する。
- ・マルチモード伝送技術:
マルチモード伝送系の基本構成を明確化して原理確認伝送実験を実施し、マルチモード伝送を実現する上での問題点・課題を抽出する。