

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21360156
 研究課題名（和文） 光ファイバ MIMO 通信技術創出に向けての多重空間モード分離・結合デバイスの研究
 研究課題名（英文） Study on separation and coupling of multiplex spatial mode to create MIMO technology for optical fibers
 研究代表者
 岡本 淳 (Atsushi Okamoto)
 北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
 研究者番号：40224068

研究成果の概要（和文）：

空間モードの結合や分離に必要となる動的再構成可能な光素子を開発した。異なる空間モードを有する光ファイバ光を接続するための偏光無依存な光接続実験に成功した。光ファイバ中の空間モード光と制御光との干渉によって光誘起屈折率媒質中に多重化された体積ホログラム回折素子を生成し、これを用いた空間モードの分離技術を確立した。さらに、空間光変調器の一次回折光を用いた空間モードの励振技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：

We developed the dynamic reconfigurable optical device that can couple and separate spatial modes propagating in an optical fiber. In addition, we carried out the experiment on polarization-free optical coupling for connected optical fibers having different spatial modes. Mode separation was achieved via optical interference between spatial mode beams and control beams, by using a multiplex volume holographic diffraction element with a photorefractive crystal. Furthermore, mode excitation was carried out using a first-order diffraction beam from a spatial light modulator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	1,100,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：空間モード分割通信、MIMO、体積ホログラム、光誘起屈折率媒質、動的再構成可能な光素子

1. 研究開始当初の背景

(1) IT 社会を支えている光ファイバ通信網は、1本のファイバあたり Tb/s の通信容量を実現しているが、WDM 伝送技術は波長あたり 100Gb/s 程度が技術的限界とされ、通信需要の伸びを考えると近い将来に基幹通信網が飽和する可能性が示唆されている。

(2) ファイバ中の多くの空間モードを組み合わせることでデータの送受信を行うことにより、ファイバあたりの通信容量をさらに飛躍的に向上する空間モード分割多重通信ならびに全光学的 MIMO 処理技術が期待されている。

(3) マルチモードファイバ中の空間モードを利用したり、マルチコア形の光ファイバによって通信容量を拡大する場合には、ファイバ中の空間モードを制御する必要があり、また、異なる光信号が伝送される複数のコアを複数のレーザとサブミクロン～ナノスケールの精度で接続する必要がある。さらに、空間モードを用いた通信を行うためには、ファイバ中で重なり合った多重空間モード光の分離・結合手段が必要不可欠な技術になる。

2. 研究の目的

(1) ファイバ中の複数の空間モードに重ね合わせて伝送される光信号に対して、特定の空間モードの信号を分離・抽出するためのデバイスを創出する。特に、信号の遅延を起こさない全光デバイスで、ある程度動的な空間モードの変動に追従できるトレランス性能を有する新規デバイスを開発する。

(2) 伝送される空間モードを維持したままファイバ・レーザ間およびファイバ間接続を可能にする新規の光接続技術を確立する。サブミクロン～ナノスケールの微細な空間モードに対応するため、従来の調芯技術とは異なる考え方に基づいた、自律的に動作する結合光学素子を実現する。

3. 研究の方法

(1) 微細構造を有するファイバからの出射光を擬似的に空間光変調器 (SLM) によって生成し、光誘起屈折率媒質内でホログラムを形成する。同媒質中で生ずる 4 光波混合において 2 つの波面が合致した時にだけ回折光が得られる性質を検証する (図 1)。また、この特性を応用することで、あらかじめ光誘起屈折率媒質中に回折格子を形成した後で、空間モード信号を入射した場合にも、特定の空間モード光の抽出が可能であることを、理論計算と実験によって明らかにする。

(2) 体積型ホログラムメモリにおける多重化の手法を前記光誘起屈折率媒質中のホログラム形成に導入することにより、複数の空間モードを異なる光検出器に結合するような多重空間モード光の分離・復調デバイスを作成し、その動作条件を明らかにする。

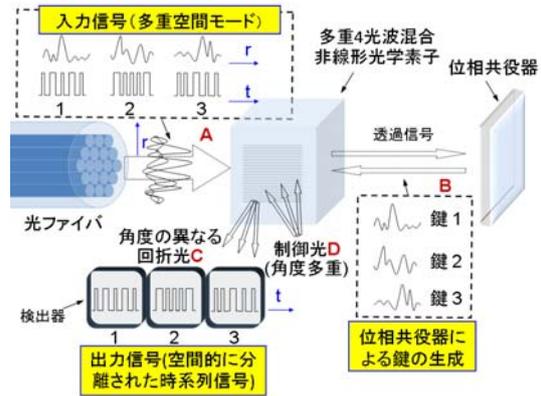


図 1 空間モード光の分離

(3) 光誘起屈折率媒質を用いた 2 重位相共役器の実験を行い、複数の光の自動接続実験を行う (図 2)。位相共役光の光学系を最適化し、多重化された空間モード光同士の接続と空間モードを保持した光接続を実現するための理論計算と実験を行う。

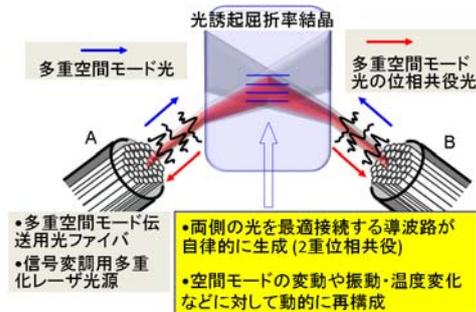


図 2 空間モード光の接続

(4) 前記 (3) において空間モードの変動、温度変化、外部振動に対して自律的に回折格子を作り変えるダイナミック・リコンフィギュラブルな動作を可能にする素子の開発を行う。具体的には、従来よりも飛躍的に感度の高い $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ (SPS) 結晶を開発し、その基礎特性である結合効率、吸収損失などの諸特性を実験的に測定すると共に、理論解析を行って入射角や偏光に対する特性を明らかにする。さらに、同材料を用いて柔軟なファイバ間光接続を可能にするための光学系を開発し、偏光無依存な光接続の実証実験を行う。

(5) 空間モードを用いた通信においては、光ファイバへの空間モードの励振も重要な検討課題となる。そこで、空間光変調器 (SLM) を電子的に制御可能な可変ホログラムとして動作させ、その回折光をマルチモードファイバに結合できることを実験によって示すと共に、マルチモード光ファイバへの空間モードの選択的な励振技術を開発する。

4. 研究成果

(1) 光誘起屈折率媒質材料である LiNbO_3 結晶を用いた動的再構成可能な全光学的3次元回折素子の検討を進めた。微細構造を有するファイバからの出射光を擬似的に空間光変調器(SLM)によって生成し、制御光との干渉によって光誘起屈折率媒質中に多重化された体積ホログラム回折素子を生成し、これを用いた空間モード分離実験を行った。分離性能を高めるために、光線入射角、入射強度比、通信波長、および、ランダム位相板の特性など、さまざまな観点から最適化を進めた。

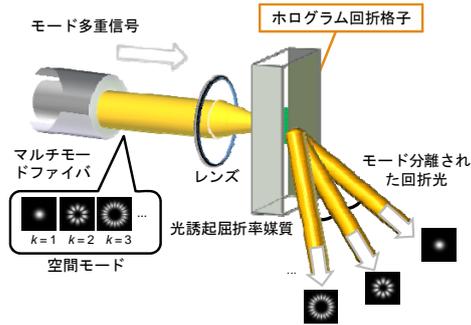


図3 LiNbO_3 結晶を用いたモード分離器

図3に示すモード分離器において、空間モード光があらかじめ設定した角度に分離されることを確認した。本方式は、国内外で報告されている位相フィルタを用いる方式と比較して、高次の空間モードに対応できること、また、光誘起屈折率媒質を用いるため分離する空間モードを可変的に設定できる点で優位性がある。

(2) 実際のマルチモードファイバを伝搬するLPモードを想定した空間モード分離実験ならびに数値シミュレーションを行い、多重化に用いる空間モードの組み合わせによって、モード分離の性能が大きく変化することを見出し、最適な組み合わせにおいては、90%以上のモード分離率が得られることを確認した。図4に、3つの空間モードを多重化した場合のモード分離の実験結果を示す。

空間モード	LP0,1 Mode	LP5,1 Mode	LP10,1 Mode
モードの分布			
制御光入射角	$\theta_1 = 18^\circ$	$\theta_2 = 20^\circ$	$\theta_3 = 22^\circ$
CCDによる観測光分布			
各モードへの規格化された回折効率			

図4 モード分離の実験結果の例

(3) 空間モードの変動や振動に対するトレ

ランスを考えると、光誘起屈折率媒質には1ms程度の応答速度が必要であり、また、通信波長である近赤外への展開を考えると新規の材料を模索する必要がある。そこで、従来よりも飛躍的に感度の高い $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ (SPS)結晶を開発し、その基礎特性である結合効率、吸収損失などの諸特性を実験的に測定すると共に、理論解析を行って入射角や偏光に対する特性を明らかにした。図5に、作成した厚さの異なるSPS結晶における位相共役反射率の測定結果と理論特性曲線を示す。

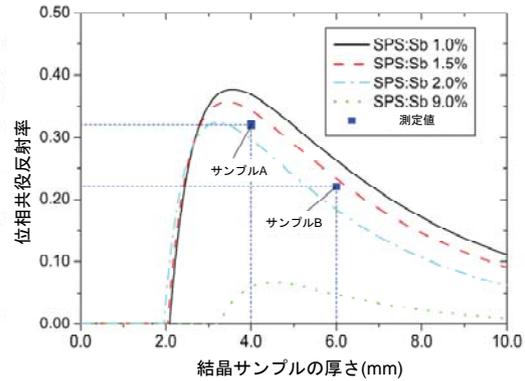


図5 厚さの異なるサンプルに対する特性

(4) 作成したSPS結晶を用いて、2つの異なる空間モードの接続・結合を行う素子の開発にも成功した。特に、2重位相共役器(DPCM)の原理に基づき、接続する2つの空間モードが異なる場合にも、容易に光接続を実現できる光学系を考案し、動作確認実験並びに数値シミュレーションによる特性解析を実施した。さらに、同材料を用いて柔軟なファイバ間光接続を可能にするための偏光無依存な光接続実験に成功した。図6に示す実験においては、DPCMと偏光調整光学系を組み合わせることで、光ファイバ内の偏光状態に依存しない光接続を実現している。

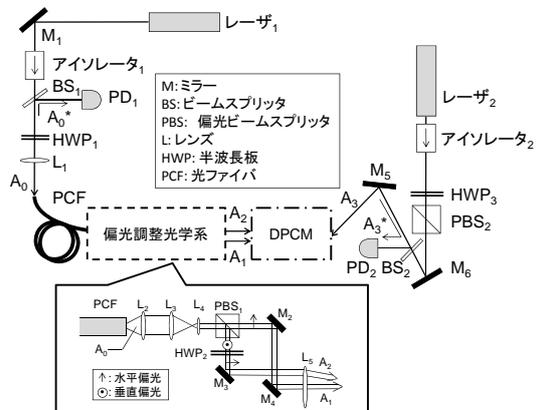


図6 偏光無依存な光接続実験

(5) マルチモードファイバに対する空間モードの励振技術を新たに開発した。本研究では、SLM を可変ホログラムとして動作させ、その回折光をマルチモードファイバに結合することによって、可変的な空間モード励振に成功した。また、モード励振法の高性能化を目的として、体積ホログラムを用いた複数空間モードの同時励振素子を新たに提案し、その基本動作を検証した。さらに、励振した空間モード光をファイバ中に伝搬させ、その伝搬光によってモード分離器である多重ホログラムを記録する実験にも成功している。このようにして生成されたモード分離用の多重ホログラムに対して、再度、特定の空間モード光を照射することでモードの分離を確認した。図7に、空間モードの励振実験の光学系と実験結果を示す。本実験では3つの異なる空間モードを可変的に励振している。本手法は、国内外で報告されている位相フィルタを用いる方式と比較して、高次の空間モードに対応できること、また、SLMに表示するホログラムパターンを電子的に制御することで、光学系の調整を容易にし、励振する空間モードを可変的に設定できる点で優位性がある。

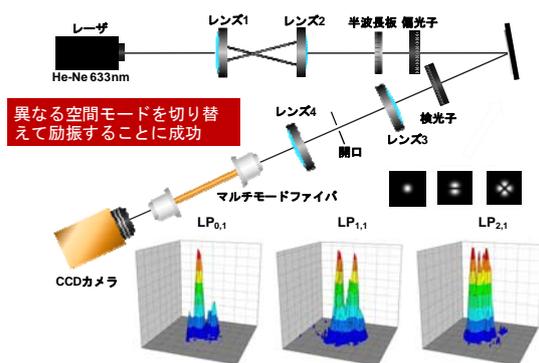


図7 空間モードの励振実験

以上の研究成果は、いずれも空間モードを用いた通信を達成する上で必須の技術であり、1本のマルチモードファイバを複数のシングルモードファイバとして機能させ通信容量の増大を図る上での基盤となる技術である。特に、本技術における空間モードの制御では、すべての光信号が電気信号に変換されることなく行われるため、信号遅延の問題が生じない。今後は、本研究で開発した光学的手法を電子的信号処理技術と融合することで、空間モードの変動に対する対応など、より高機能かつ高性能な、空間モードの分離・結合を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

① Yuta Wakayama, Atsushi Okamoto, and Alexander A. Grabar, “Double Phase Conjugate Mirror with Sb-doped $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ Crystal for Different Incident Angles, Crystal Thickness, Total Incident Intensity and Polarization,” *Ferroelectrics*, Vol. 415, pp. 1-8, 2011, 査読有

② Takuya Oda, Atsushi Okamoto, Daiki Soma, Akihisa Tomita, and Yuta Wakayama, “All-optical demultiplexer based on dynamic multiple holograms for optical MIMO processing and mode division multiplexing,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 7958, pp. 79580J(1-9), 2011, 査読有

③ Yuta Wakayama, Atsushi Okamoto, Alexander A. Grabar, and Kunihiro Sato, “Optical interconnection between different spatial modes using double phase conjugate mirror with polarization alignment system,” *Optical Review*, Vol. 18, pp. 117-123, 2011, 査読有

④ Atsushi Okamoto, Takuya Oda, and Kazuyuki Morita, “All-optical Demultiplexer for mode division multiplex communication technique with a multimode optical fiber,” *Technical Digest of 7th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'10)*, CD-ROM, 20PSa-57, 2010, 査読有

⑤ Atsushi Okamoto, Kazuyuki Morita, Yuta Wakayama, Junya Tanaka, and Kunihiro Sato, “Mode division multiplex communication technique based on dynamic volume hologram and phase conjugation,” *Proceedings of SPIE*, 7716-78, pp. 771627(1-10), 2010, 査読有

⑥ Kazuyuki Morita, Atsushi Okamoto, Akihisa Tomita, Masanori Takabayashi and Masatoshi Bunsen, “Compatibility to WDM of Volume Holographic Demultiplexer for Spatial Mode Division Multiplexing,” *Technical Digest of the 15th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010)*, CD-ROM, 7E4-3, 2010, 査読有

⑦ Atsushi Okamoto, Daiki Soma, Yuta Wakayama, Akihisa Tomita, Kunihiro Sato and Alexander A. Grabar, “Experiment on Dynamic Reconfigurable Diffraction Element for Mode Division Multiplex Communication,” *Technical Digest of the 15th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010)*, CD-ROM, 7P-23, 2010, 査読有

⑧ Atsushi Okamoto, Kazuhiro Harasaka, Masatoshi Bunsen, Masanori Takabayashi, and Shuji Rokutanda, "Spatial resolutions for applying photorefractive polymers to diffractive elements," Journal of Modern Optics, Vol. 56, pp. 1323-1334, 2009, 査読有

⑨ Kazuyuki Morita, Atsushi Okamoto and Junya Tanaka, "Volume Holographic Demultiplexer for Spatial Mode Division Multiplexing in Optical Fiber Communication," Technical Digest of Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2009), CD-ROM, WL16, 2009, 査読有

〔学会発表〕 (計 9 件)

①岡本 淳, モード分割多重通信用の空間モード励振・分離技術, 2012 年春季 応用物理学関係連合講演会(招待講演), 2012 年 3 月 15 日, 早稲田大学(東京都)

②岡本 淳, モード分割多重通信に向けた空間モードの励振・分離技術, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会(招待講演), 2011 年 9 月 13 日, 北海道大学(札幌市)

③岡本 淳, モード分割多重通信に向けた動的ホログラムの研究, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会(招待講演), 2011 年 1 月 10 日, 電気通信大学(東京都)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 光通信システム
発明者: 岡本 淳、森田一行
権利者: 国立大学法人北海道大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2010/068158
出願年月日: 2010 年 10 月 15 日
国内外の別: 外国

〔その他〕

ホームページ

<http://optpia.ist.hokudai.ac.jp/mdm/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 淳 (Okamoto Atsushi)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 40224068

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

佐藤 邦宏 (Sato Kunihiro)

北海学園大学・工学部・教授
研究者番号: 00205907

本間 聡 (Honma Satoshi)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授
研究者番号: 70362085