

1. 氏 名	李 洪譜
2. 所属機関	静岡大学 工学部機械工学科
3. 研究題目	波長及びOAMモード多重光通信のための多チャンネル螺旋状ファイバ回折格子の開発
4. 研究の目的:	インターネット、無線ネットワークの急激な普及に伴い、世界中を駆け巡る情報量は、年2～3倍の割合で増え続け、10 年以内には数 Pb/s (10^{15})級の超大容量通信トラフィックの処理が必要になると考えられており、これを支えるシステムとして波長多重(WDM)システムと軌道角運動量(OAM)モード多重システムを融合したフォトニックネットワークシステムの実現が期待されている。OAM モード多重光通信システムでは、OAM モードの異なる多数の光を同時に伝送させるものである。WDM 光通信システムでは、波長の異なる多数の光を同時に伝送させるものである。波長及び OAM モード多重光通信システムの通信容量は、使用したモード数と波長数の乗算によって整数倍に大きくなる。このようなシステムでは OAM モードの変換・多重デバイスが不可欠である。 OAM モードは伝搬方向に対して螺旋面状の等位相面を持つ電磁波であり、近年大容量モード多重光通信への応用が期待されている。一方、螺旋状ファイバ回折格子(HLPG)は光軸に沿って周期的なスクリュートタイプの屈折率変調があり、OAM モードのような固有モードを有するファイバデバイスであるので、現在有望な OAM モード変換・多重デバイスとして注目されている。現在、1本の短い光ファイバに、多くのチャンネルかつ異なる次数の OAM モードを有する螺旋状ファイバ回折格子の実現が求められているが、その為の設計法及び製作技術は存在しない。 本研究では、異なる OAM モードを有する螺旋状多チャンネルファイバ回折格子(HLPG)の新しい設計法と作製法を開発し、そして多波長 OAM モード多重光通信システムのための全ファイバ系多波長 OAM モード多重デバイス(生成・分離)への実現を試みる。
5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):	● HLPG による1次、2次及び3次 OAM モード変換器の開発 ここで、螺旋状 HLPGにより、図 1 に示すように、ファイバコアに基本モード(HE_{11})を異なる次数の OAM モード(1 次、2 次、3 次)に直接変換できる全ファイバ軌道角運動量(OAM)発生器を提案し、試作する。本研究に取り扱い対象は通常用ステップ系光ファイバであり、そのコアの屈折率分布は円対称であるので、一般的に言えばこのようなファイバによる作られた HLPG が1次以上 OAM モードの励振効率は極めて小さい、2次以上の OAM モードの生成が制限された。この問題を克服するため、我々は、HLPG 方位角度方向に周期的に位相シフトを挿入するにより高次の OAM モードの新しい生成法を提案し、その方案の実用性を理論的、実験的に検証する。 図1 HLPGによる異なる次数を有するOAMの生成

- OAM モードを有する多チャンネル HLPG の新しい設計法と製作法の開発。

我々はこれまでに開発した位相のみサンプリング法による螺旋状多チャンネルファイバ回折格子の設計法と製作法を更に発展させ、実用化可能、製作は容易にする直流サンプリング法による多チャンネル HLPG の新しい作製法を提案し、多チャンネルかつ其々チャンネルに OAM モードを有する新しい HLPG を開発し、多波長 OAM モード生成器の実現を試みる。

- 超高チャンネル数を有する OAM モード変換器の開発

これまで扱ってきた位相サンプリング法及び直流サンプリング法は実用化という観点で課題を抱えている。この問題を解決するため、つい最近、我々は多チャンネル短周期ファイバ回折格子 (FBG) と広帯域除去フィルタ機能を有する HLPG を直列に接続することによって、超高チャンネル数の OAM モード変換器の新しい方法を提案した。ここで、FBG は単一チャンネルから多チャンネルに変換する役割、HLPG は基本モードから高次 (OAM) モードに変換する役割をそれぞれ担っている。

6. 研究の成果と結論、今後の課題：

- HLPG による1次、2次及び3次 OAM モード変換器の開発

本研究では、我々は、HLPG 方位角度方向に周期的に位相シフトを挿入するによる高次数の OAM モードの新しい生成法を提案し、その方案の実用性を理論的、実験的に検証した。例として、1次、2次、及び3次の OAM モードを有する単一チャンネルの HLPG を試作し、モード変換率は99%である1次OAMモード、90%以上である2次及び3次の OAM モードの生成を成功した。典型的な例として、HLPG による 3 次OAM モードの生成とその測定結果を図2に示す。

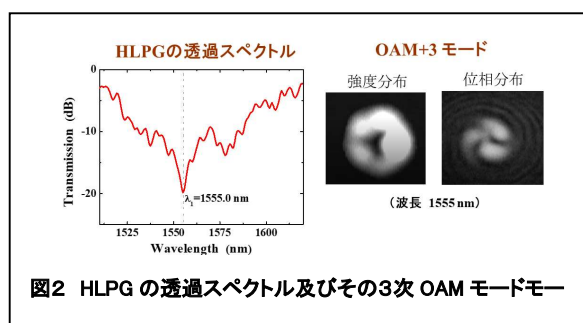


図2 HLPG の透過スペクトル及びその3次 OAM モードモード

- OAM モードを有する多チャンネル HLPG の新しい設計法と製作法の開発

本研究では、我々は CO₂ レーザーを用いて複数の回折格子を重ね合わせるにより、屈折率変化の直流部分を変調する直流サンプリング法及び螺旋サンプリング法を提案し、その方案の有効性を実験的に検証した。実作例として、3チャンネル、5チャンネルの HLPG の製作を成功し、異なる5チャンネル中に1次 OAMモードの同時生成にも確認出来た。典型的な例として、3チャンネル HLPG の透過スペクトル及びその各チャンネルのOAMモードの生成を図3に示す。

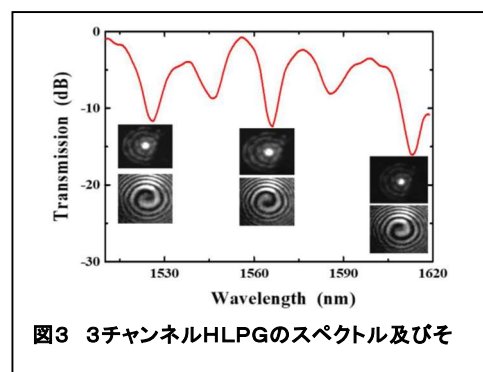


図3 3チャンネルHLPGのスペクトル及びその各チャンネルのOAMモードの生成

● 超高チャンネル数のOAMモード変換器の開発

本研究では、光ファイバ通信の C バンドをカバー出来、波長多重(DWDM)チャンネル化された OAM モード変換器を提案し、実験的に検証した。これは、我々は以前開発した位相のみサンプリングした短周期ファイバ回折格子(MFBG)と2つの HLPG を直列することによって実現されたものである。MFBG は、帯域内51チャンネル数を有する FBG であり、DWDM 多チャンネルフィルタとして機能しているが、透過と反射の両方で動作することができる。一方、使用した二つの HLPG はそれぞれ広帯域 OAM モード変換器として機能し、基本モード HE_{11}

を OAM モードに変換できる装置である。図4に示すのはその測定した結果である。ここで、インターリーブおよび DWDM チャンネル化された二つ 51 チャンネル OAM モード変換器は、それぞれ 100GHz (0.8 nm) のチャンネル間隔、40 nm の有効なチャンネル帯域幅、および高い均一性を備えることを分かった。更にチャンネル間およびチャンネル内スペクトルと、90% という高い OAM モード

変換効率を得られることが実証される。私たちの知る限り、このような高性能、高チャンネル数、かつ DWDM チャンネル化 を有する 1 次 OAM モード変換器 提案と実験実証は世界初であり、ロトタイプになる。

尚、実験簡単化にするため、ここで使用している HLPG は、通常用の単一モードファイバ(SMF)で製造されたものであり、その結果により、各チャンネルで1次 OAM モードしか得られない。HLPG の書き込みに少数モードファイバ(FMF)または他の種類のマルチモードファイバ(MF)を使用させ、各チャンネルで任意の高次 OAM モードを有する全ファイバ系超高チャンネルのOAMモード変換器の実現は今後の課題である。

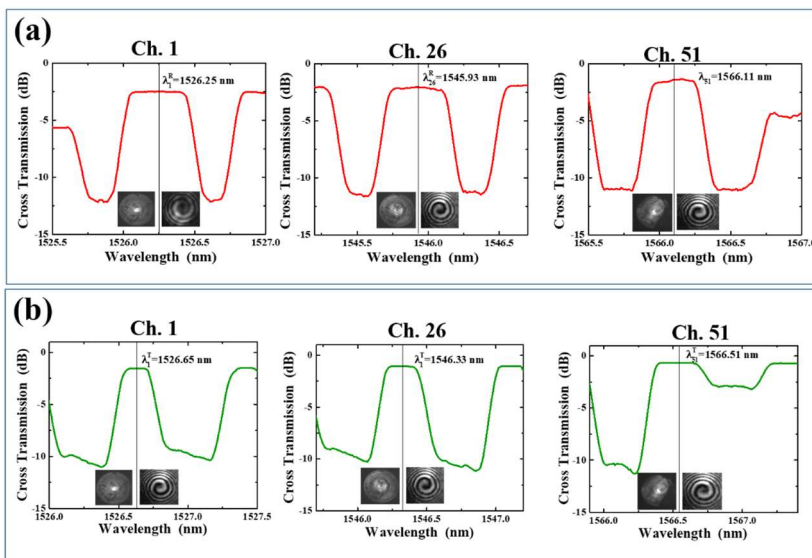


図4 (a) 51 チャンネルスペクトル及びその OAM モード測定結果. (b) 補完的な

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

本研究提案した螺旋状多チャンネル HLPG を更に工夫すると、光通信分野における波長多重及び OAM モード多重デバイスへの応用だけではなく、全ファイバ形光偏光変換器や、波長変換器や、及び医療、生命科学、環境診断学等分野にて用いられる光ピンセット、光円二色性測定器等への応用も可能であり、超高精度計測、高感度ファイバセンシング、環境、医療などの分野へも大きな波及効果を有すると考えられる。

7.2_社会的価値:

本研究で開発した螺旋状多チャンネル H LPG 作製法は、他の技術と比較して、必要な装置が極めて簡単しかも高効率なため実用化は十分可能である。本研究に提案した多チャンネル H LPG による OAM モード発生デバイスは、全てファイバで構成されることにより、安価、小型化、低い挿入損失、波長多重の多チャンネル化等利点がある。多チャンネル H LPG 及びその多波長 OAM モード制御器への応用を目指す研究は世界で初めてであり、次世代波長・モード多重 (DWDM+MDM) 光通信システムや、波長多重チャネルライズド (ITU チャネルグリッドが一致した) マルチチャンネル OAM レーザー、および 波長多重光センシング システムへのアプリケーションが期待出来る。

7.3_研究成果:

「研究論文」

1. Z. Zhang, K. Gao, H. Zhang, J. Wu, H. Hao, H. Zhao, P. Wang, and H. Li, "Power-interrogated torsion and strain sensor based on a helical long-period fiber grating written in a thinned four-mode fiber," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 59, No. 3, 770010 (2023).
2. C. Guo, J. Xu, J. Xu, H. Lu, H. Hao, H. Zhao, P. Wang, and H. Li, "Helical long-period fiber grating-based OAM interferometer and its application to fiber sensing," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 41, No. 8, pp. 2572-2577(2023).
3. C. Zhu, Q. Piao, L. Wang, Z. Bing, Y. Zhao, H. Zhao, and H. Li, "Ultra-wideband OAM mode generator based on a helical grating written in a graded-index few-mode fiber," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 41, No. 5, pp. 1533-1538 (2023).
4. H. Lu, X. Huang, C. Guo, J. Xu, J. Xu, H. Hao, H. Zhao, W. Tang, P. Wang, and H. Li, "Orbital-angular-momentum beams-based Fizeau interferometer using the advanced azimuthal-phase-demodulation method," Appl. Phys. Lett., Vol. 121, No. 24, 241102 (2022).
5. C. Zhu, Q. Piao, Y. Zhao, and H. Li, "Ultra-broad edge filter based on a periodically twisted graded-index fiber and its application to power-interrogated temperature sensor," Opt. Express, Vol. 30, No. 19, pp. 34776-34786 (2022).
6. Y. Hao, C. Guo, X. Huang, J. Xu, H. Lu, H. Zhao, P. Wang, and H. Li, "Synthesizing the complex orbital-angular-momentum spectrum of hybrid modes existed in a few-mode fiber," Opt. Express, Vol. 30, No. 15, pp. 26286-26296 (2022).
7. K. Gao, Z. Zhang, B. Huang, H. Hao, H. Zhao, P. Wang, and H. Li, "Broadband edge filter based on a helical long-period fiber grating and its application to a power-interrogated torsion sensor," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 39, No. 4, pp. 1075-1081 (2022).
8. H. Zhao, Z. Zhang, M. Zhang, Y. Hao, P. Wang, and H. Li, "Broadband flat-top second-order OAM mode converter based on a phase-modulated helical long-period fiber grating," Opt. Express, Vol. 29, No. 18, pp. 29518-29526 (2021).

9. O.R. Mizushima, T. Detani, C. Zhu, P. Wang, H. Zhao, and H. Li, "The superimposed multi-channel helical long-period fiber grating and its application to multi-channel OAM mode generator," IEEE J. Lightwave Technol., Vol. 39, No. 10, pp. 3269–3275(2021).
10. H. Zhao, and H. Li, "Advances on mode-coupling theories, fabrication techniques, and applications of the helical long-period fiber gratings: a review," Photonics, Vol. 8, No. 4, 106 (2021).
11. O.T. Detani, H. Zhao, P. Wang, and T. Suzuki, H. Li, "Simultaneous generation of the second- and third-order OAM modes by using a high-order helical long-period fiber grating," Opt. Lett., Vol. 46, No. 5, pp. 949–952 (2021).
12. P. Wang, H. Zhao, T. Detani, and H. Li, "Simultaneous generation of the first- and second-order OAM using the cascaded HLPGs," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 32, No. 12, pp. 685–688 (2020).

「特許」

1. 李 洪譜・朱程亮、多チャンネルファイバグレーティング、多チャンネルファイバグレーティング製造装置及び多チャンネルファイバグレーティングの製造方法、特許番号:7182250、出願日:2018年8月27日、登録日:2022年11月24日。