

# 螺旋状ファイバ回折格子の開発と その OAM モード多重デバイスへの応用

静岡大学 工学部機械工学科 李 洪譜

Research on Helical Fiber Gratings and  
their Applications to OAM Mode-division Multiplex Devices

Hongpu Li

Department of the Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shizuoka University

本研究では、多チャンネル(波長)螺旋状長周期ファイバ回折格子(HLPG)を実現するための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と螺旋サンプリング法を提案し、その方案の有効性を実証した。例として、3チャンネルおよび5チャンネルのHLPGを製作し、1次角運動量(OAM)モードを有する多チャンネルHLPGの開発を成功した。さらに、4モードのファイバを用いて、高次のOAMモードを有する単一チャンネルのHLPGの作製法を提案し、OAMモードの変換率90%以上である2次及び3次のOAMモードの生成を実証した。

An equivalent approach to realize the phase-only sampled multichannel helical long-period fiber grating (HLPG) has been demonstrated both theoretically and experimentally which is realized by superposing the so-called sampling HLPGs with the seed HLPG in a same region of the fiber. As examples, a 3-channel and 5-channel HLPG have been successfully demonstrated. Moreover, the orbital angular momentum (OAM) modes inherently existed at all channels of the fabricated HLPG have also been verified, which highlights that the proposed HLPGs could find application to multi-wavelength OAM mode converter. Moreover, single-channel HLPGs enabling to directly turn the fundamental mode ( $HE_{11}$ ) to the second- and the third-OAM modes, respectively with a conversion efficiency of larger than 90% have been proposed and experimentally demonstrated, which are realized based on utilization of a second- and third-order HLPGs written in few-mode fibers.

## 1. はじめに

角運動量(OAM)モードは図1に示すように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る。OAMモード多重光通信システムでは、異なる多数OAMモードの光を同時に伝送させる

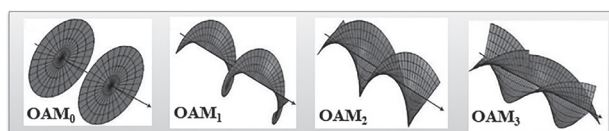


図1 次数0から3までのOAMモードの波面分布

物であり、そのシステム全体の通信容量は、OAMモード数によって整数倍に大きくなる<sup>1,2</sup>。このようなシステムではOAMモード多重(OAMモード生成・分離)デバイスが不可欠である。しかしながら、今迄開発したOAMモードの発生・多重技術は、殆ど螺旋位相板、

q-波長板、位相ホログラフィー法であり、円柱型レンズや、波長板や、空間回折格子や、空間変調器等は必需である。これらの方法は、質の高いバルク素子を必要とし、またそれら自身と光ファイバシステムの導波装置との結合が困難であるという欠点を抱えており、光ファイバ通信システムへの実用が困難である。一方、螺旋状ファイバ回折格子(HLPG)は図2に示すような光軸に沿って周期的なスクリュウタイプの屈折率変調を持ち、OAMのような固有モードを有するファイバデバイスであり、OAMモード発生・多重デバイスとして注目されている。現在、1本の光ファイバに、できるだけ多くのチャンネルと異なるOAMモードを有する螺旋状ファイバ回折格子の実現が強く求められているが、その為の設計法及び製作技術は存在しない。



図2 螺旋状ファイバ回折格子

本研究では、チャンネル数が多くかつ異なるOAMモードを有するHLPGの新しい設計法と製作法を開発し、そして全ファイバ系多チャンネルOAMモード発生・変換器への応用を実証する。

## 2. 位相サンプリング法による螺旋状多チャンネルHLPGの開発

HLPGに関する研究はほとんど単一チャンネルのものである。ここで、位相サンプリング法<sup>3-4</sup>を用いて多チャンネルHLPGの新しい設計法と作製方法を提案した<sup>5</sup>。一般的に、位相のみのサンプリングを行ったHLPGにおける屈折率分布 $\Delta n_M(r, \phi, z)$ は、

$$\Delta n_M(r, \phi, z) = 0.5 \Delta n_0(r, \phi, z) \exp\{i\sigma 2\pi z / \Lambda_0\} \cdot S(z) + C.C., \quad (1)$$

と表現できる。ここで $r$ 、 $\phi$ 、 $z$ はそれぞれHLPGに沿った半径方向の位置、方位角、軸方向の位置を表す。 $C.C.$ は複素共役を表す。 $\Delta n_0(r, \phi, z)$ および $\Lambda_0$ は、それぞれシードHLPGの最大屈折率変調およびピッチを表す。式(1)において、 $\phi$ 変数は位置 $z$ の関数であり、 $\phi(z) = \phi(z + N \cdot \Delta_0)$  ( $N$ は任意の整数)を満たす。 $\sigma$ は利用されたHLPGのハンドドネスを表し、 $\sigma = -1$ と $\sigma = 1$ はそれぞれ左利きと右利きの螺旋を表している。便宜上、一般性を失うことなく、本研究では $\sigma = 1$ のみを考慮している。 $S(z)$ は位相のみのサンプリング関数であるサンプリング関数、周期 $P$ のサンプリング関数 $S(z)$ は、

$$s(z) = \exp(i\phi(z)) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s_m \exp(i2m\pi z / P) = \exp\left\{i \sum_{n=1}^J \alpha_n \cos(2\pi n z / P)\right\}, \quad (2)$$

と表される。ここで $s_m$ は $m^{\text{th}}$ 次の複素フーリエ係数であり、 $\phi(z)$ はサンプリング関数 $S(z)$ の位相である。サンプリング関数 $S(z)$ の位相 $\phi(z)$ は、

$$\phi(z) = \sum_{n=1}^J \alpha_n \cos(2\pi n z / P), \quad (3)$$

と表される。 $J$ は使用される高調波の数であり、その最小の数は製作する多チャンネルHLPGのチャンネル数によって決定される。与えられた $J$ に対して、同じ振幅を持つ $2J+1$ チャンネルが得られる。また $\alpha_n$ は各フーリエ係数 $s_m$ が考慮されるチャンネル番号内で同一になるように最適に選択される。単チャンネル(シードと言われる)HLPGから多

チャンネル H LPG を製作するためには、式(3)に示される位相は離散的に採用され、グレーティングのローカル周期に挿入されなければならない、異なる位相に関してグレーティングのピッチを変化されなければならない<sup>5</sup>。ここではサンプリング関数を実現するための等価で代替的な方法を示す。式(2)を式(1)に代入することにより、位相サンプリング法によってサンプリングされた H LPG の屈折率変化  $\Delta n_m(z)$  は、以下のように書き表せる。

$$\Delta n_M(r, \varphi, z) = \Delta n_0 \cdot \cos\left(2\pi z / \Lambda_0 + \sum_{n=1}^J \alpha_n \cos(2\pi n z / P)\right), \quad (4)$$

一般的に、サンプリング関数の周期  $P$  はシードグレーティングの周期  $\Lambda_0$  より、はるかに大きい。そのため位相項  $\phi(z)$  とグレーティングの位相自体  $2\pi z / \Lambda_0$  を比べると、位相項は非常にゆっくりと変化し、シード H LPG の位相に追加された位相変調の直流部分とみなすことができる。即ち、式(4)は以下の式と表すことができる<sup>6</sup>。

$$\Delta n_M(r, \varphi, z) \approx \Delta n_S + \Delta n_{DC} = (\Delta n_0 / 2) \cdot \cos(2\pi z / \Lambda_0) + \Delta n_{DC}, \quad (5)$$

ここで  $\Delta n_S$  はシード H LPG である。 $\Delta n_{DC}$  はシード H LPG の屈折率変化の DC 部分であり、

$$\Delta n_{DC}(z) = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi(z)}{dz} = \frac{\lambda}{P} \sum_{n=1}^J n \alpha_n \cdot \sin(2\pi n z / P), \quad (6)$$

と表すことができる。ここで  $z$  はグレーティングに沿った位置、 $\lambda$  は中心波長、 $n$  は 1~ $J$  までの範囲の調和次数である。式(6)は  $J$  個のグレーティングの重ね合わせとみなすことができる。よって、同じ長さのファイバに  $J$  個の H LPG を書き込むことにより、式(6)のように屈折率変調を等価的に得ることができ、式(5)で得られたサンプリングされた H LPG が、単チャンネルシード H LPG と  $J$  個の H LPG との重ね合わせとみなすことができる。図3に原理図を示す。ここで一番上のグレーティングは周期が  $\Lambda_0$  の H LPG を表しており、二番目以降はそれぞれ周期が  $P, P/2, \dots, P/J$  の H LPG を表している。以上の原理を用いて直流サンプリング法について説明する。

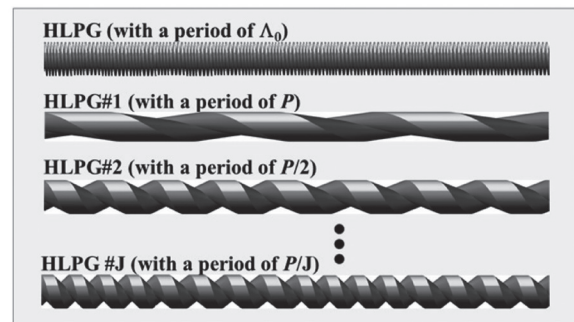


図3 周期  $\Lambda_0$  のシード H LPG と周期  $P, P/2, \dots, P/J$  の H LPG との重ね合わせ

## 2.1 直流サンプリング法<sup>7</sup>

直流サンプリング法は複数のグレーティングを用いてそれぞれのグレーティング周期の差を利用し直流部分のサンプリングを行うことにより多チャンネル化を実現する方法である。直流サンプリング法を図4に示す。まず、周期  $\Lambda_0$  の元となる H LPG(シードグレーティング)を書き込み、その上に周期  $\Lambda_p$  のサンプリングとなる LPG をシードグレーティングと同じ個所書き込む。ここでサンプリング LPG の周期  $\Lambda_p$  がシード H LPG の周期  $\Lambda_0$  よりはるかに大きい場合、シード H LPG における直流部分のサンプリングが可能となり、

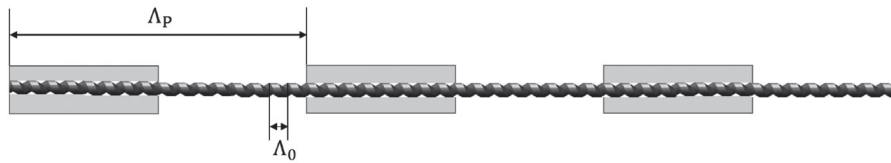


図4 直流サンプリング法を用いた多チャンネル HPLG の模式図

多チャンネル化が実現する。この方法により得られた多チャンネル HPLG は、グレーティングの振幅に存在する差異を除いて、従来のサンプリング法を用いて得られた結果とほぼ同じとなり、ここではサンプリング LPG が一般的なサンプリングのように正確に働くことを示している。しかし、矩形関数を用いて直接  $\text{CO}_2$  レーザを照射する方法は 3 チャンネルにおいては有効であると考えられるが、より多くのチャンネルを実現することは難しいと考えられる。そこで、矩形関数を用いたサンプリングではなく HPLG を用いたサンプリング方法である螺旋サンプリング法を用いることでさらなるチャンネル数の増大が期待できる。

## 2.2 螺旋サンプリング法<sup>8</sup>

螺旋サンプリング法は直流サンプリング法に基づいたサンプリング法であり、複数の HPLG を用いて多チャンネル化を実現する方法である。螺旋サンプリング法を用いた多チャンネル



図5 螺旋サンプリング法を用いた多チャンネル HPLG の模式図

HPLG を図 5 に示す。まず、周期  $\Lambda_0$  の元となる HPLG (シードグレーティング) を書き込み、その上に周期  $\Lambda_p$  のサンプリングとなる HPLG をシードグレーティングと同じ箇所に書き込む。ここでサンプリング HPLG の周期  $\Lambda_p$  がシード HPLG の周期  $\Lambda_0$  よりはるかに大きい場合、シード HPLG における直流部分のサンプリングが可能となり、多チャンネル化が実現する。多チャンネル HPLG のチャンネル数はサンプリング HPLG の数によって決定する。チャンネル数が 3 および 5 の多チャンネル HPLG の構造をそれぞれ図 6(a) および (b) に示す。チャンネル数が 3 の場合はサンプリング HPLG の数が 1 となり、チャンネル数が 5 の場合はサンプリング HPLG の数が 2 となる。理論上はサンプリング HPLG の数を 1 つずつ増やしていくとチャンネル数が 2 ずつ増えていく。

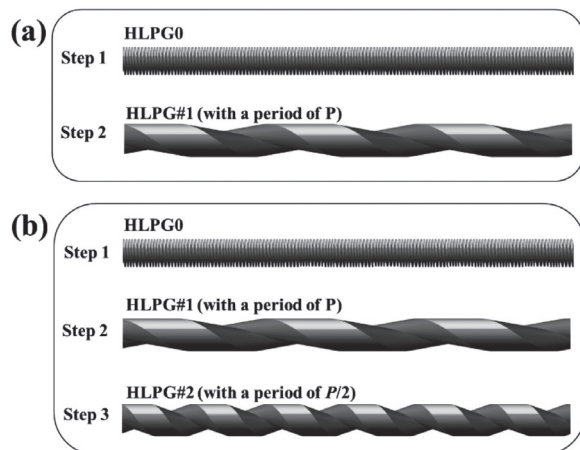


図6 多チャンネル HPLG の構造、(a) 3 チャンネル (b) 5 チャンネル

### 3. CO<sub>2</sub>レーザーによる螺旋状多チャンネルH LPGの製作及び評価

図7にH LPGの製作装置を示す。製作装置は主にステージ、回転モーター(Motorized Rotator)、結晶管(Sapphire tube)、CO<sub>2</sub>レーザーから構成されている。ステージに搭載された光ファイバは直線状に張られ、一部は結晶管に通されている。CO<sub>2</sub>レーザーから出射した光を円柱レンズで屈折、スポットサイズを拡大させた上で結晶

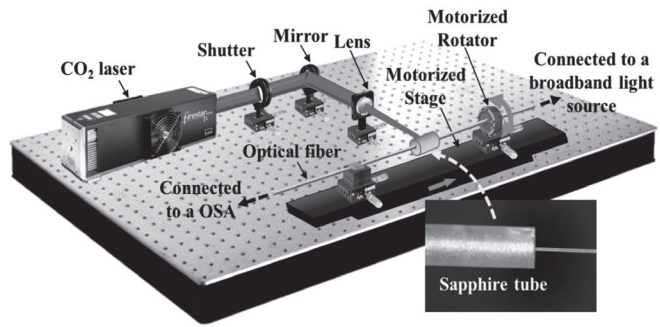


図7 H LPGの製作装置

管に照射し、十分に加熱されたところでステージと回転モーターを同時に作動させる。回転モーターによって光ファイバをねじることで、結晶管内ではねじり変形が生じる。結晶管はステージからは独立して固定されているため、徐々に加熱領域が移動し、光ファイバに連続的なねじり変形、すなわち螺旋構造を形成することができる。ステージと回転モーターはLabViewによって同調されており、移動速度 $V$  (0~2 mm/s)及び回転速度 $\omega$  (0~360°/s)任意に設定できる。光ファイバの変形がごく狭い領域で起こるとすれば、形成されるH LPGのピッチ $\Lambda$ (mm)は、 $\Lambda = V(360^\circ) / \omega$ と求めることができ、移動速度及び回転角度を適当に設定することで、任意のピッチを得ることができる。光源は広帯域(約1100~1750nm)のものである。まず、直流サンプリング法を用いた多チャンネルH LPGのシミュレーションを行った<sup>7</sup>。さらに、螺旋サンプリング法を用いた多チャンネルH LPGのシミュレーション及び製作も行った。3チャンネルH LPGの透過スペクトルのシミュレーション結果を図8(a)に示す。ここでシードH LPGの長さ及びサンプリングH LPGのピッチはそれぞれ5.76 cm、1.44 cmと仮定され、サンプリング周期が4周期であることを表している。製作した3チャンネルH LPGの透過スペクトルの測定結果を図8(b)に示す。図8(b)から12dB以上の深さを持つ、相対的な深さがほぼ等しい3つチャンネルを有していることがわかる。また各チャンネルの間隔は約45 nmとなっておりシミュレーションに近い値となっている。

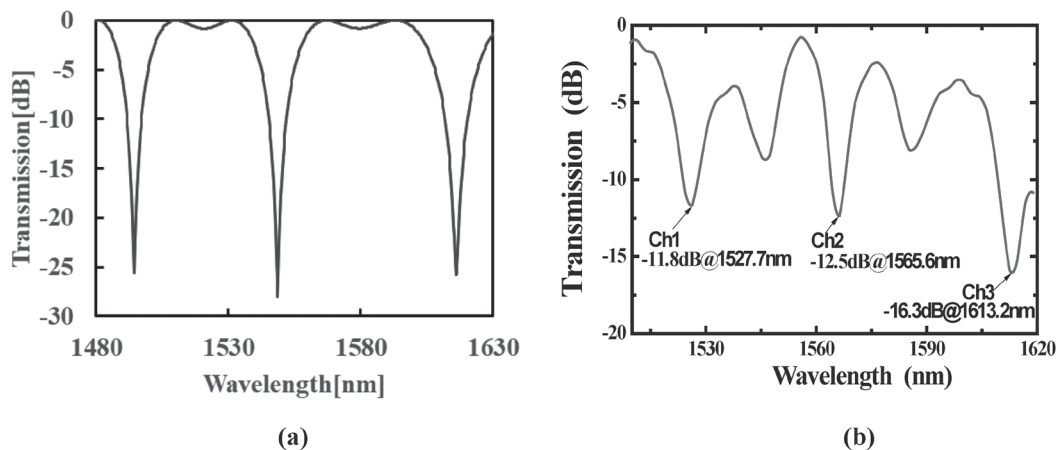


図8 螺旋サンプリングによる3チャンネルH LPGのシミュレーション及び実験結果 (a) シミュレーション (b) 測定結果

#### 4. OAMモードの生成と観測<sup>8-12</sup>

図9に示すのはHPLGに発生したOAMモードを観測する装置である。ここで、波長可変レーザーによって波長を任意の値に設定することができる。一方の光はHPLGに伝搬されOAMモードを生成し、レンズ(Lens)を介してビームスプリッタ(BS)に伝搬される(ルート①とする)。もう一方の光は偏光コントローラ(PC)と減衰器(Attenuator)に伝搬され、BSに伝搬される(ルート②とする)。生成されたOAMモードはCCDカメラによって観察することができる。具体的に、OAMモードの強度分布はルート②の光を遮断する時CCDカメラの像であり、位相分布はルート①光とルート②光の干渉図である。図10は、図8(b)に示す3チャンネルHPLGを通過し生成したOAMの測定結果である。図10により波長1527.7 nm、1565.6 nm、1613.2 nmに(即ち3チャンネル)1次OAMモードが生成することが分かる。また、3チャンネルのOAMモードの変換率はすべて90% (20 dB) 以上である。

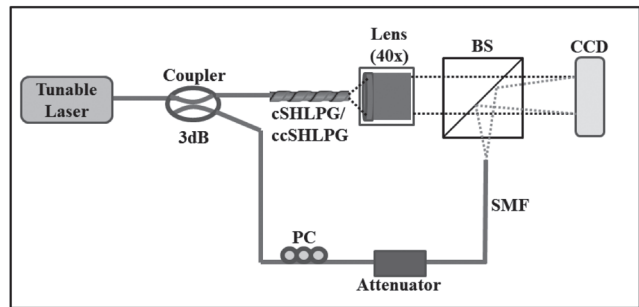


図9 OAMモード観測の実験系

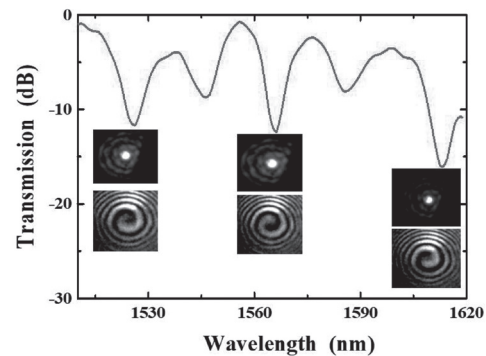


図10 3チャンネルHPLGによる3チャンネルOAMモードの生成と測定結果

次に、2次のOAMモードを有するHPLGを作成するために、4モードファイバを用いてピッチ $970\mu\text{m}$ 、長さ $47.5\text{mm}$ (50周期)、回折次数2のHPLGを試作した。その測定結果を図11に示す。ここで図11(a)透過スペクトルであり、波長が $1548.0\text{nm}$ の所に、約10dBの損失のピークが発生していることが分かる。透過スペクトルを観察する際にOAMと繋がるアダプタにシングルモードファイバを用いているため、高次モードはコア内を伝搬できず、透過スペクトル上で損失として現れる。すなわち、損失の現れている波

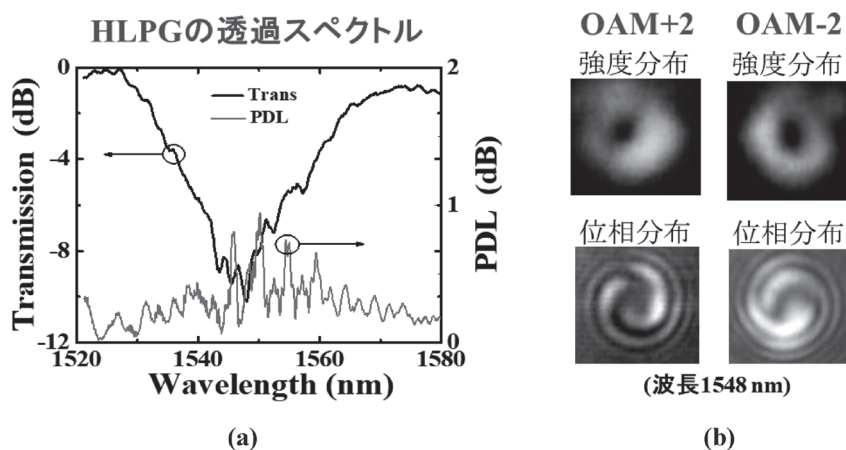


図11 HPLGによる2次OAMモードの生成と測定結果

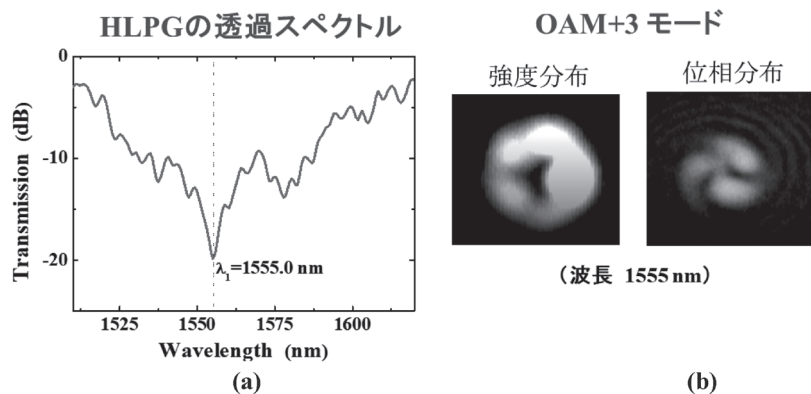


図 12 HPLG のよる 3 次 OAM モードの生成と測定結果

長で OAM モードの発生といった高次モードへの変換が起こっていると考えられる。図 11 (b) は OAM モードの測定結果である。その結果により波長 1548 nm ( $\Lambda 970 \mu\text{m}$ ) に変換率 90% (10 dB 損失) 以上の 2 次 OAM モードが生成することが分かる。

最後に、3 次の OAM モードを有する HPLG を作成するために、4 モードファイバを用いてピッチ  $950 \mu\text{m}$ 、長さ  $57.0 \text{ mm}$  (60 周期)、回折次数 3 の HPLG を試作した。その透過スペクトルを図 12 (a) に示す。ここで、波長が  $1555.0 \text{ nm}$  の所に、約 20 dB の損失のピークが発生していることが分かる。OAM の測定結果を図 12 (b) に示す。その結果により波長  $1555 \text{ nm}$  ( $\Lambda 950 \mu\text{m}$ ) に変換率 99% (20 dB) 以上の 3 次 OAM モードが生成することが分かる。

## 5. 結論

本研究では、多チャネル螺旋状長周期ファイバ回折格子(HPLG)を実現するための複数の回折格子を重ね合わせることにより、屈折率変化の直流部分を変調する直流サンプリング法と螺旋サンプリング法を提案し、その方案の有効性を実証した。例として、3 チャネルおよび 5 チャネルの HPLG を試作し、その OAM モードの生成と観測を行い、1 次角運動量(OAM)モードを有することが確認出来た。さらに、4 モードのファイバを用いて、高次の OAM モードを有する単一チャンネルの HPLG の作製法を提案し、そのモード変換率 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。

## 6. 謝辞

本研究は、平成 30 年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。ここに謝意を表します。

## 参考文献

1. N. Bozinovic et al., "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers," *Science* 340, 1545-1548 (2013).
2. A. Willner et al., "Optical communications using orbital angular momentum beams," *Adv. Opt. Photon.*, 7, 66-106 (2015).
3. H. Li, Y. Sheng, Y. Li, and J. E. Rothenberg, "Phased-only sampled fiber Bragg gratings for high-channel-count chromatic dispersion compensation," *IEEE J. Lightwave Technol.*, 21, 2074-2083 (2003).

4. H. Li, M. Li, Y. Sheng, and J. E. Rothenberg, "Advances in the design and fabrication of high channel-count fiber Bragg gratings," *IEEE J. Lightwave Technol.*, 25, 2739-2749 (2007).
5. C. Zhu, S. Ishikami, P. Wang, H. Zhao, and H. Li, "Optimal design and fabrication of multichannel helical long-period fiber gratings based on phase-only sampling method," *Opt. Express*, 27, 2281-2291 (2019).
6. C. Zhu, S. Ishikami, H. Zhao, and H. Li, "Multichannel long-period fiber grating realized by using the helical sampling approach," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 37, 2008-2013 (2019).
7. C. Zhu, P. Wang, H. Zhao, S. Ishikami, R. Mizushima, and H. Li, "DC-sampled helical long-period fiber grating and its application to the multichannel OAM generator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 31, 1445-1448 (2019).
8. 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.*, 39, In Press, DOI: 10.1109/JLT.2021.3056182 (2021).
9. H. Zhao, P. Wang, T. Yamakawa, and H. Li, "All-fiber second-order orbital angular momentum generator based on a single-helix helical fiber grating," *Opt. Lett.*, 44, 5370-5373 (2019).
10. P. Wang, H. Zhao, T. Detani, and H. Li, "Simultaneous generation of the first- and second-order OAM using the cascaded HLPs," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 32, 685-688 (2020).
11. P. Wang, H. Zhao, T. Detani, Yuhta Tsuyuki, and H. Li, "Demonstration of the mode-selection rules obeyed in a single-helix helical long-period fiber grating," *Opt. Lett.*, 45, 1846-1849 (2020).
12. 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.*, 46, 949-952 (2021).