

# 螺旋状回折格子による OAM 光通信への応用

代表研究者 李 洪譜 静岡大学 工学部 教授

## 1 はじめに

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、情報通信インフラである光ファイバネットワークの更なる高速大容量化が必要となり、これを支えるシステムとして軌道角運動量 (OAM) モード分割多重と波長分割多重 (WDM) 技術を融合したシステムの実現が期待されている。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、直交性がある電磁波である。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、その全体の通信容量は、使用した OAM モードの数によって整数倍に大きくなる [1-2]。このようなシステムの実現は 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・制御技術は、ほとんど位相ホログラフィーと空間回折格子法、あるいはバルク系グレーティングや空間変調器やレンズ、又はアレイ導波路グレーティング等を用いた方法である。その二つ方法の欠点は、質の高いバルク素子を必要とすることと、それら自身を光ファイバシステムの導波装置と結合することが困難になり、実用が難しく、実際不可能である。一方で、螺旋状ファイバ回折格子 (HLPG) はファイバ軸に沿って周期的なスクリュータイプの屈折率変調があるファイバコンポーネントであり [3-4]、OAM のような固有モードを有するので、現在有望な OAM モード多重デバイスとして注目されている [5-7]。現在、1 本の短い光ファイバに、できるだけ多くのチャンネル (波長) の OAM モードを有するファイバデバイス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。

本研究では、位相のみのサンプリング法に基づく新しいマルチチャンネル HLPG の設計法と製法を提案し、その案を実証する。また、2 つの回折格子を重ね合わせることで、直流部分をサンプリングする方法を提案し、その方法の実用性と有用性を実験的に実証する。例として、提案した炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) レーザの照射法による通常のシングルモードファイバ (SMF) を用いられ 3 チャンネルの HLPG を試作する。最後に、作製した多チャンネル HLPG を用いて、多チャンネル 1 次 OAM モードの発生・制御を実験的に検証し、その案の妥当性、実用性を調査する。

## 2 位相サンプリングの法による多チャンネル HLPG

### 2-1 位相サンプリングの原理と位相サンプリング関数最適化

サンプリングドファイバブラッググレーティング (FBG) と同様に、サンプリングド HLPG はその振幅が周期的なサンプリング関数  $S(z)$  によって変調されたもので、その屈折率変調  $\Delta n_M(z, \varphi)$  は次のように表される [8-9]

$$\Delta n_M(z, \varphi) = \text{Re}\{(\Delta n(z, \varphi) / 2 \cdot \exp(i l \varphi)) \exp\{i l 2\pi z / \Lambda_0\}\} \times S(z) \quad (1)$$

ここで、符号  $\text{Re}$  は実数部の意味である。また  $\Delta n(z, \varphi)$  は最大屈折率変化、 $z$  はグレーティングに沿った方向の位置、 $\varphi$  は方位角、 $\Lambda_0$  はグレーティングの周期、 $l$  は HLPG の螺旋度、 $S(z)$  は周期的サンプリング関数である。フーリエ級数を用いて、 $S(z)$  は次のように表される。

$$S(z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \exp(i 2 m \pi z / P) \quad (2)$$

ここで、 $P$  はサンプリング関数の周期であり、 $S_m$  は複素フーリエ級数の  $m$  次係数である。便利のため、式 (1) における HLPG 屈折率変化の直流成分はゼロであると仮定される。さらに HLPG の屈折率変調が十分に小さい時、クロス透過スペクトル  $t_c(\beta)$  (クラッド領域の光透過スペクトルと言う) は式 (1) の両辺を  $z$  方向にフーリエ変換することによって得られ、

$$t_c(\beta) = \Im(\Delta n_M(z, \varphi)) = \Im(\Delta n_s(z, \varphi)) \otimes \Im(S(z)) = \Im(\Delta n_s(z, \varphi)) \otimes \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \cdot \delta(\beta - l \cdot m \frac{\pi}{P}) \quad (3)$$

と表される。ここで、 $\beta = (\beta_{core} - \beta_{clad} - l \cdot 2\pi/\Lambda_0)/2$  は波数領域におけるグレーティングの離調、 $\beta_{core}$  と  $\beta_{clad}$  はそれぞれコアの基本モードの伝搬定数および特定のクラッドモードの伝搬定数である。演算子  $\mathfrak{F}$  はフーリエ変換を、 $\otimes$  は畳み込みを、 $\delta$  はデルタ関数を表す。上記の方程式から、サンプルド HPLG の透過スペクトルは、シード HPLG の透過スペクトルとフーリエ領域における周期的なサンプリング関数の畳み込みによって得られることが分かる。結果として、波数領域において  $l\pi/p$  の間隔を持つ多チャンネル透過スペクトルが得られ、振幅を除けば、各チャンネルの透過スペクトルは、シードグレーティングのものと同一なものになる。さらに、本研究では通常の単一モードファイバに、単一の螺旋構造 ( $l=1$ ) によって HPLG が形成されているが、この場合のチャンネル間隔は

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{(n_{eff}^{core} - n_{eff}^{clad}) \cdot P} = \lambda \frac{\Lambda}{P} \quad (4)$$

と表される。ここで、 $n_{eff}^{core}$  と  $n_{eff}^{clad}$  はそれぞれコアの基本モードおよびクラッドモードの実効屈折率であり、 $\lambda$  はシードグレーティング HPLG の中心波長である。多チャンネル HPLG を設計するにあたり、位相のみのサンプリング法を用いる。これは、各サンプリング周期において振幅のアポディゼーションを加える必要がなく、HPLG の場合は特に適し、設計と製作両方とも容易になる。一般性を失わないように、サンプリング関数の位相  $\phi(z)$  は、いくつかの調和項を含む形式で、

$$s(z) = \exp(i\phi(z)) = \exp\left\{i\sum_{n=1}^J \alpha_n \cos(2mz/P)\right\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_m \exp(i2m\pi z/P) \quad (5)$$

を表す。ここで、調和項の数  $J$  は最小化され、各項の  $\alpha_n$  はそれらのフーリエ係数  $S_m$  が想定するチャンネル数の内で均一になるように最適化される。式 (5) におけるフーリエ級数の対称性より、 $J$  項からなる級数によって最大  $2J-1$  個の均一なチャンネルを実現することが出来る。式 (5) における  $\alpha_n$  の最適な数値を得るために、複数のパラメータを持つコスト関数を減少させる焼きなまし法を用いる。最適化の目標は、チャンネル間隔と各フーリエ係数  $S_m$  均一になること、及び帯域内の回折効率  $\eta$  が最大になることである。ここで、コスト関数を

$$E(z) = \sum_{m=-M}^M \left[ |S_m(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_J)|^2 - \frac{\eta}{2M+1} \right]^2 \quad (6)$$

と定義する。ここで、 $\eta$  は帯域内のチャンネル数 ( $2M+1$ ) に対する回折効率、 $S_m$  はサンプリング関数のフーリエ級数である。これらの和は回折効率と呼ばれ、 $\eta = \sum_{m=1}^N |S_m|^2$  となる。上記の理論分析結果を確認するため、

我々はいくつかの位相のみのサンプリング関数を設計した。特に、3チャンネルおよび9チャンネルの位相のみのサンプリング関数の最適化の結果を、図1および2に、それぞれ示す。図1(a)に3チャンネルの位相のみのサンプリング関数の位相分布 (1周期内) を示す。その解析式は以下のように表れる。

$$\phi_3(z) = 1.437 \times \cos(2\pi z/P) \quad (7)$$

図1(b)はチャンネルスペクトルであり、3チャンネルの不均一さは0.5%以下、帯域内のエネルギー (回折) 効率は91%以上のが分かる。図2(a)は9チャンネルの位相のみのサンプリング関数の位相分布であり、その解析式は以下のように表れる。

$$\begin{aligned} \phi_9(z) = & -2.935 \times \cos(2\pi z/P) - 0.758 \times \cos(4\pi z/P) + 0.420 \times \cos(6\pi z/P) \\ & - 0.318 \times \cos(8\pi z/P) + 0.171 \times \cos(10\pi z/P) \end{aligned} \quad (8)$$

図2(b)はチャンネルスペクトルであり、9チャンネルの不均一さは0.4%以下、帯域内のエネルギー (回折) 効率は97%以上のが分かる。

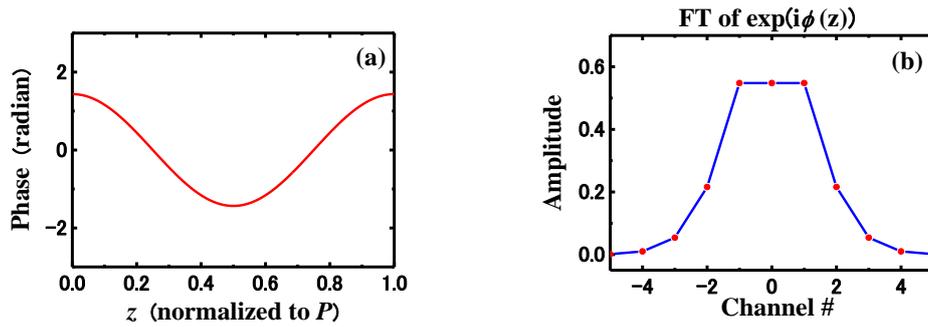


図 1. 3 チャンネル位相のみのサンプリング関数の最適化 (a) 1 周期内の位相分布、(b) チャンネルスペクトル

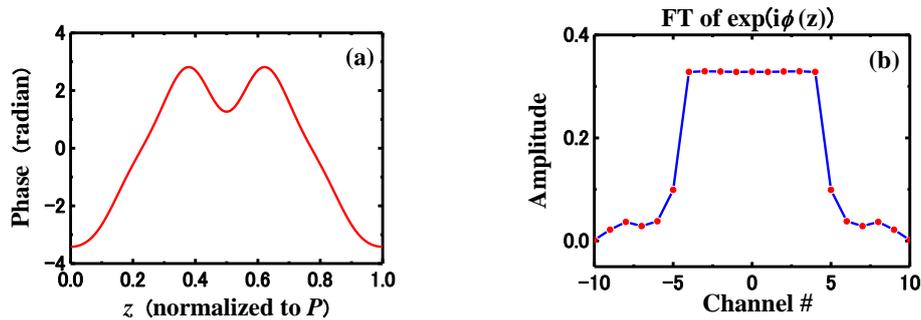


図 2. 9 チャンネル位相のみのサンプリング関数の最適化 (a) 1 周期内の位相分布、(b) チャンネルスペクトル

得られたサンプリング関数の有効性をさらに確認するため、空間領域でシード HPLG とサンプリング関数を掛けた。そしてサンプルド HPLG の透過スペクトルを伝達行列法で計算した。ここで、シードグレーティングの周期  $A_0$  は  $620 \mu\text{m}$  とした。その他のパラメータ、ファイバコア及びクラッドの半径  $a_1$ 、 $a_2$ 、コア、クラッド、周囲の媒質の屈折率  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  はそれぞれ  $a_1=4.1 \mu\text{m}$ 、 $a_2=62.5 \mu\text{m}$ 、 $n_1=1.4580$ 、 $n_2=1.4536$ 、 $n_3=1.0$  とした。結果として、HPLG の透過スペクトルには、基本コアモードとクラッドモード間の結合により生じる損失ピーク（ノッチ）が並ぶことになるが、ここでは周期  $620 \mu\text{m}$  の HPLG が波長帯域  $1500\text{--}1650 \text{ nm}$  において生じさせ、 $\text{HE}_{13}$  モードとの結合のみを考慮する。それゆえに、本研究では HPLG の  $\text{HE}_{14}$  モードに対する共振波長を  $1560 \text{ nm}$  とした。図 3 はサンプルド HPLG の透過スペクトルの計算結果で、図 3(a) は 3 チャンネル、図 3(b) は 9 チャンネルのものである。両者のサンプリング周期は  $1.984 \text{ cm}$ 、グレーティングの全長は  $5.952 \text{ cm}$  (3 サンプリング周期) である。3 チャンネルおよび 9 チャンネル HPLG の最大屈折率変化は、それぞれ  $1.72 \times 10^{-4}$ 、 $3.0 \times 10^{-4}$  と仮定する。図 3 より、両者のチャンネル間隔およびノッチの大きさには均一性が見られ、グレーティングの強度（ノッチの深さ）は  $10 \text{ dB}$  よりも大きいと言える。これは、提案したサンプリング法が HPLG にも適用でき、ノッチの深さが  $10 \text{ dB}$  を超えるような、強い HPLG においても十分に機能することを意味する。

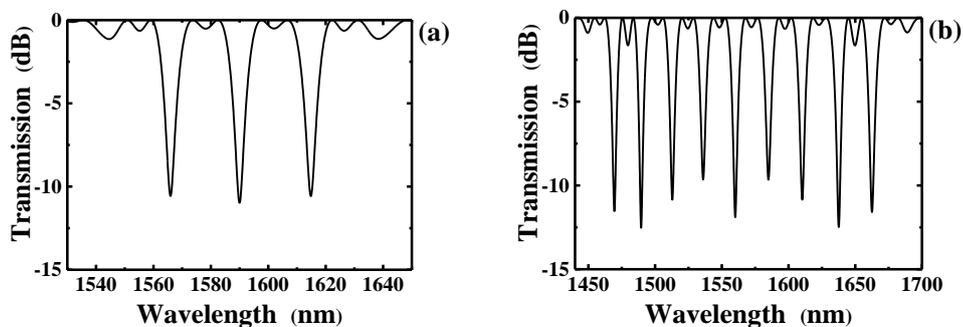


図 3. 位相のみのサンプルド HPLG の設計結果 (a) 3 チャンネル、(b) 9 チャンネル

## 2-2 位相のみのサンプルド HPLG の作製と測定結果

前節に得られた数値計算結果を確認するため、いくつか 3 チャンネル HPLG を実際に作製した。実験に用いた装置を図 4 に示す。これは、我々が単チャンネル HPLG の作製のために開発した、使用したものと同一である [10]。ここで、ZnSe レンズで CO<sub>2</sub> レーザを絞り込み、ファイバに直接照射する従来方法とは異なり、サファイア結晶管を用いられる。図 4 中の移動ステージは並行移動のみ可能ものである。このステージ上にホルダと回転モーターが載せられているが、結晶管はステージの外に固定されている。光ファイバをステージ上にセットする際は右のホルダ、結晶管の中心、回転モーターを通るようにセッティングする。図 5 に HPLG 中のレーザ照射部の拡大図を示す。CO<sub>2</sub> レーザは直接にファイバではなくファイバが通っているサファイア管に照射する。これにより、結晶管全体が加熱されるため、ファイバを均一に加熱することができる。図 5 において、CO<sub>2</sub> レーザを照射すると結晶管の内部にあるファイバが加熱され熔融状態になり、その時、回転モーターでファイバを捻じり、同時に移動ステージを動かす、するとファイバにねじり変形を加えることができる。さらに、図 1(a) に示した、設計された位相関数  $\phi(z)$  はグレーティング周期に書き込まれるが、それにより各グレーティングの周期は、

$$A_j = A_0(1 - \Delta\phi_j / 2\pi), \quad 1 \leq j \leq M \quad (9)$$

と表される。ここで、 $A_0$ (本研究では 620  $\mu\text{m}$  とした) はシードグレーティング(単チャンネル HPLG)の周期、 $M$  は一つサンプリング周期内のグレーティングピッチ数、 $\Delta\phi_j = \phi_j - \phi_{j-1}$  は隣接するグレーティングピッチの位

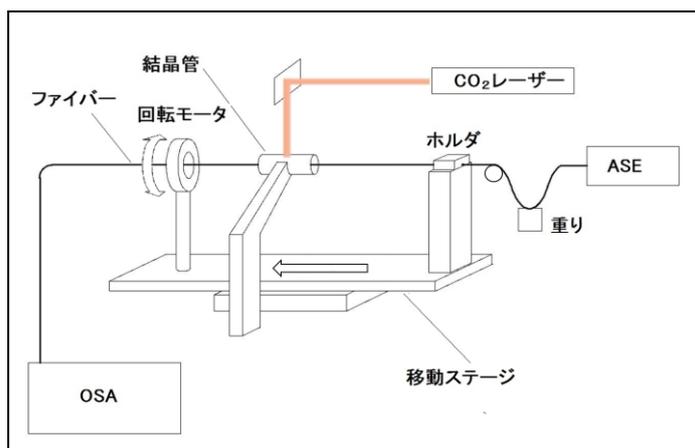


図 4 多チャンネル HPLG 作製装置の概図

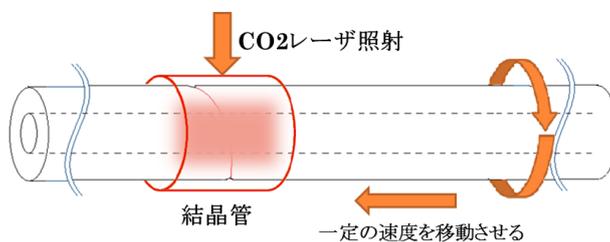


図 5 作製装置に結晶管付近の拡大図

相差である。式(9)より、設計したサンプルド HPLG の局所的な周期を再度計算した。3 チャンネル HPLG に対応する、一つサンプリング周期内のグレーティング周期(32 周期のグレーティングからなる)を図 6 に示す。この図から、位相のみのサンプリングを導入したことでグレーティング周期は均一ではなくなり、グレーティングごとに異なる長さを持つようになったことが分かる。作製に当たり、ファイバの移動速度および回転

モーターの速度を精密に制御することで、H LPG の周期の誤差は $\pm 1\mu\text{m}$  と見積もることが出来る。最後に、1510-1620 nm の帯域を持つ ASE 光源と OSA を用いて、作成した多チャンネル H LPG の透過スペクトルを測定した。図 7 に 3 チャンネル H LPG の透過スペクトルの例を示す。これは図 3(a) に示したシミュレーション結果と類似しており、3 つのノッチ(チャンネル)が、約 30 nm の均一な間隔で存在している。チャンネル間隔は式(4)より、サンプリング関数の周期とシードグレーティングの周期から決定される。本研究で提案された位相のみのサンプリング法が H LPG でもうまく動作することを明らかにする。

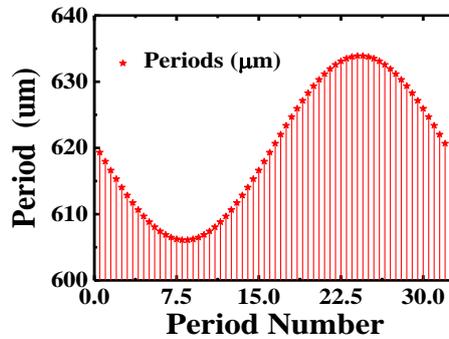


図6 設計された位相のみのサンプルド3チャンネルH LPG の各グレーティングの周期

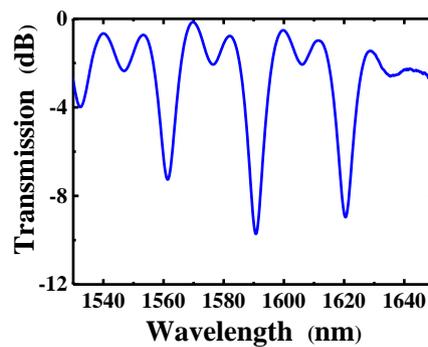


図7 3チャンネルH LPG の透過スペクトル

### 3 直流サンプリング法による多チャンネル H LPG

#### 3-1 直流サンプリングの原理

直流サンプリング法は2つ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用いた多チャンネル H LPG を図 8 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へ書き込む。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る。サンプリング H LPG では、DC 屈折率変調関数が周期的な矩形関数である場合、その屈折率変化分布  $\Delta n_p(z)$  は、

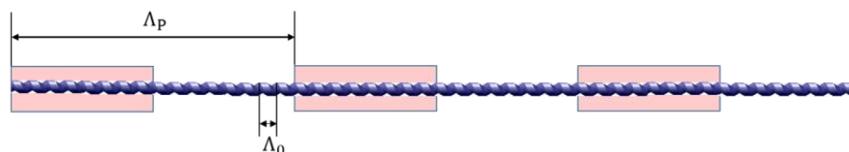


図8 直流サンプリング法を用いた多チャンネル H LPG の模式図

$$\Delta n_p(z) = \Delta n_2 \cdot \text{rect}[z/(0.5A_p)] \otimes \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(z - n \cdot A_p) \quad (10)$$

と表すことができる。ここで  $\Delta n_2$  は H LPG の最大屈折率変化、 $A_p$  はサンプリング LPG の周期、 $\otimes$  は畳み込み演算を表し、 $\text{rect}(z)$  は 0.5 デューティサイクルの矩形関数であり、 $\delta(z)$  はデルタ関数である。サンプリング LPG の周期  $A_p$  はシード H LPG  $A_0$  の周期よりはるかに大きいと仮定されているので、LPG はゆっくりと変化する様々な屈折率変化としてみなすことができ H LPG の DC 部分屈折率変調を変化させるだけである。言い換えると、LPG から生じるゆっくりと変化する様々な屈折率変化の効果に起因して、式(1)の位相項は線形なものではなく無視できないため、この位相の変化は、

$$\phi_M(z) = \int_0^z \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_2 \cdot \text{rect}[z/(rA_p)] \otimes \left( \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(z - n \cdot A_p) \right) dz \quad (11)$$

と表すことができる。ここで  $\lambda$  は中心波長である。式(11)を式(1)に代入することにより、位相変調された H LPG の屈折率変調分布は、

$$\Delta n_M(z, \varphi) = \text{Re}((\Delta n_1/2) \cdot \exp(j\varphi) \cdot \exp(j2\pi z/A_0) \cdot \exp(j\phi_M(z))) \quad (12)$$

と表すことができる。式(12)の位相変調項  $\exp(j\phi_M(z))$  は周期特性のためフーリエ級数展開が可能であるので、式(12)は以下のように表すことができる。

$$\Delta n_M(z, \varphi) = (\Delta n_1/2) \cdot \exp(j\varphi) \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \cos\{2\pi z(1/A_0 + n/A_p)\} \quad (13)$$

ここで、 $F_n$  はフーリエ級数である。式(13)から  $\Delta n_M$  すなわちシード H LPG とサンプリング LPG の重ね合わせは、無数の新たに得られたグレーティング（チャンネル）からなるものとみなすことができ、それらの各々は、異なる次数  $n$  に関して振幅  $(\Delta n_1/2)F_n$  および周期  $\Lambda = 1/(1/A_0 + n/A_p)$  を有する。上記の結果は、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方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[11]。

### 3-2 矩形サンプルド H LPG の作製と測定結果

本論文では直流サンプリング法を用いて多チャンネル H LPG を製作する。実験装置の概略図を図9に示す。図9のように2つ工程に分けて多チャンネル H LPG の製作を行う。まず第1工程では通常よりも周期数の多い H LPG を製作する。第2工程では、H LPG を作製した箇所に CO<sub>2</sub> レーザを直接照射して LPG を書き込む。シャッターを用いて周期的にレーザの ON/OFF を切り替えながらステージを動かすことにより LPG の製作を可能としている。作製した3チャンネル H LPG の透過スペクトルの測定結果を図10に示す。図10から実際に相対的な深さがほぼ等しい3つのチャンネルが存在し、10 dB 以上の深さ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 42 nm となっておりシミュレーションに近い値となる。また中央のチャンネルの両側に位置するチャンネルが左右非対称となっていることがわかる。これはシード H LPG の開始端とサンプリング LPG の開始端の位置にずれが生じているからであると考えられる。

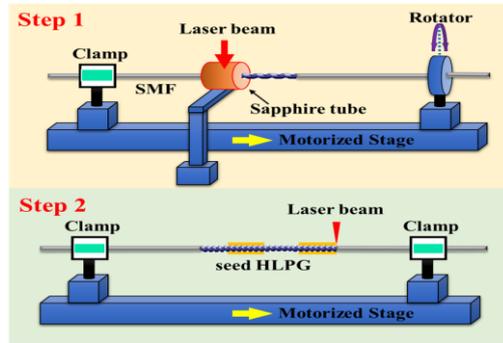


図9 実験装置の概略図（移動ステージ部分）

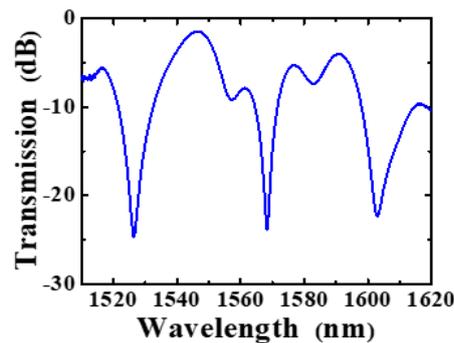


図10 直流サンプリング法による作製した3チャンネルHPLGの測定透過スペクトル

#### 4 多チャンネルHPLGによるOAMモード変換器の実現と観測

作製した3チャンネルHPLGのOAMモード特性に関する研究も行った。図11は、OAMモードを観測するため実験系である。これは光渦の位相分布を観察するために一般的に使用されているものとはほぼ同じである[12]。波長1500から1600nmの範囲の波長可変レーザ(Agilent 8168F)が光源として使用される。波長可変レーザからの入射光は、図11に示すように、3dBカプラによって2つ経路に分割される。一つは、作製したHPLGに導かれ、対物レンズ(40x)を使用してビームスプリッタ(BS)を通してコリメートされる。もう一つ経路は、CCD(IRカメラ:浜松ホトニクスC2741-03)の結像面において第1経路からの光ビームとの干渉縞を生成するために球面ビームとして使用される。生じる干渉縞の可視度を調整するために、偏光コントローラ(PC)および減衰器が使用される。また、図10に透過スペクトルが示されている同じ3チャンネルのHPLGを試験対象とした。図12は、CCDディスプレイで観察された結像パターンを示す。その中図12(a)と(b)、および(c)は、参照ビームをブロックされ、40倍レンズは10倍レンズを代わり、透過されているチャンネル1、チャンネル2、およびチャンネル3(すなわち、波長1510、1555、および1590nm)での光強度分布を示す。一方、図12(d)、(e)、および(f)は、それぞれ3つのチャンネルでの干渉パターンを示す。図12(a)-12(c)から、得られた3つのチャンネルはすべて同じLP<sub>14</sub>クラディングモードを明らかにした。これは提案されたサンプリングサンプリング方法の正確さを明らかにした。さらに重要なことに、図12(d)-12(f)から、OAMモード( $l=1$ )が3つのチャンネルで同時に生成され、それぞれが $\sim 20$ dBの変換効率を持っていることがわかる。これは、我々のHPLGで励起されたクラディングモードが本質的にOAM性能を有するものであることを確認出来、本研究提案されたマルチチャンネルHPLGが多波長OAM発生器として使用できることを明らかにした。

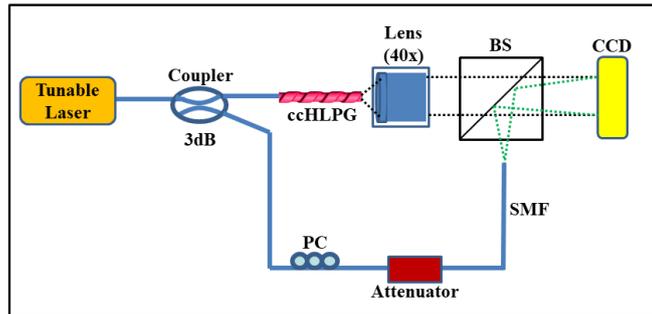


図 1 1 HPLG の OAM モードの特性を観測するための実験系

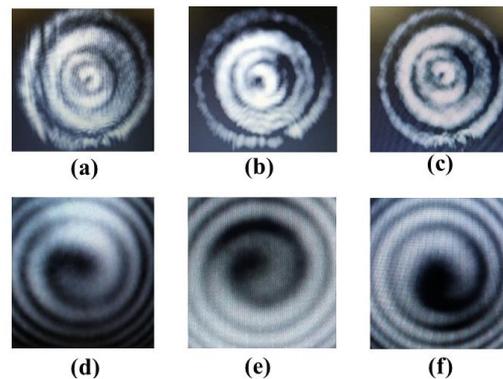


図 1 2 3チャンネルHPLGにOAMモード( $l=1$ )に対する強度分布および干渉パターン。(a)と(d)、(b)と(e)、及び(c)と(f)はそれぞれチャンネル1、チャンネル2、及びチャンネル3の結果を示す。

## 5 まとめ

本研究では、位相のみのサンプリング法に基づいた、新しい多チャンネルHPLGの作製法を提案し、実証を行った。 $\text{CO}_2$ レーザを用いて、位相のみサンプリド3チャンネルHPLGの作製を行った。この方法により、通常の単一モードファイバによる多チャンネルHPLGの作製が可能となる。またHPLGにおいてマルチチャンネルを生成することを可能にする簡単で効率的な直流サンプリング手法が提案し、実証を行った。フェーズオンリーサンプリングHPLGの製造方法と比較して、提案された直流サンプリング法は、特に $\text{CO}_2$ レーザ書き込み技術を使用することによって、マルチチャンネルHPLGの製造プロセスを非常に容易にすることができる。1つの典型的な例として、矩形のDCサンプリングされた3チャンネルHPLGを理論的にも実験的にも実証した。最後に作製した3チャンネルHPLGを用いて、HPLGに存在する軌道角運動量(OAM)モードを確認出来た。これは、1つのHPLGを使用したマルチチャンネル(波長)OAMモードの実験的生成に関するレポートは世界初であり、提案されたサンプリングHPLGは、多波長OAM発生器への応用を見出すことができる。

## 【参考文献】

- [1] J. Wang, J. Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A. E. Willner, "Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing," Nat. Photonics vol. 6, pp. 488-496 (2012).
- [2] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. Willner, S. Ramachandran, "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers," Science, vol. 340, pp. 1545-1548 (2013).
- [3] V. I. Kopp, V. M. Churikov, J. Singer, N. Chao, D. Neugroschl, and A. Z. Genack, "Chiral fiber gratings," Science, vol. 305, pp. 74-75 (2004).

- [4] G. K. L. Wong, M. S. Kang, H. W. Lee, F. Biancalana, C. Conti, T. Weiss, and P. St. J. Russell, "Excitation of orbital angular momentum resonances in helically twisted photonic crystal fiber," *Science*, vol. 337, pp. 446–449 (2012).
- [5] H. Xu, and L. Yang, "Conversion of orbital angular momentum of light in chiral fiber gratings." *Opt. Lett.* vol. 38, pp. 1978-1980 (2013).
- [6] L. Fang and J. Wang, "Flexible generation/conversion/exchange of fiber-guided orbital angular momentum modes using helical gratings," *Opt. Lett.* vol. 40, pp. 4010-4013 (2015).
- [7] Y. Zhang, Z. Bai, C. Fu, S. Liu, J. Tang, J. Yu, C. Liao, Y. Wang, J. He, and Y. Wang, "Polarization-independent orbital angular momentum generator based on a chiral fiber grating," *Opt. Lett.* vol. 44, pp. 61-64 (2019)
- [8] H. Li, M. Li, Y. Sheng, J. E. Rothenberg, "Advances in the design and fabrication of high-channel-count fiber Bragg gratings," *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, pp. 2739-2750 (2007).
- [9] 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*, vol. 27, pp. 2281-2291 (2019).
- [10] Peng Wang and H. Li, "Helical long-period grating formed in a thinned fiber and its application to refractometric sensor," *Appl. Opt.*, vol. 55, pp. 1430-1434 (2016).
- [11] C. Zhu, S. Ishikami, H. Zhao, and H. Li, "Multichannel long-period fiber grating realized by using the helical sampling approach," *J. Lightwave Technol.*, vol. 37, pp. 2008-2013 (2019).
- [12] S. Ramachandran and P. Kristensen, "Optical vortices in fiber," *Nanophotonics* vol. 2, pp.455–474 (2013).

#### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Multichannel Fiber Bragg Grating Based on DC-sampling Method	Optics Commun.	2019, August
Multichannel long-period fiber grating realized by using the helical sampling approach	IEEE J. Lightwave Technol.	2019, May
Optimal design and fabrication of multichannel helical long-period fiber gratings based on phase-only sampling method	Opt. Express	2019, Feb.
All-fiber circular polarization filter realized by using helical long-period fiber gratings,	IEEE Photon. Technol. Lett.	2018, Nov.
Mode-couplings in two cascaded helical long-period fibre gratings and their application to polarization-insensitive band-rejection filter	Optics Commun.	2018, August
Design of an edge filter based on a phase-only modulated long-period fiber grating	IEEE Photonics Journal	2018, Jan.
Multichannel helical long-period fiber grating realized by using the DC-sampling approach	IEICE Society Conference 2019	2019, Mar.
多チャンネル螺旋状長周期ファイバグレーティング	電子情報通信学会2018ソサイエティ大会	2018年9月