

高性能螺旋状ファイバ回折格子の開発とその光操作・光センシング技術への応用

静岡大学 工学部機械工学科

李 洪譜

1. はじめに

方位角方向偏光(AP)ビームと半径方向偏光(RP)ビームは、空間的に変化する偏光分布を持つ円筒形ベクトルビームの2つの一般的なタイプである。そのような個性的偏光特性により、AP/RPビームは包括的に研究され、光学操作、光学顕微鏡、高解像度計測、材料処理、粒子加速、表面プラズモンポラリトン励起の分野でさまざまな用途が見出されている¹⁾。過去数十年で、干渉計、空間光変調器、複屈折ディスプレイ、コンピューター生成ホログラム、メタサーフェス、マイクロリングベースの統合デバイスの利用に基づくものなど、このようなAP/RPビームを受動的または能動的に生成するさまざまな方法が開発された。上記の方法のほとんどはバルク部品であり、AP/RPビームをファイバレーザやファイバセンサーなどのファイバベースのアプリケーションに使用する場合は、必然的に高い挿入損失またはアライメントの問題のいずれかに悩まれている。このようなニーズに対応するために、過去数年間にファイバベースのAP/RPビームジェネレーターが提案され、広く実証された。ただし、これまでに報告されたファイバベースの方法はすべて、少数モードファイバ(FMF)の利用に基づき、APモードまたはRPモードは、シングルモードファイバー(SMF)とFMF間のオフ軸またはエバネッセント結合によって選択的に励起される。その結果、高い挿入損失とアライメントの問題は未解決のままである。一方、光渦ビームは軌道角運動量(OAM)ビームとも呼ばれ、ドーナツ状の強度分布と波面における $\exp(i l \phi)$ の螺旋位相を特徴とし²⁾、ここで ϕ は方位角、 l はトポロジカル電荷数を表す。現在までに、OAMビームは広く研究されており、光精密測定、光通信、光操作、量子情報処理などの分野で幅広い応用が見出されている³⁾。OAMビームを生成できるさまざまな方法が開発され、円筒レンズ、qプレート、集積シリコンデバイス、Jプレート、ファイバベースのモード変換器などがある。その中で、ファイバベース、特にヘリカル長周期ファイバグレーティング(H LPG)ベースのOAMジェネレーターは、その優れた特性（例えば、コンパクトなサイズ、極めて低コスト、低挿入損失、高い変換効率、および他のファイバデバイスとの固有の互換性など）により、最近大きな関心を集まり⁴⁾⁻⁶⁾、従来のOAMビームベースのアプリケーションに加えて、光渦ファイバレーザ、誘導放出抑制(STED)顕微鏡法にも使用されている。しかし、H LPGベースのAPおよびRPビームジェネレーター、特に方位角偏光とラジアル偏光ビームだけでなくハイブリッド偏光渦(HPV)ビームの一般化を可能にするH LPGベースのコンポーネントは研究されたことがなく、これにより、使用されるH LPGのアプリケーション機能が大幅に拡張され、測定システムが大幅に簡素化される可能性がある。本研究の前半では、短周期のH LPGを用いて、入力偏光状態と動作波長を適切に選択することで実現されるAP/RPビームとHPVビームを理論的かつ実験的に実証する。

一方、従来の光干渉計と組み合わせたOAMビーム、すなわちOAMビームベースの干渉計(OAM)干渉計とも呼ばれる)は最近特別な関心を集めており、超高精度測定分野でさまざまな応用が見出されている⁷⁾⁻⁹⁾。このような干渉計は、それぞれテストビームと参照ビームとして使用される2つの複素共役OAMビームの導入により、空間領域または周波数(波長)領域

で一般的に使用される位相復調技術ではなく、方位角領域で実現される、まったく新しい、シンプル、高速、高精度の位相復調技術を提供できる⁹⁾。しかし、これまでに提案され実証された OAM ビームベースの干渉計は、ほとんどバルク構造であり、自由空間で動作されている。つまり、使用される二つ OAM ビームは、バルクコンポーネントを使用して自由空間でのみ生成される。これにより、測定システムのサイズと複雑さが大幅に増加し、その結果、このような干渉計の精度と安定性は、振動、大気の乱流、温度変動などの外部摂動の影響を非常に受けやすくなる。さらに重要なのは、前述の OAM 干渉計はすべて偏光依存性があり、実際のアプリケーションには適さないことである。本研究の後半では、一般的に要求される 2 つの複素共役 OAM ビームを、特に設計され、少数モードファイバで書き込まれた 2 つの HLPG を使用して生成する。全ファイバ OAM ビームベースの干渉計を提案し、実験的に実証する。従来の OAM ビームベースの干渉計と比較して、結果として得られる干渉縞は偏光非依存性があり、堅牢で、方位角領域での位相復調法に特に適している。

2. 螺旋状ファイバ回折格子を用いた軸対称偏光ビーム及び OAM ビームの生成

従来の長周期ファイバ回折格子(LPG)では、右円偏光と左円偏光を入射したときに現れる損失ピークは図 1(a)のように変化しない。それと比較し、図 1(b), (c)はそれぞれ、左巻きと右巻きの HLPG での損失ピークが、入射光が左円偏光の場合と右円偏光の場合と異なり、コア $HE_{1,1}$ モードが、 $HE_{2,m}$ モードと $TE_{0,m}/TM_{0,m}$ モードに選択的に結合している様子を示す。コアモードとクラッドモードの間で発生する共振結合により生じる損失ピークの波長 λ を求めるため、ファイバ軸方向の運動量保存則^{10), 11)}（以下、位相整合条件とする）を式(1)として示す。

$$\lambda = \{n_{eff}^{core}(\lambda) - n_{l,m}^{cladding}(\lambda)\}\Lambda \quad (1)$$

式(1)において、 $n_{eff}^{core}(\lambda)$ 、 $n_{l,m}^{cladding}(\lambda)$ はそれぞれ、コアモード $HE_{1,1}$ とクラッドモード $HE_{l+1,m}/HE_{l-1,m}$ の実効屈折率を表しており、 Λ は HLPG の周期を表している。式(1)に加えて、角運動量保存条件^{[3], [4]}が必要となり、式(2)で与えられる¹⁰⁾。

$$L_{cl} = L_{co} + \sigma \quad (2)$$

式(2)において、 L_{cl} と L_{co} はクラッドとコアの OAM であり、 σ は HLPG のヘリシティで、 $\sigma=1$ は左巻きヘリシティ、 $\sigma=-1$ は右巻きヘリシティである。

本研究で研究対象とする HLPG は全て左巻きものを仮定し、即ち $\sigma=-1$ (LHLPG)である。次に LHLPG を単一モードファイバ(SMF)に製作する。作製セットアップを図 2 に示す。ここでは、SMF を利用して移動ステージを駆動し、同時に電動回転子を駆動してサファイアチューブ内の加熱された SMF をねじった。LHLPG の直径とピッチは、移動ステージと電動回転子の速度を同時に調整することで正確に制御された。製造では、LHLPG の直径とピッチは、それぞれ $111.0 \mu\text{m}$ と $120.0 \mu\text{m}$ に特別に選択された。基本モード $HE_{1,1}$ から励起したモード $TE_{0,13}/TM_{0,13}$ および $HE_{2,13}$ への高い変換効率を得るために、製造には $375 \mu\text{m}$ 周期の LHLPG(長さ 4.5 cm)が採用された。

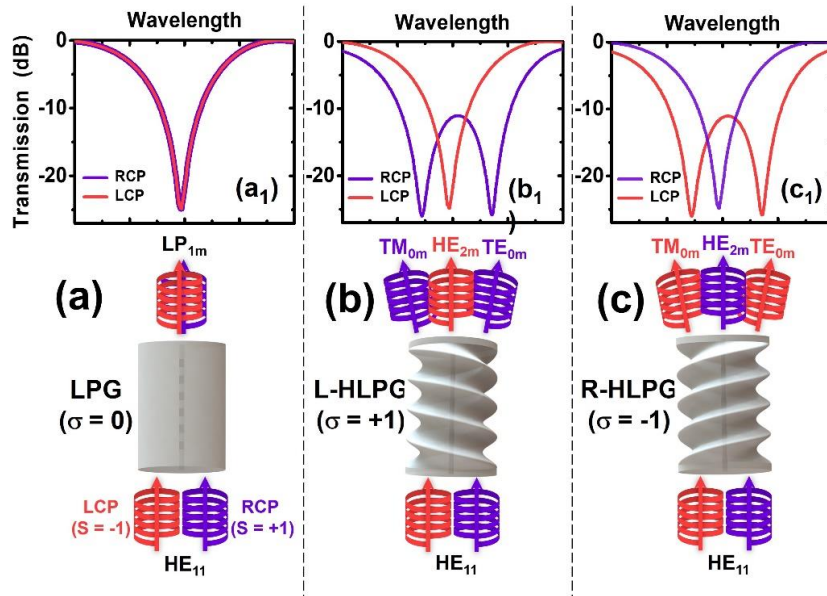


図1 (a) LPG (b) 左巻らせれLPG (L-HLPG) (c) 右巻らせれん状LPG (R-HLPG)における、LCPとRCP入射時の透過スペクトル

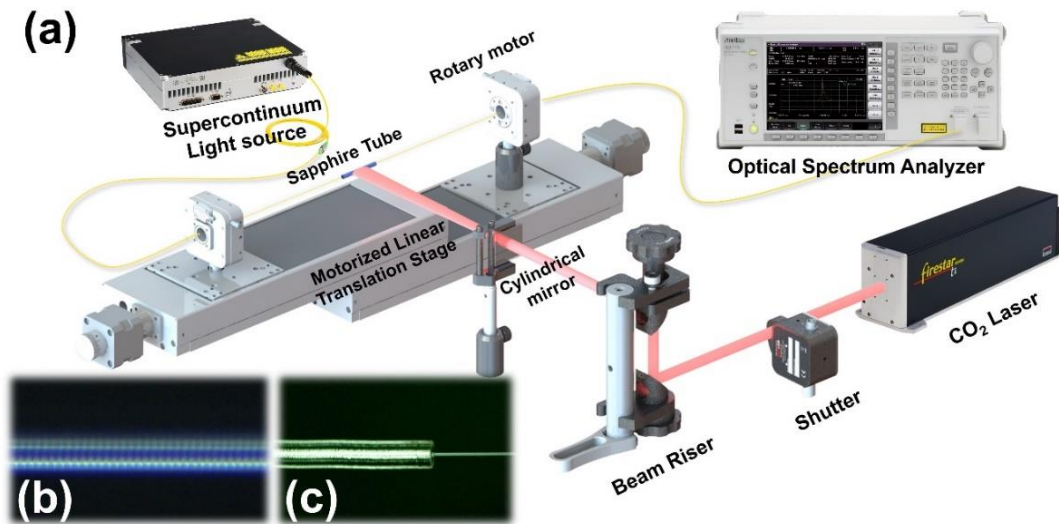


図2 (a) CO₂レーザー加熱技術に基づくHPLPGの製作装置。(b) 製作したHPLPGの顕微鏡写真。(c) サファイアチューブに挿入されたファイバ。

測定結果を図3に示します。図3(a)と3(b)は、それぞれ入射光がRCP(青)とLCP(赤)の状態に調整された場合のLHLPGの透過スペクトルを示している。図3から、図1(b)から予想されるものとほぼ同様に、入射光の偏光状態に関して2つの異なるスペクトル曲線が存在することがわかる。RCP入射光の場合、図3(a)に示すように、1556.68 nmと1566.23 nmに位置する2つの損失ピークが得られる。一方、LCP光の場合は、図3(b)に示すように、波長1559.56 nmを中心とする1つの損失ピークのみが得られる。1559.56 nmの波長で現れる共鳴ピークがHE_{1,1}とHE_{2,13}の間で発生するモード結合に起因し、1556.68 nmと1566.23 nmのピークがそれぞれTE_{0,13}モードとTM_{0,13}モードに起因していることを証明する

ために、LHLPF の遠端で生成された 3 つのビームの強度と位相分布をさらに測定した。図 4 は、 $TE_{0,13}/TM_{0,13}$ および $HE_{2,13}$ の生成ビーム（モード）の測定結果を示す。図 4 (a) は、テス

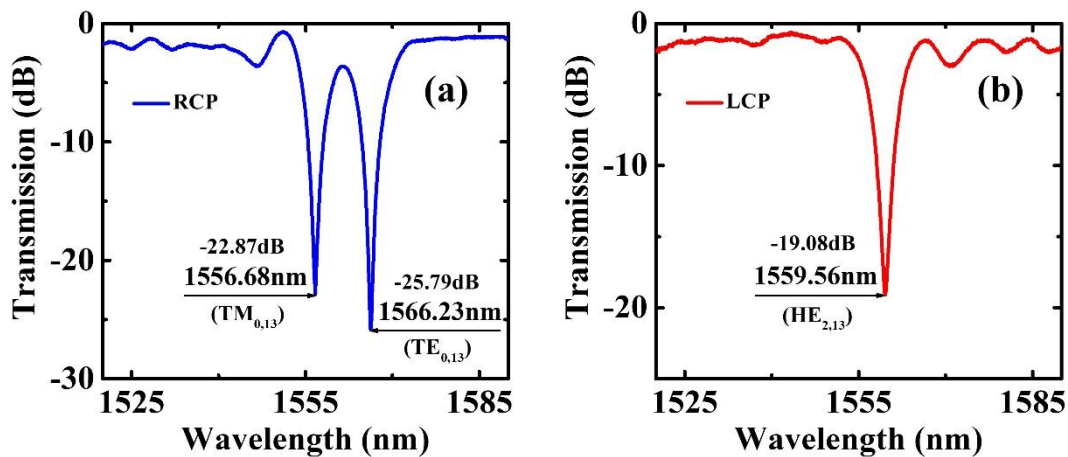


図3 作製したHLPFの偏光依存スペクトルの測定結果。入射光は(a)RCP、(b)LCPの状態である

トされた LHLPF の入射光が LCP 状態で調整されているときに、波長 1559.56 nm で観測された HPV ビームの強度と位相の分布を示す。一方、図 4 (b) と 4 (c) は、テストされた LHLPF の入射光が RCP 状態でのみ調整され、追加された偏光子の軸に対して 4 つの特別な角度 (45、90、135、180 度) が設定されているときに、それぞれ波長 1556.68 nm と 1566.23 nm で測定されたビームプロファイルを示す(矢印線で表示)。図 4 (a) に示す結果から、波長 1559.56 nm で生成されたビームは、実際には半径指数 13 (13 リング) の渦ビームであることがわかる。これは、得られた渦ビームが実際にはハイブリッド偏光モード $HE_{2,13}$ から発生したことを示す。一方、図 4 (b) と 4 (c) から、1556.68 nm と 1566.23 nm で生成されたモードも同じ半径指数 13 であることがわかる。さらに重要なことは、その二つビームの強度分布のゼロ軸が、追加された偏光子の軸（矢印の方向）に対して垂直または平行であることがわかる。これは、これらの 2 つの波長で生成されたビーム（モード）が実際には RP モードと AP モード、つまりそれぞれ $TM_{0,13}$ モードと $TE_{0,13}$ モードであることを証明している¹¹⁾。

3. OAM 干渉計による超高感度・超高速光ファイバセンシングシステムの開発

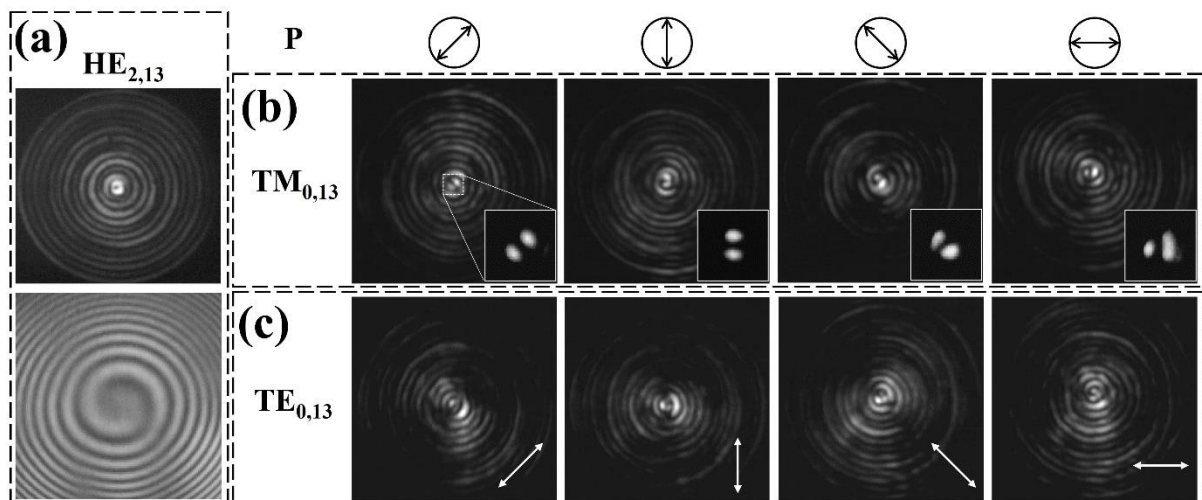


図4 生成されたモードの強度と位相分布。(a) 波長1559.56 nmで観測されたモードの強度と位相分布。(b) 1556.68 nm と (c) 1566.23 nm の波長で測定された強度分布。ここで、二重矢印は使用された偏光子の軸方向を表す

ファイバ回折格子は本来強くセンシング機能を持つ物であり、その透過スペクトルの損失ピークの波長変化により、回折格子と埋め込んだ構造物や材料の温度、歪み、ねじり変化などが測定でき、ファイバセンサーとして幅広い分野に応用された。最近では、ファイバ回折格子の小型化、軽量化、微量測定などが可能となり、抗体、核酸、毒素、農薬、他の小分子を含む様々な生物を検知する応用を見出すと期待されている。しかしながら、通常のファイバ回折格子は波長シフト/屈折率変化の感度が極めて小さく、上記の方法は波長シフトの微量を精確に測定するため、より高い波長分解能を有する光スペクトルアナライザー(OSA)または広帯域光源等が望まれるが、そのデバイスはすべて複雑かつ高価であり、更に波長走査は極めて低効率(低速度)なので、検知対象の微量変化かつ高速の測定は不可能である。1つ有望な解決方法としては、光 OAM モード干渉計を用いた技術である。H LPG の一つの応用として、我々は、図5に示すような OAM モード干渉計を提案し、高い分解能を有する温度変化及び歪み変位の測定を行った。ここで ccH LPG 及び cH LPG は右回りと左回りの H LPG である。通常のマッハ・ツェンダーファイバ干渉計とは異なり、位相共役となっている二つの OAM ビームが使われていることによって、測定対象から引き起こす二つの経路間の位相差 $\phi(n)$ は図6の中のエッセットに示すように OAM 干渉図の回転角度に比例する。

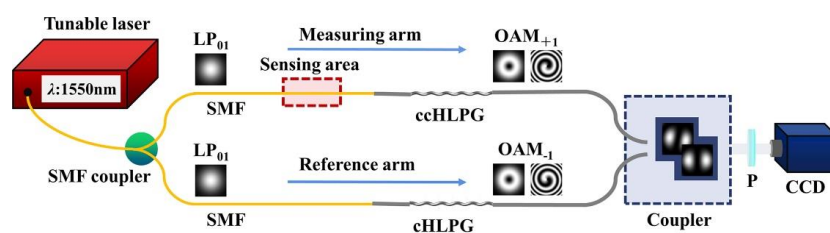


図5 全ファイバーOAM干渉計の構成図

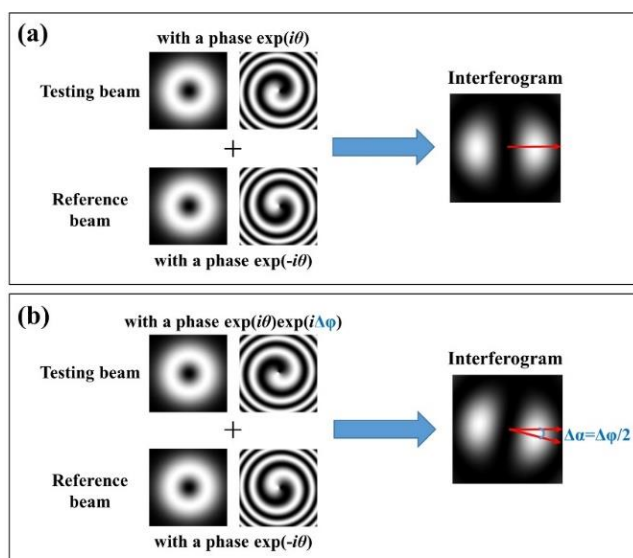


図6 OAM ビームベースの干渉計の原理図。(a) 位相変化 $\Delta\phi$ なし、(b)位相変化 $\Delta\phi$ (つまり、テスト対象の変化) がある

図 1 から、テストアーム内にあるシングル モードファイバ(SMF)の一部をオールファイバ ーセンシング ヘッドとして使用出来ることが分かる。これにより、結果として得られる干渉 縞の回転角度を正確に測定するだけで、周囲の温度の変化と適用された歪みを正確に決定でき る。特に、温度測定の場合、センシング スキームは図 7 (a)に示すように配置できます。この スキームでは、SMF のセンシング領域を意図的に断熱ボックスに挿入し、温度コントローラ ー(ThorLabs TC200) を使用する。図 8 (a) に示すセンシング部品を使用することで、温度測定 を実現しました。実験では、30 °C から 60 °C までの温度が 1 °C ずつ自動的に変更され、各 温度ステップの経過時間は約 10 秒でした。各温度ステップ中、対応する干渉縞が CCD カメ ラによって 100 フレーム/秒(fps) の速度でリアルタイムに記録された。記録された各フレームを注意深く観察して確認すると、花びらのような干渉縞が各温度ステップで 9 回転以上回 転することがわかる。これは、単位温度あたり 27.5 rad の位相変化に対応する。具体的には、 30、31、32、および 33 °C の温度での安定した干渉縞をそれぞれ図 8 (a)～(d)に示す。以前 に文献で報告された同様の復調方法を適用するには図 8 (a)～(d)に示す干渉縞に適用し、干渉 縞が実際に回転する回転数 (2π の整数) を考慮すると、位相差と印加温度の関係を簡単に得 ることができる。これは図 8 (e)に示され、実線の円と線は実験結果を表す。

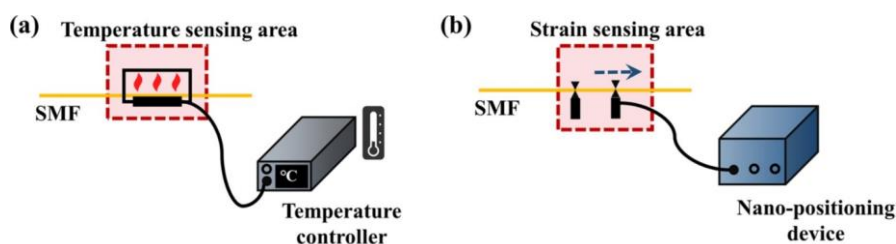


図7 (a) 温度と(b) ひずみの変化を測定するために使用した実験スキーム

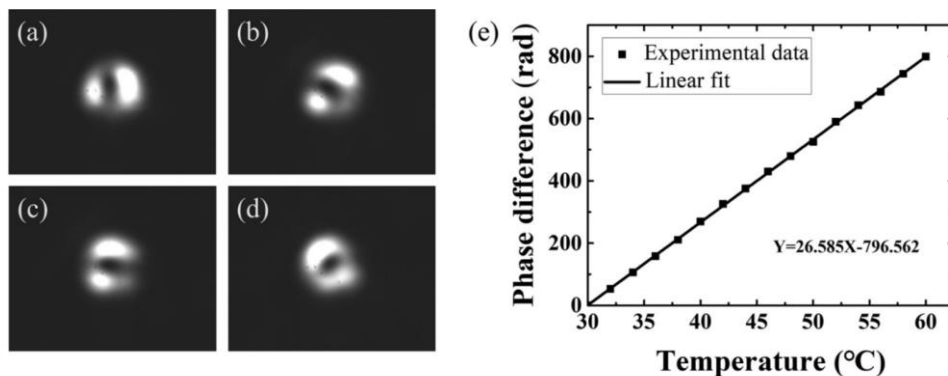


図8 異なる温度による干渉縞の変化。適用温度はそれぞれ(a) 30 (b) 31(c) 32 (d) 33 °Cである (e) 抽出された位相変化と、適用温度に対する線形フィッティング データ

図 9 (a)に図 7 (b)に示されるセンシング部品を使用することで、ひずみ測定結果である。ひず みは 0 から 100 $\mu\epsilon$ まで 0.5 $\mu\epsilon$ ずつ自動的に変化し、各ひずみの測定に要した時間は一定に 固定されました。その他の手順は、上記の温度測定で行った手順とまったく同じである。図 9 (a)～(d) は、それぞれ 0 $\mu\epsilon$ 、0.5 $\mu\epsilon$ 、1 $\mu\epsilon$ 、1.5 $\mu\epsilon$ の異なるひずみを適用した場合に得られ た干渉縞を示している。図 9 (e) は、ひずみによる位相変化と適用されたひずみの関係を示し ています。ここで、実線の円と線は、それぞれ抽出されたデータとそれらの線形フィッティン

グを表しています。この図から、0～100 $\mu\epsilon$ のひずみで得られた位相/ひずみ感度は約 2.130 rad/ $\mu\epsilon$ であり、理論値とよく一致することがわかります。回転角測定の精度が約 0.01°であると仮定すると、実験で得られたひずみ測定の精度は約 0.0195 $\mu\epsilon$ です。

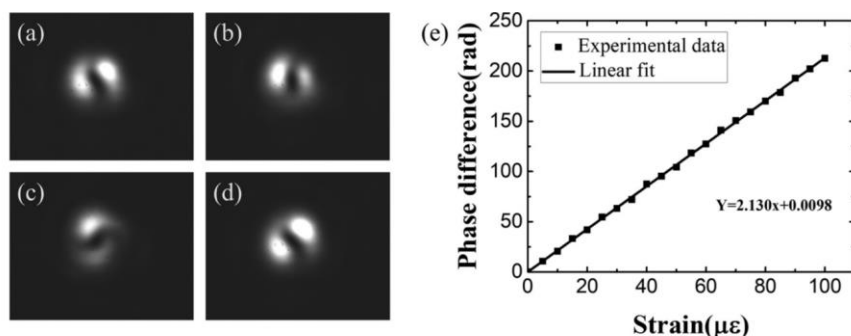


図9 異なるひずみに対する干渉縞の変化。ここで、適用されるひずみは (a) 0, (b) 0.5, (c) 1.0, (d) 1.5 $\mu\epsilon$ である。(e) 抽出された位相変化と、適用されるひずみに対する線形フィッティング データ

4. まとめ

研究の前半では、中周期の HLPG を使用することで実現される、方位角/ラジアル偏光ビームとハイブリッド偏光渦ビームの柔軟な生成を可能にする効率的な方法が提案され、実験的に実証された。私たちの知る限りでは、このような 3 種類の円筒形ベクトルビームを 1 つのファイバコンポーネント、つまり LHPG のみを使用して柔軟に生成できるのはこれが初めてです。提案された方法は、レーザー加工だけでなく、光ピンセットや光マニピュレーターにも HLPG 的な応用を提供できる。

本研究の後半では、全ファイバ OAM ビームベース干渉計を提案し、実験的に実証しました。この干渉計では、HLPG によって生成されるが反対のらせん性を持つ 2 つの共役 OAM ビームを、それぞれテストビームと参照ビームとして使用した。得られた干渉縞は、偏光に依存せず、堅牢で、方位角領域での位相復調に特に適している。提案されている全ファイバ OAM ビームベースの干渉計は、超高精度およびセンシング測定への潜在的な応用が期待される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Q. Zhan, "Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications," Adv. Opt. Photon., 1(1), 1–57 (2009).
- 2) L. Allen, M. Beijersbergen, R. Spreeuw, and J. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre Gaussian laser modes," Phys. Rev. A 45(11), 8185–8189 (1992).
- 3) Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong and X. Yuan, "Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities," Light Sci. Appl. 8, 90 (2019).
- 4) V. I. Kopp, V. M. Churikov, J. Singer, N. Chao, D. Neugroschl, and A. Z. Genack, "Chiral fiber gratings," Science 305, 74–75 (2004).
- 5) 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(21), 5370–5373 (2019).
- 6) H. Zhao and H. Li, “Advances on mode-coupling theories, fabrication techniques, and applications of the helical long-period fiber gratings: a review,” *Photonics* 8(4), 106 (2021).
 - 7) O. Emile and J. Emile, “Naked eye picometer resolution in a Michelson interferometer using conjugated twisted beams,” *Opt. Lett.*, 42(2), 354–357 (2017).
 - 8) Q. Jia, X. Qiu, Z. Wu, W. Zhang, and L. Chen, “Transferring linear motion of an optical wedge to rotational frequency shift in an orbital angular momentum interferometer,” *Appl. Phys. Lett.*, 111 (9), 091102 (2017).
 - 9) H. Lu et al., “Nano-displacement measurement system using a modified orbital angular momentum interferometer,” *IEEE J. Quantum Electron.*, 58(2), 7500105 (2022).
 - 10) Z. Meng, H. Zhao, Y. Seo, S. Oiwa, P. Wang, and H. Li, “Observation of the enhanced dual-split photonic spin Hall effect in wavelength domain via a helical fiber grating,” *Appl. Phys. Lett.*, 125(12), 121101 (2024).
 - 11) Z. Meng, J. A. Jamy, Y. Kotani, P. Wang, H. Zhao, and H. Li, “Flexible generation of azimuthally/radially polarized beams and hybrid polarized vortex beam using a thinned helical fiber grating,” *Opt. Lett.*, 49(20), 5917-5920 (2024).