

光反応性高分子液晶を用いた偏光渦モード検出素子の開発

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal



坂本 盛嗣 (Moritsugu SAKAMOTO, Ph. D.)

長岡技術科学大学工学研究科電気電子情報系 准教授
(Associate Professor, Department of Electrical Engineering,
Nagaoka University of Technology)

応用物理学会 日本光学会 レーザー学会 日本液晶学会 OPTICA
SPIE

受賞：コニカミノルタ画像科学奨励賞（優秀賞）（2017 年） 第 52 回応
用物理学会北海道支部学術講演会発表奨励賞（2017 年） 9th OPTICS &
PHOTONICS JAPAN Best Presentation Award (2013 年)

著書：K. Kawai, M. Sakamoto, K. Noda, T. Sasaki, N. Kawatsuki, H. Ono,
“One-Step Holographic Photoalignment for Twisted Nematic Liquid
Crystal Gratings,” INTECH (2017 年)

研究専門分野：偏光光学 特異光学 応用光学 液晶フォトリソ

あらまし

次世代の光通信技術として現行の通信容量を飛躍的に向上させることが期待されている偏光渦のモード多重通信の実用化には、偏光渦の多重化情報を分離・検出する工程が必要不可欠である。本研究計画では、これまでに申請者らが開発した液晶偏光ホログラムによる偏光渦モード分離法の原理を拡張し、偏光渦の次数及び 2 直交状態を含む完全なモード分離素子の実現を目指すことを目的としている。提案素子は小型且つ多モード入力に対応可能であり、光干渉計と等価な機能を持ちながら極めて安定な光干渉信号を得ることができるという特徴を持つ。さらに提案素子を用いた偏光渦モードスペクトルメータを試作した。偏光渦多重通信の実現に向けて、ファイバ中を伝播する偏光渦の特性解析及び有線通信の実証実験を行い、提案方式の偏光渦多重通信方式の要素技術としての確立を目指した。

1. 研究の背景と目的

5.0 社会への突入に向けて IoT 関連の技術開発の重要性が増す中、情報伝達手段である光多重通信の容

量化が必須の課題となっているものの、波長・振幅・位相・時間などの既存の多重方式では原理上その容量の上限が頭打ちとなっている。この問題を克服し、次世代の通信技術を実現するべく、モード分割多重方式 MDM が近年注目を集めている（図 1）。MDM は光の横モードを新たなパラメータとして光多重通信に利用するというものであり、主に光渦や偏光渦と呼ばれる位相又は偏光の空間モードを利用する研究が国内外の研究者によって勢力的に行われている。これらの光波が取り得るモードの数には上限が無い為、原理上は無限に伝送容量を上げられることが注目されている所以である。特に偏光渦は、同一のモード次数間に 2 つの直交する状態（2 直交状態）が縮退する為、光渦に比べて伝送容量が倍になるという利点を持つ。さらに、偏光渦は既存の光ファイバの導波モードに対応するため光渦に比べて既存ファイバ内での安定伝送の面でも有利であり、2 モードの有線通信（2km 伝送）の実証例がごく最近報告される等その有用性が示されつつあり [1]、光渦に比べて MDM 方式では後発であるものの近年注目され始めている。

偏光渦多重通信方式の実用化には、特に偏光渦のモード分離・検出技術が必要不可欠である。その中で近年、Milione らはフィルタリング素子を利用して特定のモードを抽出する方式を [2]、Zheng らは幾何学的変換素子を用いてモード毎に空間的に異なる位置に集光する方式を [3] それぞれ提案している。しかし、前者の方式は既存のフィルタリング素子では特定次数の偏光渦のみにしか対応できず、単一素子では検出可能なモード数が 2 つ迄に制約される。後者の方式では 2 重回折結像系を不可欠とする為、光学系が大型化するという難点を持っていた。モードのフィルタリング機能を単一素子に集積化することができれば、これらの要素を両立した光学系を構築することが可能となり、偏光渦多重通信方式のモード分離・検出工程の本命技術が確立されると期待できる。

上記の背景の下、本研究計画では、光架橋性高分子液晶への偏光ホログラムの多重記録という切り口から、複数種の偏光渦のモードフィルタリング機能を集積化した素子を新規に開発するとともに、偏光渦多重の有線通信へと展開する事を目的とする。光架橋性高分子

光反応性高分子液晶を用いた偏光渦モード検出素子の開発

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal

液晶は申請者らの所属する研究グループ独自の液晶光配向膜であり、複数種の偏光ホログラムを多重記録すると、それぞれのホログラムが独立に動作する素子を形成できるという性質を持つ[4]。このため、光架橋性高分子液晶の性質と偏光渦伝搬制御機能を示す偏光ホログラムとを有機的に組み合わせれば、小型且つ多モード対応の偏光渦分離素子を実現できると期待できる。この研究着想の下、以下の3項目について研究を実施

した。

【1】偏光ホログラム多重記録にもとづく偏光渦モード分離素子の形成

【2】2種の偏光ホログラム多重記録素子の一体化による偏光渦モード完全分離の実証

【3】多重偏光ホログラム一体化素子の検出可能モード数向上のための理論設計

以降、上記3項目について詳細を述べる。

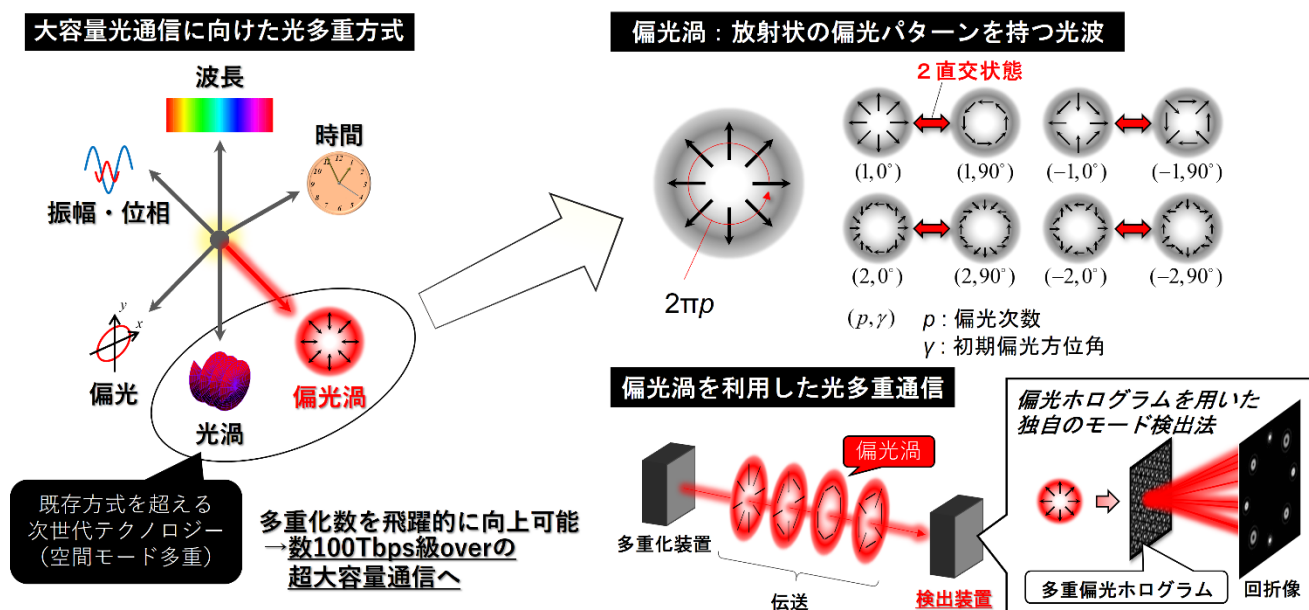


図1 次世代光多重通信に向けた偏光渦多重方式の位置付け。偏光渦の偏光次数ごとの偏光パターンの概略図。光渦多重方式の実現に必要な3工程と、本研究で開発を目指す多重偏光ホログラムを用いた偏光渦モード検出法。

2. 偏光ホログラム多重記録にもとづく偏光渦モード検出素子の形成

まず初めに、光反応性高分子液晶への偏光ホログラムの多重記録という切り口から、複数種の偏光渦モードの分離・検出機能を単一素子に集約化したデバイスの開発を試みた(図2)。光反応性高分子液晶は共同研究者の小野浩司教授と川月喜弘教授が液晶デバイス応用で長年研究してきた独自の光配向材料であり[5]、複数種の偏光ホログラムを多重記録すると、それぞれの偏光ホログラムが独立に動作する素子を形成できる機能を持つ[4]。この機能を活用し、図3に示すように、光架橋性高分子液晶に対して「特定の偏光渦をガウシアン光へ逆変換しながら回折させる機能を持つ多重偏光ホログラム」を複数種多重記録することで、単一素

子で多モード入力に対応した偏光渦のモード検出素子を形成した[6]。ガウシアン光が発生した回折スポットの位置から、モード分離素子に入射する光に含まれる偏光渦成分の偏光次数を同定することができる。作製したモード分離素子の偏光顕微鏡写真とレーザー光を透過させた際の回折像を同じく図2に示す。準結晶と酷似した複雑な液晶配向分布が形成されていることが分かる。また、多重偏光ホログラムの格子ベクトル方向に対して、8つの回折像が発生していることが確認できる。この多重偏光ホログラムを用いて、異なる偏光次数を持つ4種類の偏光渦のモード検出を行った。結果を図2左下部に示す。回折スポット毎に異なる偏光渦モードのシグナルが強く表れていること分かる。この実験結果から、開発したモード分離素子により、

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal

形成素子を用いたモード分離・検出

偏光ホログラムの角度多重記録

材料を回転

偏光ホログラムの角度多重記録で形成された素子

回折パターン

モード分離素子の偏光顕微鏡写真

回折パターン

実証実験

$p=1$

$p=-1$

D_+ C_+ B_+ D_- C_- B_-

A_- 0th A_+ A_- 0th A_+

B_- C_- D_- B_- C_- D_-

に対応する回折方向のみガウシアン光に変換

2種多重偏光ホログラム一体化素子の原理はやや難解であるため、紙面の都合上詳細は筆者らの論文に譲ることとし、ここでは本原理の特徴についてまとめる。まず、本原理では2種の偏光ホログラムを貼り合わせることで、光干渉計部の伝播長を零にする事が可能であり、光干渉計でありながら光学系のサイズが素子厚を含めて数ミリ程度で、且つ外乱に対して極めて安定な干渉信号を得ることが出来る。この外乱に対する安定性は、社会実装を目指す上で大変重要な要素である。また、単体の多重偏光ホログラムでは ± 1 次回折光で検出される偏光次数に区別が無く、4つの格子ベクトル(8つの回折スポットが現れる)を持つ多重偏光ホログラムで検出可能な偏光渦モード数は4に制約されていたが、2種多重偏光ホログラム一体化素子では、 ± 1 次光は同一の偏光次数間に存在する2直交モードの区別に割り当てられるため、検出可能な偏光渦モード数は単体のものと比べて2倍に増加する。これも、

光反応性高分子液晶を用いた偏光渦モード検出素子の開発

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal

情報の伝送容量を増やすことを志向する光多重通信において大変有益な特徴である。

実際に2種多重偏光ホログラム一体化素子を作製し、原理の有効性を検証した。図3は、作製した2種の多重偏光ホログラムそれぞれの偏光顕微鏡写真と実験光学系、偏光渦モード検出の実証実験結果である。多重偏光ホログラムは波長1550nmで所望の回折効率が得られるように作製した。光源に波長1550nmの半導体レーザーを用い、q-plateと呼ばれる特殊な光学素子を用いて偏光渦を発生させた上で、偏光渦モード検出の実験を行った。図3右部に実験結果を示す。図2の数値計算と同様の回折特性が得られていることが分かる。この結果から、多重偏光ホログラムにより偏光次数と2直交状態を含む完全な偏光渦モード検出が可能であることを実証できた。

4. 多重偏光ホログラム一体化素子の検出可能モード数向上のための理論設計

光多重通信への応用を指向するにあたり、さらなる検出可能モード数の拡大は必須の課題である。続けて、4種類を超える偏光渦モードを同時分離する2種多重偏光ホログラム一体化素子を理論的に設計した。本設計では、2種多重偏光ホログラムに要求される位相パターンの理論式を独自に導出し、その理論式に基づいて設計した[9, 10]。図4は偏光次数が ± 1 、 ± 2 、 ± 3 、 ± 4 の計16モード検出を可能とする2種多重偏光ホログラムの液晶配向分布を示したものである。図3の4モード対応の多重偏光ホログラムとは異なるパターンを有していることが分かる。図4の液晶配向分布を持つ2種多重偏光ホログラム一体化素子に偏光次数1の偏光渦を入射した際の回折光の数値シミュレーション結果を図4右部に示す。等しい半径距離に16個の回折スポットが生じており、ある一か所のみ gaussian 光が発生していることが確認できる。このことから、2種多重偏光ホログラム一体化素子の設計に必要な理論式の導出に成功するとともに、より多モードの

偏光渦多重状態の検出が可能な偏光ホログラムを実現できることを示すことに成功した。

4種の偏光渦モードの検出が可能な2種一体化偏光ホログラム素子を用いて、簡易的に偏光渦モードスペクトル計測装置を試作した。図5は試作した偏光渦モードスペクトル計測装置の外観写真である。図5に示した波長1550nm用の2種多重偏光ホログラム一体化素子を用いており、モード分離素子で空間的に分離された4つの回折光を、微動ホルダーにマウントされた4つのシングルモードファイバに結合させる形態を取っている。4つのシングルモードファイバを、マルチチャンネル光パワーメータに接続し、同時に4つのモード検出信号を測定できるようにした。現在は装置構成を組み上げる段階の留まっており、実際の動作実証には至っていない。これについても今後継続して開発を進めて行く。

5. 将来展望

16モードの偏光渦を同時に分離可能な偏光ホログラムについて、現時点で実証実験には至っていないが、既に偏光ホログラムの作製光学系の改良に着手しており、今後設計した素子の1550nm用での試作を目指す。

被測定光に含まれる偏光渦モードの割合を計測するための偏光渦モードスペクトル計測装置について試作したが、現時点では装置構成を組み上げる段階の留まっており、実際の動作実証には至っていない。偏光渦モードが多重化された状態を生成するための光学系の構築も現在平行して進めており、そちらの光学系との組み合わせにより、偏光渦モードの多重状態の伝送実験へと展開していくことを計画している。無線通信・有線通信の双方において、大気揺らぎやファイバ内のひずみ等の影響が偏光渦の多重状態の伝送特性にどのような影響を与えるのかについても併せて調査したい。これらの研究を進めることで、将来的に偏光渦の多重通信を実用化に貢献したいと考えている。

光反応性高分子液晶を用いた偏光渦モード検出素子の開発

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal

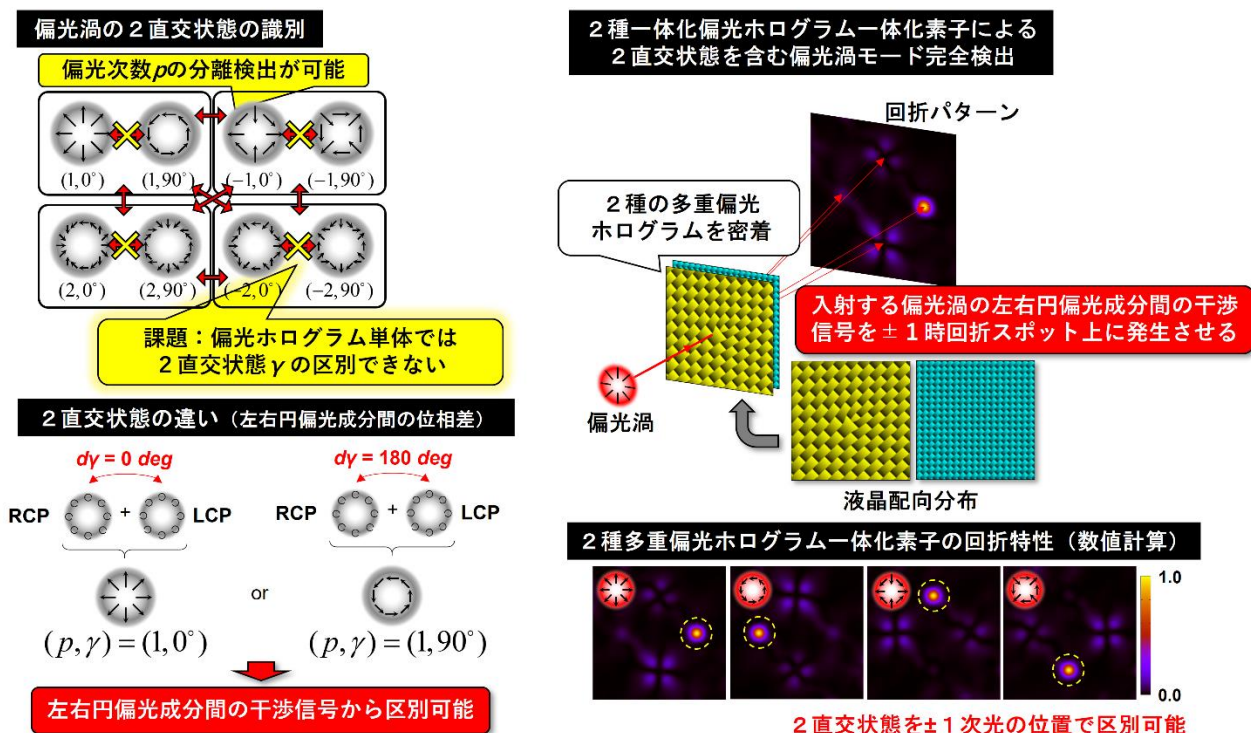
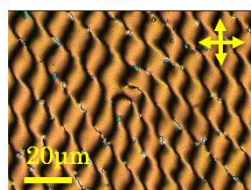


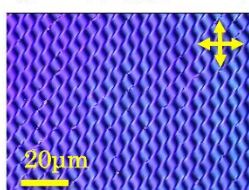
図3 偏光渦の同一次数に存在する2直交状態と、その識別における課題。2種多重偏光ホログラム一体化素子による2直交状態を含む偏光渦モード完全検出の概念図と数値計算による動作確認

作製した2種の多重偏光ホログラム

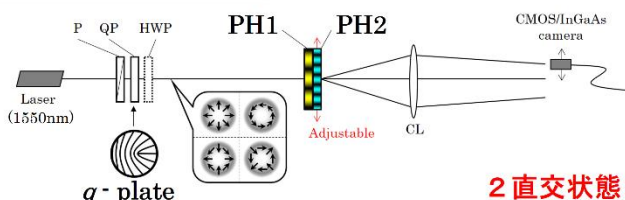
第1の多重偏光ホログラム



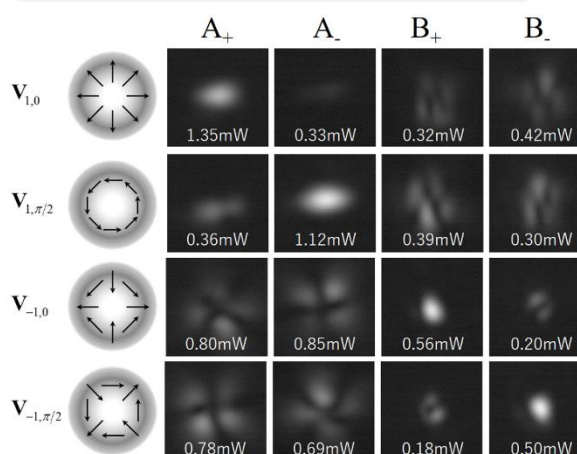
第2の多重偏光ホログラム



実証実験の光学系



偏光渦モード完全検出の実証実験結果



2直交状態を含む偏光次数 ± 1 の偏光渦モードの検出に成功

図4 2種多重偏光ホログラム一体化素子を用いた偏光渦モード完全検出の実証実験

光反応性高分子液晶を用いた偏光渦モード検出素子の開発

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal

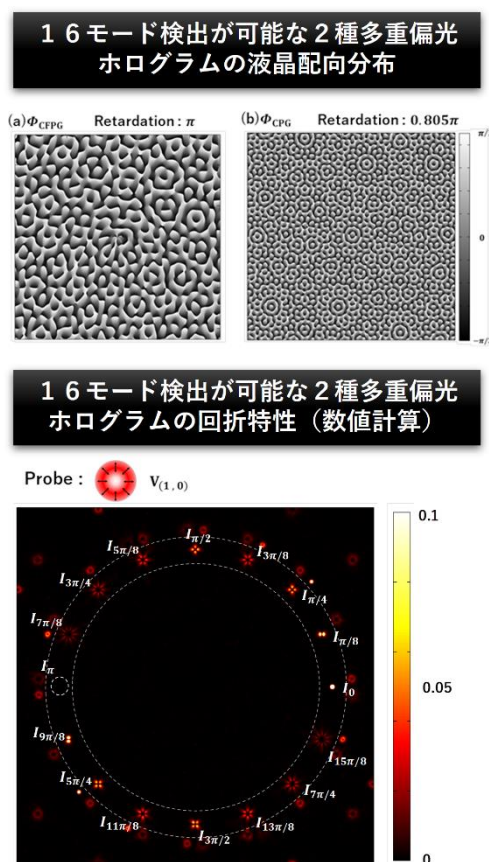


図4 16モードの偏光渦を検出可能な2種の多重偏光ホログラムの液晶配向分布。設計した2種多重偏光ホログラム一体化素子の回折特性（数値計算）

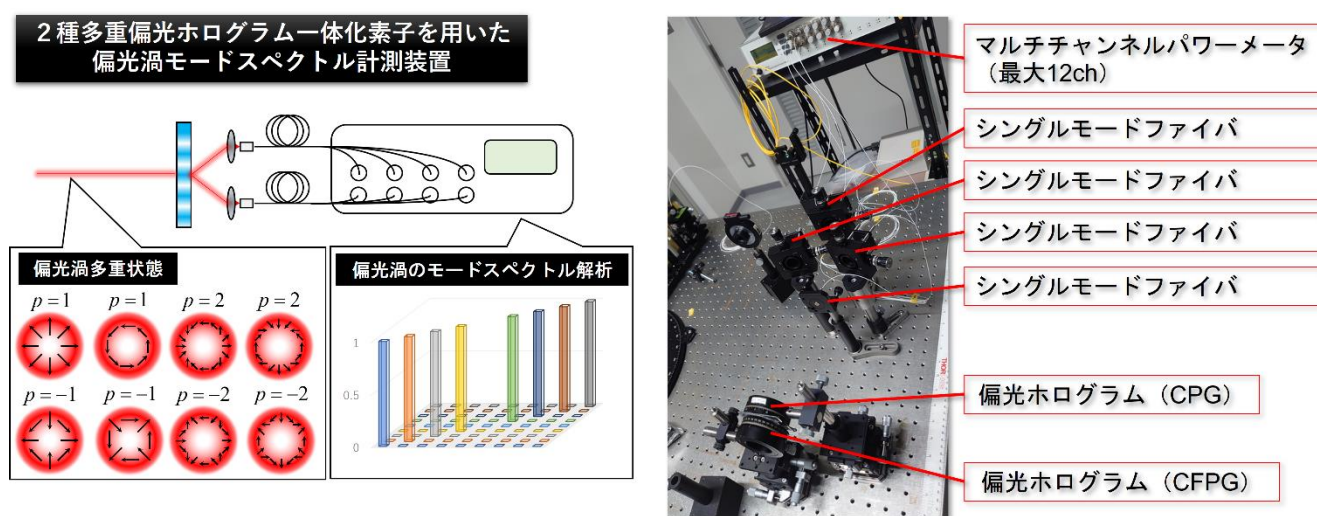


図5 偏光渦多重通信応用を目指した、偏光渦モードスペクトル計測装置の概略図と、試作装置の外観写真

光反応性高分子液晶を用いた偏光渦モード検出素子の開発

Development of polarization vortex mode detection element using photoreactive polymer liquid crystal

おわりに

今回の研究において、2直交状態を含む複数の偏光渦モードの同時検出が可能な2種多重偏光ホログラム一体化素子を提案するとともに、4モードの偏光渦の検出についてその原理の有効性を示すことに成功した。今後の方針としては、まずは4モードの偏光渦を検出可能な装置を試作する。これに成功したら、偏光渦の自遊空間中及び導波路中の伝送実験と、その際のモード検出実験へと展開する。通信用途に限らず、現在我々が研究を進めている、偏光渦を用いたファイバセンシング技術への適用も検討したい。さらに、今回設計した16モードの偏光渦検出素子を試作し、偏光渦モード検出装置の更なる高性能化に挑戦することを予定している。今回の研究成果とその将来展望の実現により、偏光渦を用いた光多重通信やファイバセンシング技術の実現に至れるよう継続して努力して参りたい。

用語解説

- *1 偏光渦：ビームの断面内に偏光の空間分布を有する特殊な光ビームを指す。ビーム断面内で一様な偏光分布を有する通常の光ビームに対して、集光特性等で特異な性質を示すことで注目されている。
- *2 モード多重通信：互いに直交関係を満たす光の伝播モードを多重化することで、一度に伝送できる情報量を増やす通信方式。その他の多重通信方式に波長多重・偏光多重が挙げられる。
- *3 モードスペクトル：1つのビーム中に光の各伝播モードがそれぞれどれだけの割合で含まれているかを分析したもの。光モードの純度評価や、モード多重通信での情報のデコードに必要な情報となる。
- *4 偏光ホログラム：光学異方性が空間的に且つ周期的に変調された光学素子。通常のホログラムに比べて回折特性に強い偏光依存性を示す。異方性の空間分布に応じて、偏光渦などの偏光空間分布を有する光波を発生できる。

参考文献

- [1] J. Liu et al, Light: Sci. Appl. 7, 17148 (2018).
- [2] G. Milione et al., Opt. Lett. 40, 1980 (2015).
- [3] S. Zheng et al., Photonics Res. 6, 385 (2018).
- [4] H. Ono et al., Thin Solid Films 516, 4178 (2008).
- [5] N. Kawatsuki, K. Goto, T. Kawakami, and T. Yamamoto, Macromolecules 35, 706 (2002).
- [6] M. Sakamoto et al., Appl. Phys. Lett. 115, 061104 (2019).
- [7] M. Sakamoto et al., Proc. SPIE 11472, 114720Q (2020).
- [8] M. Sakamoto et al., Optics Express 29, 27071-27083 (2021).
- [9] 掛戸優志 et al., 第82回応用物理学会秋季学術講演会, 12a-N107-2, オンライン(2021.9.12).
- [10] 掛戸優志 et al., 第83回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-A202-7, 仙台(2022.9.20).

この研究は、令和元年度S C A T研究助成の対象として採用され、令和2～4年度に実施されたものです。