

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14789

研究課題名（和文）液晶光配向材料への偏光ホログラム多重記録を用いた偏光渦モード分離・検出素子創製

研究課題名（英文）Development of polarization vortex beam mode demultiplexer by use of liquid crystal polarization hologram

研究代表者

坂本 盛嗣（Sakamoto, Moritsugu）

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60757300

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、液晶光配向材料への偏光ホログラム多重記録に基づいて、小型且つ多モード入力に対応可能な、偏光渦モード分離・検出素子を新規に提案・開発する事であった。第1の成果は、多重偏光ホログラム素子の回折効率の向上である。第2の成果は2種の偏光ホログラム素子を一体化させることで、偏光渦に存在する2つの直交モードを分離可能とする新原理を発明したこと。第3の成果は、第2の成果を更に多重偏光ホログラム素子へと発展させ、4つの偏光渦モードを同時分離可能であることを実証したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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、偏光渦の多重化状態をモード毎に分離・検出する工程が必要不可欠となるが、その技術開発は未だ本命手法が確立していない未成熟領域にある。本研究で得られた成果は、小型且つ多モード入力に対応可能な潜在能力を有する偏光渦のモード分離装置の実現するために、独自の光配向技術を駆使した偏光渦の新規なモード分離技術の開発を行った点に学術的意義を有する。また、偏光渦モード分離は、偏光渦の光多重通信応用を実現する上で必須の要素技術であり、次世代の光通信技術に貢献し得る成果である点に社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to propose and develop a new polarized vortex mode separation/detection element that is compact and can support multi-mode input based on the multiple recording of polarized holograms on the liquid crystal alignment film. The first achievement is the improvement of the diffraction efficiency of the multiply polarization hologram. The second achievement is the invention of a new principle that makes it possible to separate the two orthogonal modes existing in the polarization vortex by combining two types of polarization holograms. The third achievement is to extend the second result into multiple polarization holograms and demonstrate that the four polarized vortex modes can be separated simultaneously.

研究分野：応用光学

キーワード：偏光渦 液晶偏光回折素子 光多重通信 モード分離 光配向

### 1. 研究開始当初の背景

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大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べく、モード分割多重(Mode Division Multiplexing: MDM)方式が近年注目を集めている。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【J. Liu et al, Light: Sci. Appl. 7, 17148 (2018)】、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必要な「多重化」、「伝送」、「分離・検出」の 3 工程の内、特に偏光渦のモード分離・検出工程は未だ本命技術が確立していない現状にある (図 2)。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【G. Milione et al., Opt. Lett. 40, 1980 (2015)】、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【S. Zheng et al., Photonics Res. 6, 385 (2018)】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単一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。通信用途である以上、モード分離・検出の為に光学系の小型化・対応モード数の増大化は必須の要素であり、もし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。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、偏光渦多重通信の実装に要求される小型且つ多モード入力に対応可能な検出システムを実現するために、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することである。申請者らはこれまでの研究で、光架橋性高分子液晶と呼ばれる研究グループ独自の光配向材料に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事を明らかにしている【H. Ono et al., Thin Solid Films 516, 4178 (2008)】。このため、この材料の性質と偏光ホログラムの特性とを有機的に組み合わせれば、上記「問い」に答え得る偏光渦のモード分離・検出素子を創製できると期待できる。そこで本研究では、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、上記の要求を満足する新規なモード分離・検出素子を創製する事を目的に研究を実施した。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、以下の方法により研究を実施した。

#### (1) 偏光ホログラム多重記録を用いた偏光渦分離素子形成及びその高効率化

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分離・検出素子の形成を形成する (図 1)。本研究期間開始前の時点で、既に 4 種類の偏光ホログラムを多重記録した場合で偏光次数が ±1 及び ±2 の計 4 種類の偏光渦を検出できることを明らかにしていたが【M. Sakamoto et al., Appl. Phys. Lett. 115, 061104 (2019)】、その回折効率は 4%に満たなかった。そこで、露光条件の再検討と、材料の再選定により高効率化を試みた。

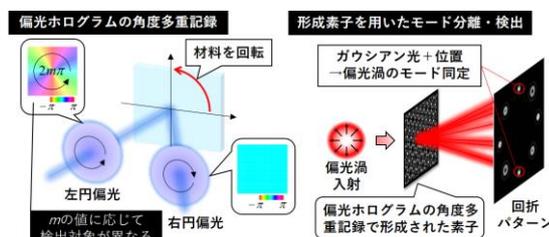


図 1 光架橋性高分子液晶への偏光ホログラムの角度多重記録、及び形成素子により偏光渦のモード分離・検出

(2) 2種の偏光ホログラムを利用した、偏光渦モード完全分離

偏光渦には同一次数においても互いに直交性を有する2状態（例えば、径偏光と方位偏光）が存在する（図2）。しかし、上記のモード分離素子の機能では、次数毎の分離検出は可能であるものの、同一次数内の2状態を分離検出することができない。この2直交モードを分離検出できれば、偏光渦多重通信で扱える情報量を2倍に出来る。2直交モードの違いを検出する方法の一つは、偏光渦を構成する左右円偏光成分間の干渉信号を観測することである。そこで、同一次数の偏光渦に存在する2直交モードを検出するために、マッハツェンダー干渉計と等価な作用をもたらす2種類の偏光ホログラムの一体化素子による偏光渦モード検出法を新たに提案した。なお、当初計画では光ファイバ干渉計を利用することを考えていたが、実験の結果、光ファイバの偏光に対する消光比が測定精度に影響することが分かり、上記手法はその代替法として新たに考案したものである。

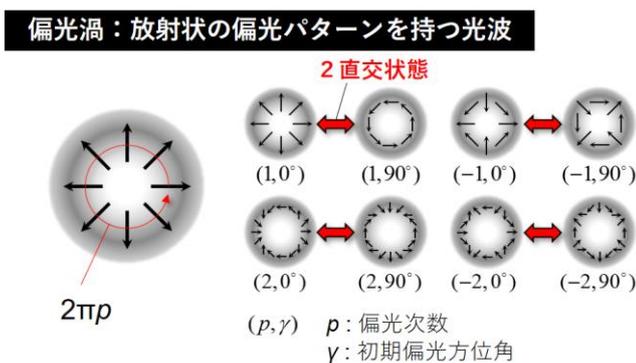


図2 偏光渦の偏光次数と2直交状態

図3は2種の偏光ホログラムを利用して同一次数の偏光渦に含まれる2直交モードを検出する光学系の概略図である。2種の偏光ホログラムはフォーク型偏光ホログラムと1/4波長偏光ホログラムの2層構造で構成される。第1層目のフォーク型偏光ホログラムは入射する偏光渦を構成する左右円偏光成分のトポロジカルチャージを何れも零に変換すると同時に、±1次光方向へ空間的に分離する機能を担う。第2層目の1/4波長偏光ホログラムは、フォーク型偏光ホログラムで分離された±1次光を更に2光波に分離し、±1次光方向で偏光渦を構成する左右円偏光成分の干渉信号を発生させる。これにより、偏光渦の同一次数に存在する2直交モードの完全分離を実現できる。2種の偏光ホログラムが完全に密着しているとき、干渉する2光波は共通する光路を伝搬することとなり、得られる干渉信号が外乱に対して極めて安定で、且つ光学系を大幅に小型化出来る。また、本原理を多重偏光ホログラムの発想へと拡張すれば、複数の偏光渦次数に同時に対応できるようになる。

図3は2種の偏光ホログラムを利用して同一次数の偏光渦に含まれる2直交モードを検出する光学系の概略図である。

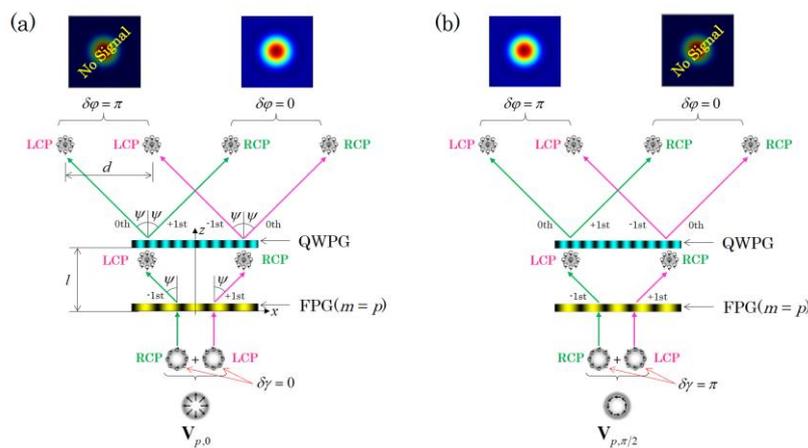


図3 2種の偏光ホログラムを利用した同一偏光次数の偏光渦における2直交状態の分離法の原理。FPGとQWPGは、それぞれフォーク型偏光ホログラムと1/4波長偏光ホログラムを表す。

4. 研究成果

(1) 偏光ホログラム多重記録を用いた偏光渦分離素子形成及びその高効率化

光架橋性高分子液晶への偏光ホログラムの露光条件を変えて、回折効率の高効率化を試みた。その結果、所望のスポットへの合計の回折効率を43%程度まで改善することができた。しかし、この回折効

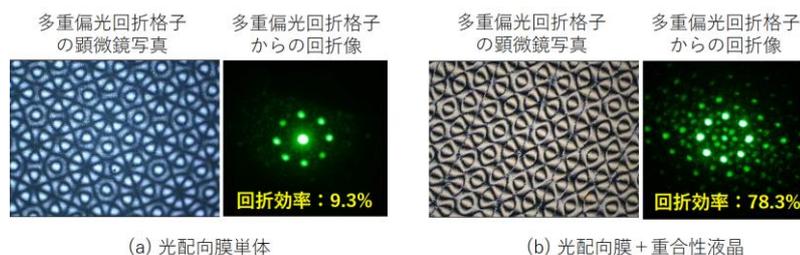


図4 光架橋性高分子液晶単膜で作成したモード分離素子の偏光顕微鏡写真と回折像。(b) 光架橋性高分子液晶+重合性液晶で作成したモード分離素子の偏光顕微鏡写真と回折像。

率の値ではモード分離素子として使うにあたってはSN比の観点から十分な値とは言えず、更なる改善が必要であった。そこで、光架橋性高分子液晶膜と重合性液晶膜を組み合わせたプロセスを新たに試したところ、先の研究で発生していた0次光の発生を3%未満と大幅に抑制するとともに、所望のスポットへの合計の回折効率を78%まで向上させることに成功した(図4)。また、重合性液晶の膜厚を調整することで、通信帯域である1550nm用で高回折効率を得られる偏光渦モード分離素子についても作製することに成功した。

(2) 2種の偏光ホログラム一体化素子を利用した偏光渦モード完全分離

2種の偏光ホログラム一体化素子では、干渉する2光波間の位相差を、2素子間の相対的な位置関係で制御できる。これは、幾何学的位相に基づくものである。そこでまず、2素子間の相対位置に対する±1次光の回折効率を、径偏光と方位偏光の入射に対してそれぞれ解析した。図5は2種の偏光ホログラム一体化素子における、2素子間の相対位置関係に対する回折効率を数値シミュレーションで計算した結果である。このグラフから、2素子間の相対位置をフォーク型偏光ホログラムの格子周期の1/8とすることで、2直交状態を完全分離できることが分かった。この原理については、別途解析解を導出しており、解析解からも同様の相対位置関係の条件を導き出すことができている。更に、2種の偏光ホログラムをそれぞれ試作し、実証実験を行った。図6は実証実験の結果である。光源には波長532nmのNd:YAGレーザーを用い、2種の偏光ホログラムは同波長用にそれぞれ作製した。図6の結果から、偏光次数が+1の2直交状態に該当する径偏光と方位偏光を±1次光としてそれぞれ分離出来ていることが分かる。前述した通り、同原理は干渉する2光波が共通光路を伝播するため、外乱に対して極めて安定な干渉信号を得ることができる。以上のことから、2種の偏光ホログラムの一体化素子により、偏光ホログラム単体では困難であった2直交状態の分離・検出が可能となった。

上記の手法により、単一素子(2種の偏光ホログラムを一体化した素子)により2直交状態のモード分離・検出が可能となったが、通信用途を想定するのであれば高次の偏光次数についても一括し

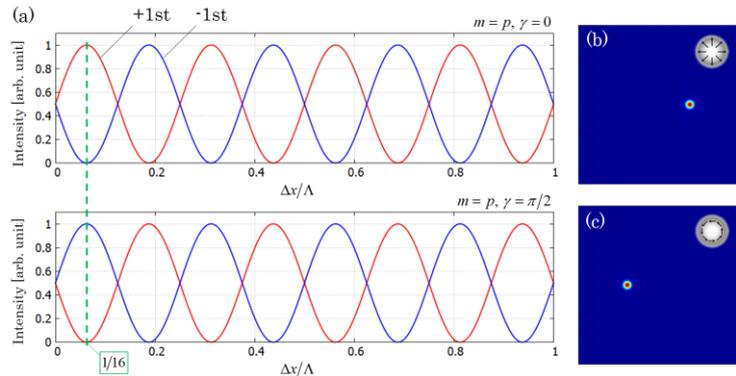


図5 2種の偏光ホログラム一体化素子における、2素子間の相対位置関係に対する回折効率の依存性

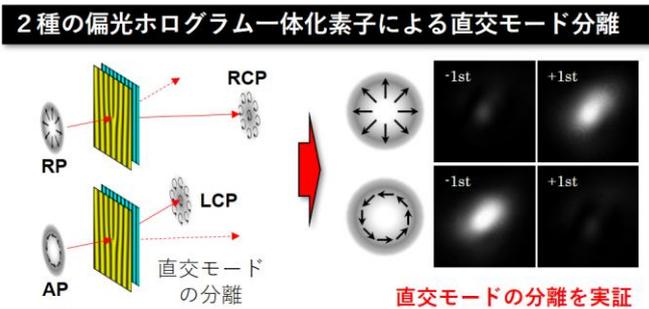


図6 2種の偏光ホログラム一体化素子による、径偏光と方位偏光の分離実験

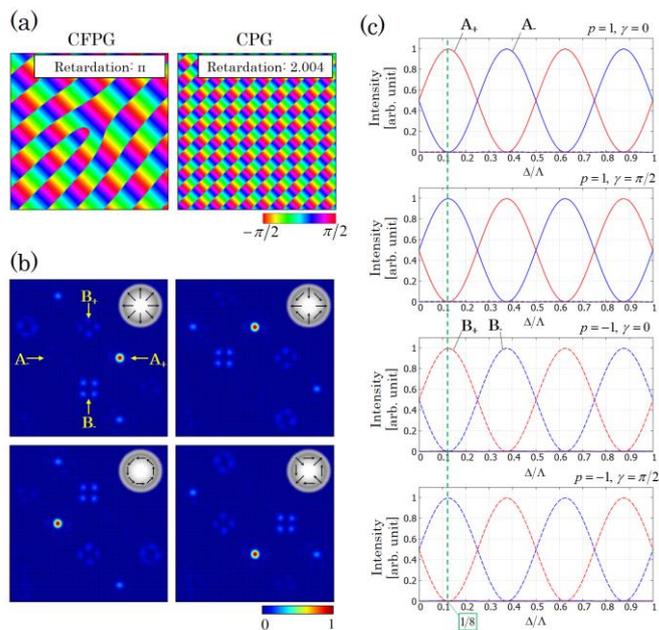


図7 2種の多重偏光ホログラム一体化素子の液晶配向分布と回折特性の解析結果

て検出できることが望まれる。そこで、上述の原理を異なる偏光次数を含む複数種の偏光渦モードの分離・検出へと拡張するための検討を行った。基本的な考え方は、偏光ホログラムを多重偏光ホログラムへと代替するというものである。図7は設計したモード分離素子の液晶配向分布(図7(a))とその回折特性をシミュレーションしたものである(図7(b))。対象となる偏光渦は偏光次数が±1のもので、これに同一次数に存在する2直交状態を含めて4モードの検出が可能かを確認したところ、4種類の偏光渦の入射に対して、それぞれ異なる位置にガウシアン光が回折していることが確認できた。図7(c)は2枚の多重偏光ホログラム間の相対位置関係に対する各スポットにおける回折効率を、入射する偏光渦の状態別にプロットしたものである。図5の場合と同様に、格子周期の1/8だけ相対的に2種の多重偏光ホログラム間の位置をずらすと、モード分離が可能となることが分かった。実際に2種の多重偏光ホログラムを作成し、実証実験を行った。図8は作製したフォーク型多重偏光ホログラムと、通常

の多重偏光ホログラムの偏光顕微鏡写真である。いずれも、波長1550nmで所望の回折効率を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、軸対称偏光素子を用いて偏光渦を生成したうえで、偏光渦のモード分離の実験を行った。図8に実験結果を示す。数値シミュレーションと同様の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分離が可能であることを実証できた。

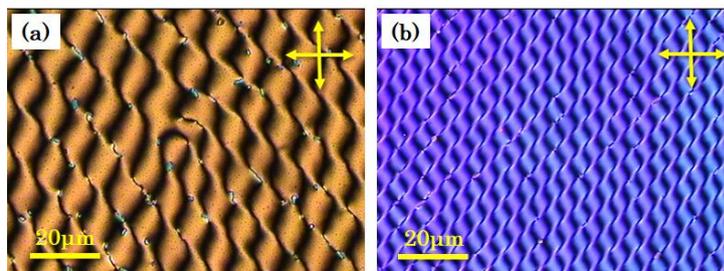


図8 多重偏光ホログラムの偏光顕微鏡写真。(a) フォーク型多重偏光ホログラム、(b) 多重偏光ホログラム。

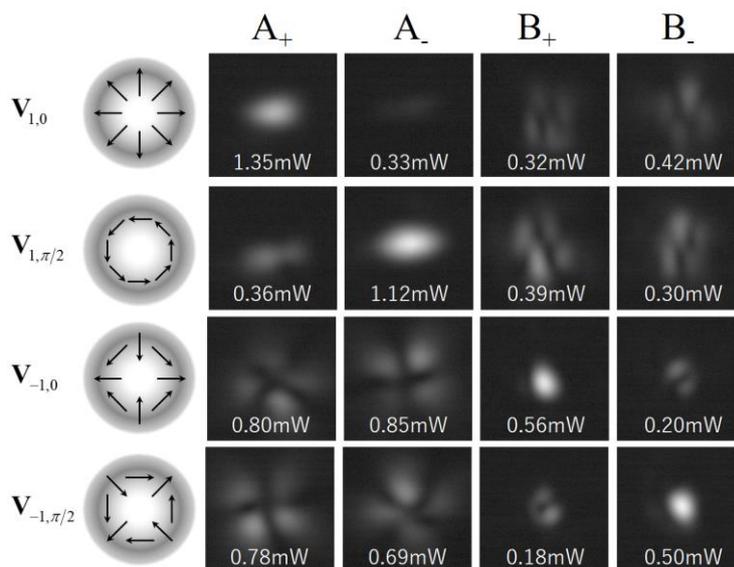


図9 2種の多重偏光ホログラム一体化素子によるモード分離の実証実験の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Sakamoto, H. T. Nhan, K. Noda, T. Sasaki, T. Kamei, T. Sakai, Y. Hattori, N. Kawatsukim and H. Ono	4. 巻 60
2. 論文標題 Polarized beam steering by use of multiply cascaded rotating polarization gratings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Opt.	6. 最初と最後の頁 2062-2068
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.416089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Sakamoto, Y. Kaneko, Y. Higa, K. Noda, T. Sasaki, M. Tanaka, N. Kawatsuki, and H. Ono	4. 巻 11472
2. 論文標題 Vector beam demultiplexing via a crossed-fork shaped polarization grating fabricated by using photocrosslinkable polymer film	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 114720Q
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2568902	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Sakamoto, Y. Kaneko, Y. Kakedo, K. Noda, T. Sasaki, M. Tanaka, T. Sakai, Y. Hattori, N. Kawatsuki, and H. Ono	4. 巻 29
2. 論文標題 Hybrid polarization grating for mode detection of vector beams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27071-27083
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.433998	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 坂本盛嗣, Nuyhn Thanh Nhan, 野田浩平, 佐々木友之, 亀井理祥, 酒井丈也, 服部幸年, 川月喜弘, 小野浩司
2. 発表標題 複数の回転偏光回折格子を利用したビームステアリング
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野浩司, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘
2. 発表標題 偏光回折素子を用いた偏光センシング
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Khoi Minh Huynh, Moritsugu Sakamoto, Kohei Noda, Tomoyuki Sasaki, Nobuhiro Kawatsuki, Hiroshi Ono
2. 発表標題 Polarization grating with orthogonal linear polarization separating function
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子裕亮, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 田中雅之, 川月喜弘, 小野浩司
2. 発表標題 フォーク型偏光回折格子と $1/4$ 偏光回折格子を用いた方位偏光・径偏光モード分離
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Sakamoto, Y. Kaneko, Y. Higa, K. Noda, T. Sasaki, M. Tanaka, N. Kawatsuki, and H. Ono
2. 発表標題 Vector beam demultiplexing via a crossed-fork shaped polarization grating fabricated by using photocrosslinkable liquid crystal polymer film
3. 学会等名 SPIE Organic Photonics + Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 比嘉悠介, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 田中雅之, 小野浩司
2. 発表標題 偏光渦を用いたファイバセンシングの理論的検討II
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 掛戸優志, 坂本盛嗣, 金子裕亮, 野田浩平, 佐々木友之, 田中雅之, 酒井丈也, 服部幸年, 川月喜弘, 小野浩司
2. 発表標題 クロスハイブリッド偏光回折格子によるベクトルビームモード検出
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 岡和彦, 川月喜弘, 小野浩司
2. 発表標題 Dammann-放射状波長板を用いたリング状光格子アレイの生成
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 ビームステアリング装置及びビームステアリング方法並びにビーム検出システム	発明者 坂本盛嗣, 小野浩司	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-015345	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光線走査広角化システム	発明者 坂本盛嗣, 小野浩司	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-100700	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光測定装置	発明者 坂本盛嗣, 小野浩司, 野田浩平, 田中雅之	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022-018897	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------