

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05069

研究課題名(和文) 光波のハイパースペクトラル制御を用いた超短光パルス時空間制御装置の開発

研究課題名(英文) Spatio-temporal control of ultrashort optical pulses based on hyper-spectral control of light waves

研究代表者

山根 啓作 (Yamane, Keisaku)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50447075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：サニャック干渉計型光学配置及び空間光変調器を用いた独自の光波変換装置を開発し、高効率かつ高い自由度で光波の時空間制御が可能な装置を開発した。本装置により、超短パルス光のビーム断面の強度分布を 1. 方位方向、2. 動径方向、3. 1次元方向など、様々なパターンにおいて、ピコ秒域という超短時間域で自在に超高速制御することに成功した。また、本技術の高い柔軟性を応用することで光の偏光状態をピコ秒域で制御することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、光渦に代表される空間制御された光波が注目を集めており、光マニピュレーション、レーザー加工など多岐に渡る分野へ応用されている。本研究開発は空間制御技術と超高速技術との融合によって達成された全く新しい技術であり、光波状態の制御周波数は従来技術に比べ3桁以上高く最大THz域にも達する。その高速性、自在性により、上記応用の著しい高速化に加え、準粒子の超高速制御、空間制御されたTHz波の発生など多岐にわたる新しいアプリケーションを創生する基礎技術として期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed a novel high efficiency converter for spatio-temporal control of ultrashort optical pulses based on a Sagnac-interferometer-type configuration. Thanks to flexibility of a spatial light modulator, ultrafast controls of the beam profiles were demonstrated in picosecond regime in various directions such as azimuth, radial, linear directions. Furthermore, ultrafast controls of polarization states were also employed by applying our unique technique for spatio-temporal control of ultrashort optical pulses.

研究分野：超高速光エレクトロニクス

キーワード：超高速時空間制御 チャープ 超短光パルス 空間光変調器

1. 研究開始当初の背景

現在、超短光パルスは理化学応用のみならず、工業、医学などの分野でも広く用いられている。そうした超短パルス光の多くは、時間/周波数的には制御されていても空間的にはガウシアンのような比較的単純な分布を持つものが利用されてきた。一方で近年、光渦に代表されるような積極的に空間制御された光波がその特異な性質(ドーナツ状の強度分布、軌道角運動量を有するなど)から注目を集めており、光マニピュレーション、レーザー加工、超高分解能顕微鏡(STED)など多岐に渡る分野へ応用されている。こうした光波の空間制御技術は、上述の超高速技術との融合により、半導体励起子に対する超高速分光、空間分割多重による高速通信の大容量化など応用の幅を広げており、その重要性を増しつつある。

研究代表者らはこうした両者の融合による時空間制御技術に注目し、数サイクル超短光渦パルスの発生に世界で初めて成功するなどの先進的な成果を上げてきた。しかしながら、研究代表者らの研究をはじめ、従来研究の多くは基本的に時間/周波数と空間領域の制御を独立に行うものであり、それらの結合を積極的に行うという発想はほぼ存在しなかった。

研究代表者らは、周波数チャープを持つ光渦パルスの重ね合わせを利用することにより、光の断面強度分布を、ピコ秒オーダーという超短時間域で回転させることに世界で初めて成功した[1]。これは光波の時空間制御のための強力な手段であり、励起子ポラリトンなどの準粒子の高速空間制御など新たな分野への応用が期待できる。その一方で、従来手法で実現可能な状態は干渉させる光波の状態数に依存するため、必ずしも自在な時空間結合制御を実現できるわけではない。光波を時間/周波数領域及び空間領域において細分化して取り扱うことでより柔軟かつ多彩な状態制御を実現することが可能となる。これは近年バイオやリモートセンシングなどで注目を集めるハイパースペクトラルイメージングにおける所謂データキューブ(光のデータを空間及び周波数の関数として展開したもの)に対応している。研究代表者はこの発想を光波制御に用いることでほぼ任意の時空間制御が可能装置が開発できると考えた。

2. 研究の目的

超短光パルスの時空間結合状態を自在に制御する装置の開発を行うことを目的とする。本研究では空間光変調器を用いた光波の空間状態の自在な制御技術、及び光パルスのチャープ制御など超高速技術を駆使することで、サブピコ秒～サブナノ秒の超短時間域におけるビームの回転制御にとどまらない多彩な超高速光波制御を実現する。

3. 研究の方法

上述の多彩な光波制御を実現するには、まず光波の各周波数成分を低歪みで離散化し、空間的に分離することが必要となる。そのためには、周波数領域で広い周波数コムの間隔を有する、高繰り返し超短光パルスを光源として用いることが有効である。当初、本研究では繰り返し周波数が GHz 域の超短パルスレーザーを開発し、その高い繰り返し周波数に起因する、分離性の良い光周波数コムの1つ1つを自在に制御することを想定していた。しかしながら、開発したパルスレーザーのもつ光周波数コムのコントラストが想定よりも低いためにコム同士の分離性が悪く、当初のプラン通りにコム毎に制御を行うことが困難であるということがわかった。そこで、我々の先行研究[1]において実証した、チャープパルス対を用いた手法をベースに光波の時空間制御を自在かつ高精度に行う手法の追及を平行して進めることとした。

強く線形チャープを与えられた超短光パルスにおいては図 1 のようにその瞬時周波数は時間的に線形に変化する。このパルスを2つに分けて時間遅延を与え、それぞれに別々の空間変調を与えた後に合波させる。出射光にはそれら 2 光波の干渉パターンが現れるが、これら 2 光波の間にはほぼ一定の瞬時周波数差が存在することから、その差の周波数(ビート周波数)で強度パターンが変調されることになる。本手法では特段の能動的な制御を行っているわけではなく、超短光パルスの広い帯域幅を利用することによる能動的な制御を行っていることに大きな特徴があり、従来法では不可能であった THz 域の制御周波数を可能にする。

我々はまず *q*-plate と呼ばれる偏光変換に基づく光渦変換素子を用いて光波の超高速時空間制御実証実験を行い[1]、さらに光波状態の制御性の向上を図ってコンピュータ制御ホログラム (CGH) を利用した柔軟な光波変換法の利用[2]へと研究を進めてきた。しかし CGH を用いた光波変換は元

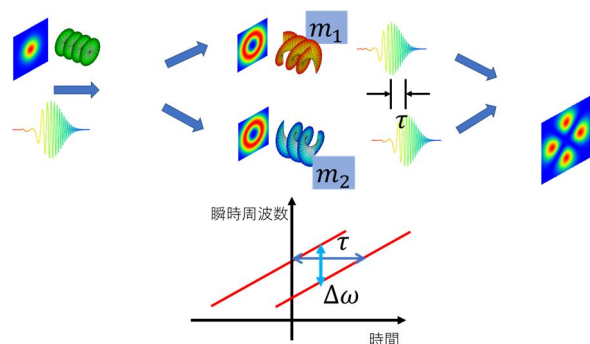


図 1. チャープパルス対を用いた時空間制御の概念図。

来回折効果に基づいておりその回折効率は低い。最終的には光波の変換効率は数%と非常に低い値に制限され、そのままでは光マニピュレーションやレーザー加工などへの応用は困難であるという問題点があった。そこで我々は発生させた時空間制御光波をマルチパス増幅によって高強度化を試み、サブ mJ レベルの高強度化に成功した [3]。しかし発生させた光波の強度パターンが比較的複雑であったことから、収差などの影響を極めて受けやすく増幅の過程で光波に著しいビーム品質の低下が生じるという問題があった。そこで我々はビーム品質を低下させる光波増幅を用いることなく、高強度かつ高品質な光源に対して高効率にモードを行う手法を採用することとした [4]。

図 2 に我々が構築したサニャック干渉計型光波変換器の概略図を示す [4]。強く線形チャープを受けた入射光パルスは偏光ビームスプリッタ (PBS) 及び 2 枚のミラー (M) によって同一の光路長を持つ 2 光波へと分離され、ウェッジガラス対によって光路長差を調整された後に空間光変調器 (SLM) によってそれぞれ独立に位相変調を受ける。これらの光波はほぼ同じ光路を逆伝播し再 PBS において直交した偏波状態として合波され、偏光子 (P) によって同一の偏波状態に射影される。2 光波に対する空間的な変調は全く独立に行えることから、従来の強度分布の回転方向の制御のみならず動径方向など様々な自由度にも応用できるという利点がある。我々の先行研究では CGH における回折効果を用いて光波変換を行っていたが、本構成では位相変調のみを用いているため回折による損失はほぼなく原理上最大 50% 程度の非常に高い変換効率が期待できる。また、研究成果の項目で述べるが、偏光の異なる 2 光波の重ね合わせを利用することで、偏光状態の超高速制御も実現することが可能となる。

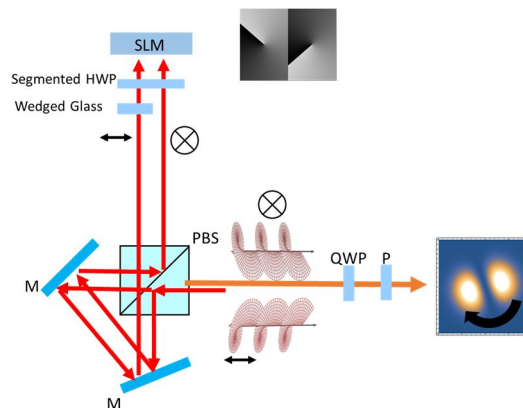


図 2. サニャック干渉計型光学配置を用いた時空間制御光波発生器。

4. 研究成果

光源としては Ti:sapphire 再生増幅器の出力 (中心波長 800 nm, 繰り返し周波数 1 kHz) を用いた。出射パルスはパルスストレッチャーによって約 130 ps までパルス幅を伸長され、上述のサニャック干渉型装置によって変換される。光波状態の時間的な遷移はピコ秒域と非常に高速であるため、パルス幅 ~ 50 fs の参照光パルスとの和周波発生を用いた時間分解計測を行った。トポロジカルチャージ m の異なる 2 光波 ($m = \pm 2$) の重ね合わせによって時空間制御光波を発生させた場合の実験結果を図 3 に示す。トポロジカルチャージ m の異なる 2 光波による周期的な強度分布を持つ光波はリング状光格子と呼ばれており、その構造を保った状態でのサブ THz 域の超高速回転が実際に観測され、その回転周期は約 6.7 ps であることが確かめられた。また、光波の変換効率は約 32% となり、先行研究に比べ約 10 倍程度の変換効率を達成することができた。出射光のパルスエネルギーは約 100 μ J であり、レーザーによる金属加工などへの応用が可能となるエネルギーを得ることができた。本装置構成では重ね合わせる 2 光波に対し独立に位相変調を与えることができるため、CGH を用いた先行研究と比べ著しく柔軟性が向上する。トポロジカルチャージは方位角方向のモード次数に対応するが、動径方向のモード次数の重ね合わせを利用することで動径方向に対する強度分布の超高速制御をも実証した (図 4(A))。また、強度分布の変調を与えない単純なガウス分布の 2 光波に対し、互いにわずかな波面の傾きを与えて合波すれば干渉縞が生まれる。それら 2 光波間の位相を本手法による超高速位相変調を用いることで、図 4(B) に示すような 1 次元方向の超高速強度分布掃引をも実現できた。このように本構成を採用することによって強度分布制御の自由度を飛躍的に増大させることに成功した。本技術は微粒子のみならず、準粒子の制御の自由度を向上させるだけでなく、レーザー加工などにおける今までにない特異な微細構造の形成などへの応用が期待できる。

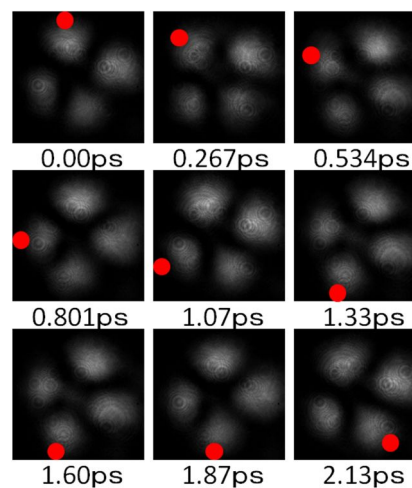


図 3. リング状光格子の超高速回転の時間分解計測結果。

また、本技術を異なる空間モードの重ね合わせでなく、異なる偏光状態の重ね合わせに適用すれば偏光状態を超高速に制御することも可能となる。直線偏光は直交する円偏光状態の重ね合わせとして表現が可能であるが、それら円偏光間の位相差を超高速に制御することで直線偏

光の軸方位を超高速に回転させることができる。実証実験の結果を図5に示す。回転周期は凡そ10 psであり、この光波は直線偏光と円偏光の一種の中間状態と考えることもできる。本手法は偏光に依存した超高速現象の検出及び制御にも応用することができる。

以上、本研究開発で構築した本装置は光波の強度分布のみならず偏光状態をも超高速に制御可能にする今まで存在しなかった実験装置であり、今後新たな研究分野を切り開く可能性を秘めていると考えている。

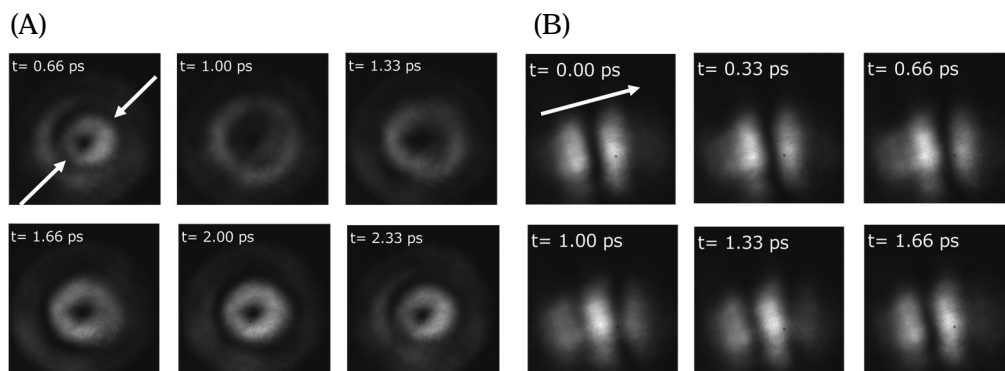


図4. (A).動径方向の超高速強度変調及び(B).一次元方向の超高速強度分布掃引.

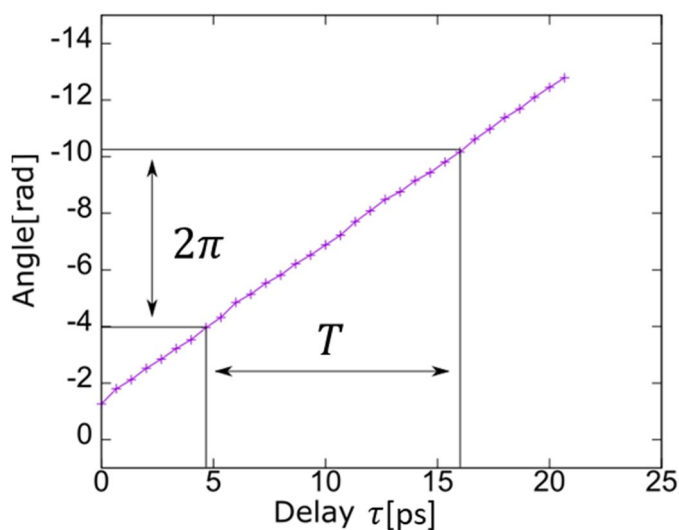


図5. 直線偏光の軸方位の超高速回転. 軸方位の時間依存性を示す.

[参考文献]

- [1] K. Yamane et al., “Picosecond rotation of a ring-shaped optical lattice by using a chirped vortex-pulse pair”, *Opt. Lett.* vol. 41 4597-4600 (2016).
- [2] 山根 啓作, “トポロジカル光波の発生・計測技術”, *電子情報通信学会論文誌 C*, vol.J101-C 509-517 (2018).
- [3] K. Yamane et al., “Generation of intense ultrafast rotating ring shaped optical lattices with programmable control of rotational symmetry”, *Proceedings of Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2017*, TSL17-OMC17-40 (2017).
- [4] K. Yamane et al., “Development of high-efficiency beam converter for ultrafast spatio-temporal control of light waves”, *Proceedings of CLEO/Europe-EQEC Conference 2019*, CF-P.17 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 山根 啓作	4. 巻 J101-C
2. 論文標題 トポロジカル光波の発生・計測技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 509-517
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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25件（うち招待講演 6件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Keisaku Yamane, Kohei Iwasa, Rin Sasaki, Kazuhiko Oka, Yasunori Toda, Ryuji Morita
2. 発表標題 Development of high-efficiency beam converter for ultrafast spatio-temporal control of light waves
3. 学会等名 CLEO/Europe-EQEC Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisaku Yamane, Yuho Watanabe, Kazuhiko Oka, Yasunori Toda, Ryuji Morita
2. 発表標題 Improvement of resolution in orbital angular momentum decomposition based on beam duplication by using a Sagnac interferometer
3. 学会等名 CLEO/Europe-EQEC Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisaku Yamane, Kohei Iwasa, Rin Sasaki, Kazuhiko Oka, Yasunori Toda, Ryuji Morita
2. 発表標題 Efficient generation of intense spatio-temporally controlled light waves
3. 学会等名 The 6th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山根 啓作
2. 発表標題 光波の幾何学的変換に基づくOAMモード分解素子の開発
3. 学会等名 「次世代無線通信技術とフォトニクス」ワークショップ(主催： IEEE MTT-S Kansai Chapter, IEEE PS Kansai Chapter) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田 亜沙美、佐々木 凜、山根 啓作、戸田 泰則、森田 隆二
2. 発表標題 空間モード多重を利用した光波の超高速時空間制御
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根 啓作、渡辺 悠歩、飯塚 健介、戸田 泰則、森田 隆二
2. 発表標題 光波のlog-polar変換を用いた軌道角運動量分解の高精度化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根 啓作、渡辺 悠歩、坂本 盛嗣、小野 浩司、岡 和彦、戸田 泰則、森田 隆二
2. 発表標題 偏光回折素子を用いた高精度 OAM モード分解光学系の検討
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Kakizawa, Kohei Iwasa, Keisaku Yamane, Yasunori Toda and Ryuji Morita
2. 発表標題 Ultrafast spatio-temporal control of light waves by use of a chirped pulse pair
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keisaku Yamane, Yuho Watanabe, Isamu Wakisaka, Kazuhiko Oka, Yasunori Toda and Ryuji Morita
2. 発表標題 Development of high-precision mode decomposition devices for optical vortices
3. 学会等名 Frontiers in Optics/Laser Science Conference (FiO/LS) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根啓作、脇坂勇武、渡辺悠歩、岡 和彦、戸田泰則、森田隆二
2. 発表標題 光波の幾何学的変換を利用したOAM分解素子の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会LQE研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺 悠歩、山根 啓作、岡 和彦、戸田 泰則、森田 隆二
2. 発表標題 光渦の軌道角運動量分解精度向上のための光波複製光学系の開発
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木 凜、岩佐 康平、山根 啓作、戸田 泰則、森田 隆二、岡 和彦
2. 発表標題 チャープパルス対を利用した直線偏光の偏光方位の sub-THz域超高速回転
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 脇坂勇武、渡辺悠歩、山根啓作、岡 和彦、戸田泰則、森田隆二
2. 発表標題 光波の幾何学的変換に基づく光渦の軌道角運動量分解における強度歪み補正
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics&Photonics Japan 2018 (OPJ 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根啓作、岩佐康平、佐々木凜、渡辺悠歩、岡和彦、戸田康則、森田隆二
2. 発表標題 トポロジカル光波の超高速時空間制御
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第39回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島谷 航平、山根啓作、戸田泰則、森田隆二
2. 発表標題 時空間制御光波発生のための高繰り返しファイバーレーザーの開発
3. 学会等名 第54回応用物理学会北海道支部学術講演会、第15回日本光学会北海道支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺 悠歩, 山根 啓作, 岡 和彦, 戸田 泰則
2. 発表標題 OAM モード分解精度向上のための低損失ビーム整形素子の開発
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩佐 康平, 佐々木 凜, 山根 啓作, 岡 和彦, 戸田 泰則, 森田 隆二
2. 発表標題 高効率な時空間制御光波発生装置の開発
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisaku Yamane, Kohei Iwasa, Kohei Kakizawa, Kazuhiko Oka, Yasunori Toda and Ryuji Morita
2. 発表標題 Generation of intense ultrafast-rotating ring-shaped optical lattices with programmable control of rotational symmetry
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山根 啓作, 森田 隆二
2. 発表標題 超短トポロジカル光波の発生・計測と応用
3. 学会等名 超高速光エレクトロニクス(UF0)研究会 第1回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩佐 康平, 柿澤 康平, 山根 啓作, 岡 和彦, 戸田 泰則, 森田 隆二
2. 発表標題 sub-mJ級超高速回転リング状光格子の発生
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山根 啓作
2. 発表標題 トポロジカル光波の発生・計測技術
3. 学会等名 2017年 電子情報通信学会ソサイエティ大会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山根 啓作, 森田 隆二
2. 発表標題 時空間領域における光波制御技術
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2017(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 住吉祥吾, 山根 啓作, 戸田 泰則, 森田 隆二
2. 発表標題 自己参照型干渉法を用いた光渦の小型軌道角運動量分解装置の構築
3. 学会等名 第53回応用物理学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryuji Morita, Masato Suzuki, Keisaku Yamane, Yasunori Toda and Kazuhiko Oka
2. 発表標題 Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses with a broadband spectrum
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山根 啓作、渡辺 悠歩、岡 和彦、戸田 泰則、森田 隆二
2. 発表標題 偏光における幾何学的位相を利用した軌道角運動量分解素子の開発
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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