

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26286056

研究課題名（和文）コヒーレント合成による高強度モノサイクル域トポロジカル光波の発生とその応用

研究課題名（英文）Generation of intense topological light waves in the mono-cycle regime by coherent beam combining and their application

研究代表者

森田 隆二（MORITA, Ryuji）

北海道大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30222350

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000 円

研究成果の概要（和文）：モノサイクル域で軌道角運動量可変な高強度超短光渦パルス（パルスエネルギー 1 mJ超、パルス幅 27fs）の発生に成功し、また、2つの直交偏光光渦パルスをコヒーレントビーム結合させることにより、超広帯域偏光渦パルス（波長帯域750-880 nm）の生成に成功した。さらに、超広帯域偏光渦パルスの偏光対称性、空間的偏光純度に関する精密測定法の開発を行い、その有効性を実証した。また、径偏光超短パルスによる半導体のスナップショット偏光分光実験を行い、この手法の高精度・高感度特性を実証した。

研究成果の概要（英文）：Over 1 mJ pulse intense optical vortex pulses (duration of 27 fs) were generated with programmable topological-charge control. Ultra-broadband polarization vortex pulses (wavelength range of 750 to 880 nm) were successfully synthesized from two orthogonally polarized optical vortex pulses by using coherent beam combining. Moreover, the extended Stokes parameters were newly introduced, enabling one to precisely evaluate polarization symmetry and spatial polarization purity for ultra-broadband polarization vortex pulses. Furthermore, snap-shot polarization spectroscopy through four-wave mixing signals from GaN by use of radially polarized ultrashort pulses was performed, giving high sensitivity and high precision.

研究分野：超高速非線型光学，レーザー物理学，量子エレクトロニクス，トポロジカル光物理学

キーワード：光量子科学 量子エレクトロニクス 高性能レーザー モノサイクル光パルス コヒーレントビーム結合 位相特異性 偏光特異性 トポロジカル光波

1. 研究開始当初の背景

光ビーム断面内に位相特異点や偏光特異点を有する光波(光渦, 偏光渦)をトポロジカル光波と呼ぶ。このようなトポロジカル光波の実験に関しては, 研究代表者のグループを除いて, 連続光もしくは ns, ps のパルスの使用にとどまる状況であり, さらなる超高速光学(アト秒科学)や高強度物理への展開を考えると, 高強度モノサイクル域トポロジカル光波を発生させ, それを応用することが重要となる。

一方, 研究代表者らは, トポロジカル光波としては世界に先駆けて, 光パラメトリック増幅により, 60 μ J, 2.3 サイクル(5.9 fs) の高強度超広帯域(650-950 nm)超短光渦パルス発生に成功した実績を有していた。

2. 研究の目的

本研究は, いままで有効に利用されてこなかった光の持つ位相・偏光の空間的特異性・非一様性に着目し, 申請者らが現在までに独自に開発したモノサイクル域光パルス発生・制御技術, さらには光波コヒーレント合成技術を用いることにより, 1) モノサイクル域トポロジカル光波(光渦・偏光渦)の高強度発生を行うこと, 2) モノサイクル域トポロジカル光波のビーム断面内強度・位相・偏光分布を自在に制御できる手法を確立すること, 3) 上記, 強度・位相・偏光分布制御技術を活かして物質との相互作用の極限時間域空間制御を行うこと, を目的とする。

3. 研究の方法

以下の方法により研究を実施した。

- (1)モノサイクル域トポロジカル光波の高強度発生実験
- (2)超広帯域光渦パルスのコヒーレントビーム結合による超広帯域偏光渦パルスの生成
- (3)超広帯域偏光渦パルスの偏光対称性, 空間的偏光純度の精密測定法の開発
- (4)径偏光超短パルスによる半導体のスナップショット偏光分光実験

4. 研究成果

- (1)モノサイクル域トポロジカル光波(光渦・偏光渦)の高強度発生実験

光渦を生成する際, 空間位相変調器(SLM)が用いられることが多いが, 回折効率が低いことや超広帯域パルスには空間分散をとまなうという問題点がある。そこで本研究では, 前置増幅の後, SLM を含んだ $4f$ -光学系を用いることにより, 空間分散を避け, その後, 主増幅を行うことにより, 低回折効率を補償する光学系を構築し, 軌道角運動量が可変であり超広帯域に適用可能な 1 mJ 超の出力・パルス幅 27 fs 超短光渦パルス発生を実現した。この手法は, SLM のホログラムパターンを変化させるだけで, 容易に光渦の軌道角運動量(トポロジカルチャージ)を制御するこ

とができるという利点を持つ。

図1に発生させた超短光渦パルス(直線偏光)のビーム強度プロファイルを示す。(a), (c), (e), (g)が SLM のホログラムパターンを変化させることにより発生させた, それぞれトポロジカルチャージ $m=0, 1, 2, 3$ の結

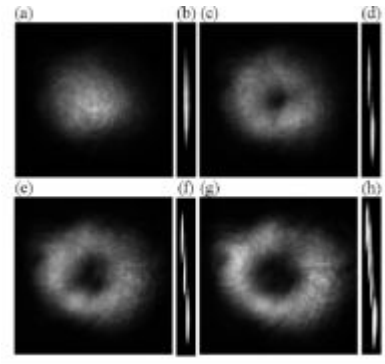


図1 (a) $m=0$, (c) $m=1$, (e) $m=2$, (g) $m=3$ の軌道角運動量自在制御された超短光渦パルスビームプロファイル, (b), (d), (f), (h)の暗線の数が m に対応する。

果である。円柱レンズを通した干渉測定の際の暗線の数が m に対応するので, (b), (d), (f), (h)から確かに所望のトポロジカルチャージが得られていることがわかる。

(2) 超広帯域光渦パルスのコヒーレントビーム結合による超広帯域偏光渦パルスの生成

レーザー増幅に用いられる増幅媒質には, 一般的に増幅利得に偏光依存性が存在する。したがって, 直線偏光の光渦パルスの増幅とは異なり, 径偏光や方位偏光に代表される軸対称偏光(ここでは単に偏光渦と呼ぶ)は, 増幅の際, そのビームプロファイルの軸対称性が崩れてしまい, 高強度の偏光渦を増幅により得ることは難しい。そこで, 本研究では, 直交する偏光を有する, 2つの超広帯域光渦をコヒーレントビーム結合により合成し, 超広帯域の偏光渦を発生する実験を行った。図2にその実験系を示す。直交する偏光の2つの光渦パルスが等しい分散を受け, コヒーレント合成される系となっているので, 超広帯域の偏光渦パルスの生成が可能となっている。また, 損傷閾値の低い素子を用いていないことから, 高強度の偏光渦パルスの生成にも適している。図3に生成させた超広帯域径偏光パルスの測定結果を示す。波長分解された後, 矢印で示された透過軸の偏光板を通過した断面強度分布が示されている。どの波長においても, 強度分布が計算結果とよく一致しており, 超広帯域の径偏光パルスが生成されていることがわかる。このほか, 超広帯域方位偏光パルスの発生にも成功しており, 本手法は, コヒーレントビーム結合する前のビームの組み合わせを変えれば, 任意の偏光渦を発生させることが可能である。

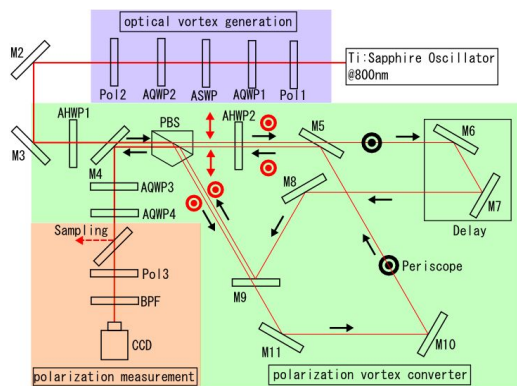


図 2 超広帯域光渦パルスのコヒーレントビーム結合による超広帯域偏光渦パルス発生実験系. Po1: 偏光板, ASWP: 軸対称波長板, AQWP: アクロマティック 1/4 波長板, AHWP: アクロマティック 1/2 波長板, M: ミラー, PBS: 偏光ビームスプリッター, BPF: バンドパスフィルター, CCD: CCD カメラ.

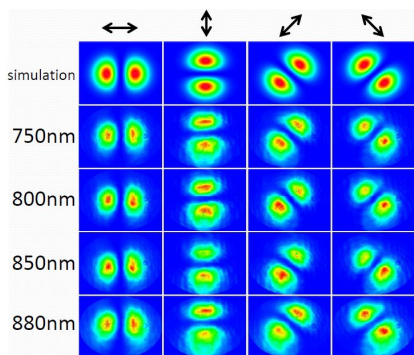


図 3 コヒーレントビーム結合により生成された超広帯域径偏光パルスの波長分解断面強度分布. 矢印は透過させる偏光板の透過軸方向を表す. 最上段の強度分布は計算結果である.

(3) 超広帯域偏光渦パルスの偏光対称性, 空間的偏光純度の精密測定法の開発

研究代表者らは, 位相特異点を有する光渦に関して, その強度分布, 位相分布を精密に測定する方法をこれまでに開発してきた。本研究では, これをさらに進め, 偏光特異点を有する偏光渦に関して, その偏光分布を精密に測定し, さらに偏光対称度, 空間的偏光純度を精密に求める方法を開発した。

空間的一様な偏光は, Stokes パラメータにより偏光状態が記述され, さらに偏光度が定義される。研究代表者らは, この概念を偏光渦にも拡張し, 従来の Stokes パラメータの断面内空間平均で与えられる拡張 Stokes パラメータを導入, さらにこれにより, 偏光対称度, 空間的偏光純度を与える指標を定義した。

発生させた超広帯域偏光渦パルスに関する従来 Stokes パラメータをビーム断面内の各点で測定し, そこから拡張 Stokes パラメ

ータを求め, 拡張偏光状態, 偏光対称度を求めた結果が図 4 である。発生させた軸対称偏光は, どの波長域においても 97%以上の偏光対称性, 98%以上の偏光純度を持つことがわかる。このような精度のよい測定が可能となっている。

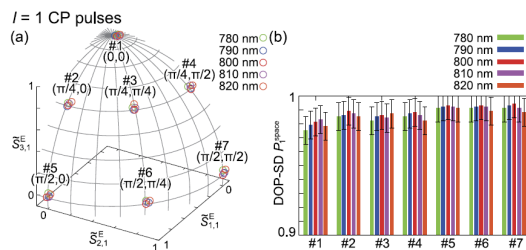


図 4 1 次の超広帯域偏光渦パルスの精密測定結果. (a) 波長分解された成分の拡張 Poincaré 球面上分布 (偏光状態および偏光純度を表す), (b) 波長分解後の空間偏光度 (偏光対称度を表す).

(4) 径偏光超短パルスによる半導体のスナップショット偏光分光実験

偏光渦は, 軸対称に偏光が分布しており, これを用いて非線型分光を行い, 信号光の偏光空間分布を測定すれば, 測定時に偏光状態を変化させることなく, 一度に多くの, また物質の対称性に関する情報を得る分光を行うことができる。

本研究では, 径偏光超短光パルスを用いた四光波混合分光を行い, 半導体 GaN の異方性の高感度・高精度評価を行った。具体的には, GaN の励起子に起因する四光波混合信号を測定することにより, 一軸歪みのエネルギーおよびスピン交換相互作用定数を評価した。この結果は, 従来結果とよく一致しており, 本スナップショット測定法が, 高感度, 高精度で測定できる手法であることを示している。

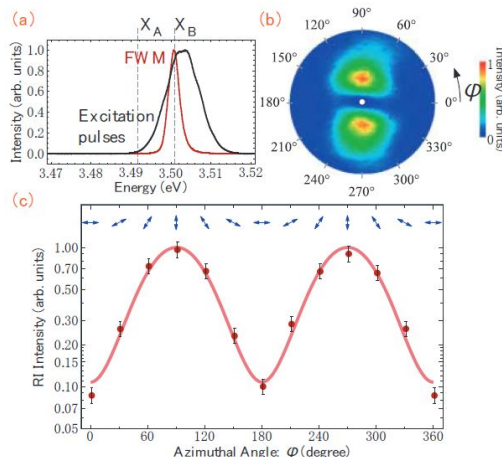


図 5 径偏光超短パルスによる四光波混合分光測定結果. (a) 励起パルスおよび四光波分光信号スペクトル, (b) 信号の空間強度分布, (c) 信号強度の方位角依存性.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 21 件)

K. Shigematsu, M. Suzuki, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Snap-shot optical polarization spectroscopy using radially polarized pulses", Appl. Phys. Express **9** (2016) 122401/1-4, DOI: 10.7567/APEX.9.122401/pdf, 査読有.

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Analysis of the Pancharatnam-Berry phase of vector vortex states using the Hamiltonian based on the Maxwell-Schrödinger equation", Phys. Rev. A **94** (2016) 043851/1-7, DOI:10.1103/PhysRevA.94.043851, 査読有.

K. Yamane, M. Sakamoto, N. Murakami, R. Morita, K. Oka, "Picosecond rotation of a ring-shaped optical lattice by using a chirped vortex-pulse pair", Opt. Lett. **41** (2016) 4597-4600, DOI: 10.1364/OL.41.004597, 査読有.

森田 隆二, 「光渦の生成とその応用」, 応用物理, 第 **85** 巻, 第 **5** 号, (2016) 396-403, <https://www.jsap.or.jp/ap/2016/05/ob850396.xml>, 査読有.

K. Shigematsu, M. Suzuki, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Rotational Symmetry Breaking in Coherent Dynamics of GaN Excitons Excited by Radially Polarized Pulses", Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016 (2016), FW4N.5, DOI: 10.1364/CLEO_QELS.2016.FW4N.5, 査読有.

F. Takahashi, H. Fujiwara, K. Izumisawa, K. Miyamoto, H. Hidai, R. Morita, T. Omatsu, "Monocrystalline silicon needle formation by optical vortex illumination", Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016 (2016), SW4L.5, DOI: 10.1364/CLEO_SI.2016.SW4L.5, 査読有.

F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu, "Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle", Sci. Rep. **6** (2016) 21738/1-10, DOI: 10.1038/srep21738, 査読有.

K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Coherent dynamics of exciton

orbital angular momentum transferred by optical vortex pulses", Phys. Rev. B **93** (2016) 045205/1-8, DOI:10.1103/PhysRevB.93.04520, 査読有.

F. Takahashi, S. Takizawa, H. Hidai, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Optical vortex pulse illumination to create chiral monocrystalline silicon nanostructures", Phys. Status Solidi A **213** (2016) 1063-1068, DOI:10.1002/pssa.201532661 査読有.

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Full quantitative analysis of arbitrary cylindrically polarized pulses by using extended Stokes parameters", Sci. Rep. **5** (2015) 17797/1-9, DOI: 10.1038/srep17797, 査読有.

岡和彦, 坂本盛嗣, 山根啓作, 森田隆二, 「軸対称偏光素子を用いた光渦の生成と白色光渦およびリング状光格子生成への応用」, O plus E 第 **37** 巻, 第 **4** 号 (2015) 263-268, <http://www.adcom-media.co.jp/bn/2015/03/25/20574/>, 査読有.

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Extended Stokes parameters for cylindrically polarized beams", Opt. Rev. **22** (2015) 179-183, DOI: 10.1007/s10043-015-0023-7 査読有.

M. Sakamoto, R. Fukumoto, N. Murakami, R. Morita, K. Oka, "Dispersion reduction in generation of high-order optical vortex using axially symmetric half-wave plates", Opt. Rev. **22** (2015) 174-178, DOI: 10.1007/s10043-015-0026-4, 査読有.

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Quantitative Characterization of Polarization States of Axisymmetrically Polarized Pulses Generated by Coherent Beam Combining", Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2015, SW1H.7, DOI: 10.1364/CLEO_SI.2015.SW1H.7, 査読有.

M. Sakamoto, K. Yamane, N. Murakami, R. Morita, K. Oka, "Generation of the ring-shaped optical lattice using axially-symmetric polarization elements (II)", Technical Digest of the 2014 Frontiers in Optics/Laser Science (FiO/LS) meeting (2014) FM4D.3, DOI: 10.1364/FiO.2014.FM4D.3, 査読有.

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Nonlinear coupling between

axisymmetrically-polarized ultrashort optical pulses in a uniaxial crystal", *Opt. Express* **22** (2014) 16903-16915, DOI: 10.1364/OE.22.016903, 査読有.

K. Yamane, A. Honda, Y. Toda, R. Morita, "Over 1-mJ intense ultrashort optical-vortex pulse generation with programmable topological-charge control by chirped-pulse amplification", *Technical Digest of 19th International Conference on Ultrafast Phenomena (2014) 08.Tue.D.5*, DOI: 10.1364/UP.2014.08.Tue.D.5, 査読有.

F. Takahashi, S. Takizawa, H. Hidai, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Chiral mono-crystalline silicon nano-cone fabrication by optical vortex pumping", *Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2014 (2014) SF1J.5*, DOI: 10.1364/CLEO_SI.2014.SF1J.5, 査読有.

K. Yamane, Y. Shioda, M. Suzuki, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultra-broadband pulses with axially-symmetric polarization based on coherent beam combining of optical vortices", *Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2014 (2014) SW3E.5*, DOI: 10.1364/CLEO_SI.2014.SW3E.5, 査読有.

K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Spatiotemporal coherence of GaN excitons excited by an optical vortex with multiple orbital angular momentum", *Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2014 (2014) FTu1B.3*, DOI: 10.1364/CLEO_QELS.2014.FTu1B.3, 査読有.

④ K. Yamane, Z. Yang, Y. Toda, R. Morita, "Frequency-resolved measurement of the orbital angular momentum spectrum of femtosecond ultra-broadband optical-vortex pulses based on field reconstruction", *New J. Phys.* **16** (2014) 053020/1-15, DOI: 10.10088/1367-2630/16/5/053020, 査読有.

[学会発表](計 67 件)

山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「幾何学的変換に基づく光渦の高精度軌道角運動量分解計測」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 16 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市).

柿澤康平, 岩佐康平, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, 「高強度・超高速回転リング状光格子の発生」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月 16 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市).

内古閑隆太郎, 重松恭平, 山根啓作, 森田隆二, 戸田泰則, 「ポアンカレビームパルスを用いた GaN 励起子スピンのコヒーレントダイナミクス観測」, 日本物理学会 2016 年秋季大会学術講演会, 2016 年 9 月 16 日, 金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市).

柿澤康平, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, 「光渦パルスのチャープ特性を利用したプログラブル超高速回転リング状光格子の生成」, 第 77 回応用物理学秋季学術講演会, 2016 年 9 月 14 日, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市).

K. Yamane, K. Kakizawa, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Ultrafast rotation of ring-shaped optical lattice in picosecond regime", *Europhoton 2016 (2016)*, 2016 年 8 月 26 日, the Technical University of Vienna (Vienna, Austria).

K. Shigematsu, M. Suzuki, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Rotational Symmetry Breaking in Coherent Dynamics of GaN Excitons Excited by Radially Polarized Pulses", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016*, 2016 年 6 月 8 日, San Jose Convention Center (San Jose, USA).

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Maxwell-Schrödinger equations for space-variant wave plates and Pancharatnam-Berry phase on the extended Poincare sphere", *3rd Optical Manipulation Conference*, 2016 年 5 月 19 日, Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan).

K. Shigematsu, M. Suzuki, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Single-Shot Measurements of Anisotropic Excitons via Four-Wave Mixing Spectroscopy with Radially Polarized Pulses", *3rd Optical Manipulation Conference*, 2016 年 5 月 19 日, Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan).

鈴木雅人, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, 「拡張ストークスパラメータにおける拡張偏光度スペクトルを用いた光波の空間回転対称性解析の検討」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 21 日, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区).

森田隆二, 「光渦によるヘリシティテクノロジー」, 日本物理学会第71回年次大会, 領域11,2,6 合同シンポジウム「ヘリシティ」, 2016年3月19日, 東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市).

重松恭平, 鈴木雅人, 山根啓作, 森田隆二, 戸田泰則, 「時空間分解偏光解析から明らかとなった励起子コヒーレントダイナミクスにおける回転対称性破れ」, 第63回応用物理学会春季学術講演会. 2016年3月19日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区).

重松恭平, 戸田泰則, 山根啓作, 森田隆二, "Orbital Angular Momentum Spectral Dynamics of GaN Excitons Excited by Optical Vortices", 「優秀論文賞受賞記念講演」, 2015年9月14日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

鈴木雅人, 山根啓作, 中嶋奨太, 坂本盛嗣, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, 「空間光位相変調器と軸対称偏光変換素子とによる強度分布制御された軸対称偏光パルスの生成」, 2015年9月14日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市).

K. Yamane, S. Nakajima, M. Suzuki, Y. Toda, R. Morita, "Eigenmode expansion of optical vortices based on electric-field reconstruction in spatial domain", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015), 2015年6月24日, International Congress Center Munich (Munich, Germany).

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Quantitative Analysis of $l = 2$ Radially Polarized Ultrashort Pulses by Using Extended Stokes Parameters", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015), 2015年6月21日, International Congress Center Munich (Munich, Germany).

K. Shigematsu, S. Morimoto, M. Suzuki, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Coherent Dynamics of Uniaxially-Strained GaN Excitons Excited by Cylindrically Polarized Pulses", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015), 2015年6月21日, International Congress Center Munich (Munich, Germany).

M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Quantitative polarization state characterization of higher-order cylindrically polarized ultrashort pulses by use of extended Stokes parameters", 2nd Optical Manipulation Conference, 2015年4月24日, Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan).

K. Yamane, S. Nakajima, M. Suzuki, N. Yokose, Y. Toda, R. Morita, "Eigenmode decomposition of singular optical beams in cylindrical coordinates based on electric-field reconstruction", 2nd Optical Manipulation Conference, 2015年4月24日, Pacifico Yokohama (Yokohama, Japan).

〔図書〕(計5件)

T. Omatsu, K. Miyamoto, R. Morita, "Optical vortices illumination enables the creation of chiral nanostructures", Vortex Dynamics, Intech (Rijeka, Croatia, 2017) pp.107-131.

K. Yamane, A. Honda, Y. Toda, R. Morita, "Over 1-mJ intense ultrashort optical-vortex pulse generation with programmable topological-charge control by chirped-pulse amplification", Ultrafast Phenomena XIX, Springer (Cham, Switzerland, 2015) pp.809-812.

Y. Toda, R. Morita, "Laser Spectroscopy Using Topological Light Beams", Progress in Nanophotonics 3, Springer (Cham, Switzerland, 2015) pp.83-117.

T. Omatsu, R. Morita, "Chiral Nanostructures Fabricated by Twisted Light with Spin", Singular and Chiral Nanoplasmonics, Pan Stanford Publishing (Singapore, 2014) pp.311-334.

〔その他〕

研究室 web ページ

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/cacao>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 隆二 (MORITA, Ryuji)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 30222350

(2) 研究分担者

戸田 泰則 (TODA, Yasunori)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 00313106