

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年 6月15日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03571

研究課題名(和文) 光渦励起パラメトリックレーザーに立脚するトポロジカル非線形光学

研究課題名(英文) Topological nonlinear optics based on optical vortex parametric lasers

研究代表者

尾松 孝茂 (OMATSU, TAKASHIGE)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30241938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：光渦パラメトリックレーザーにおけるシグナル光とアイドラ 光の感じるパラメトリック利得を積極的に非対称にすることで、シグナル光のトポロジカルチャージを多値(励起光のトポロジカルチャージが1に対して、0, 1, 2の3値)に変調できることを発見した。また、1オクターブを超える波長可変幅(0.67 $\mu$ m - 2.57  $\mu$ m)を持つ光渦の発生を実証した。さらに、シグナル光とアイドラ 光の差周波光をZnGeP2結晶もしくはAgGaSe2結晶を用いて発生させることで、6-18 $\mu$ mの中赤外域全域で波長可変ができる中赤外光渦レーザーを実現した。パルスエネルギーは0.1-0.4 mJに達した。

研究成果の概要(英文)：We have developed over 2-octave ultra-broadband tunable optical vortex parametric laser based on a vortex-pumped optical parametric oscillator by employing non-critical phase-matching LiB3O5 crystal with a 45mm length. With this system, a vortex output was generated within an extremely wide wavelength range of 0.67-2.57  $\mu$ m. Further, the generation of an entire mid-infrared (6-18  $\mu$ m) optical vortex output with a milli-joule level pulse energy has been demonstrated by utilizing a AgGaSe2 difference frequency generator pumped by a vortex parametric oscillator. The handedness of the midinfrared vortex output can be controlled selectively by swapping the lasing wavelengths of the signal and idler outputs.

研究分野：非線形光学

キーワード：光渦 特異点光学 非線形光学 レーザー 光物性

### 1. 研究開始当初の背景

螺旋波面を持つ光波を総称して光渦と呼び、螺旋波面に由来する軌道角運動量を持つ。一般に、光渦の軌道角運動量の大きさは、円筒座標系における周期的境界条件に由来するトポロジカルチャージ $l$ で決まる。近年、光渦を物質に照射すると、軌道角運動量が物質に作用して物質が螺旋を巻いたキラル構造体に変形することが発見された。また、光渦をレーザー走査型顕微鏡に応用すると、光の波長のわずか10分の1以下の超解像顕微分光が可能になることも実証された。

もし水分子間相互作用をはじめ生体活動の指紋領域にあたる中赤外～テラヘルツ波帯の任意の波長(周波数)で光渦を利用できれば、生体分子のキラル構造体・高分子結晶の構造的キラリティー制御・超解像テラヘルツ顕微分光などが開拓できる。

波面変調素子が乏しいこの波長域で光渦を発生させる最も有効な方法は1つの光を2つの光に分割する光パラメトリック過程である。では、「光パラメトリック過程において光渦を2つの光(シグナル光・アイドラ 光)に分割すると、整数値であるトポロジカルチャージは2つの光にどのように分配されるのだろうか?」しかしながら、これまでトポロジカルチャージ分配則を体系づける研究はほぼ皆無といって良かった。

### 2. 研究の目的

円筒座標系の周期的境界条件に由来する量子数(トポロジカルチャージ)は光渦の軌道角運動量を決定する基本パラメーターである。光渦励起パラメトリック発振において、「励起光のトポロジカルチャージが2つの光(シグナル光・アイドラ 光)にどのように分配されるのか?」未だ大きな謎である。そこで、本研究では、「通常の量子論ではありえない非整数のトポロジカルチャージを持つ光渦は共振器モードとして発振できるのか?」「整数のトポロジカルチャージを持つ光渦が発生する条件は何か?」を解明する。その結果、波面変調技術が確立されていない中赤外～テラヘルツ波帯の光渦を自在に発生する。

### 3. 研究の方法

(1)「光渦パラメトリックレーザー」におけるトポロジカルチャージ分配則の解析。

隣接する0次光渦、1次光渦を固有状態とするコヒーレントな重ね合わせ(光渦モードのコヒーレント状態)で記述される非整数光渦は光渦の次数分散を伴う様々な要因で解消が起こり安定に存在できない(光渦モードのデコヒーレンス)。

第一の要因は、非線形光学結晶の複屈折性によるウォークオフ効果(Walk-off効果)である。Walk-off効果とは、シグナル光(もしくはアイドラ 光)波面の進行方向とそのエネルギーの伝播方向が異なる現象で、光渦の波面に存在する位相特異点を空間的に横ずらしして

しまう。その結果、非整数光渦は安定に空間伝播できない。

第二の要因は共振器内で発生する Gouy 位相シフトのモード分散である。実際の共振器(例えば対称共振器)では、光渦が受ける Gouy 位相シフトはモード次数を表すトポロジカルチャージ $l$ 、共振器長 $L$ と共振器ミラーの曲率半径 $R$ で決まる。 $R \gg L$ でない限り、モード分散は必ず現れる。

第三の要因は、パラメトリック利得の非対称性である。共振器内部を伝播していくシグナル光とアイドラ 光が感じるパラメトリック利得に非対称性がある場合(すなわち、単一共振の場合)、励起光のトポロジカルチャージは共振しているシグナル光もしくはアイドラ 光へ選択的に転写される。

以上の考察から、光パラメトリック発振において、励起光のトポロジカルチャージをシグナル光とアイドラ 光に分割して非整数光渦を安定に発生するには、Walk-off 効果がない非線形光学結晶を活用すること(例えば非臨界位相整合)、共振器内の Gouy 位相モード分散を補償すること(例えば平行平面共振器)、シグナル光とアイドラ 光のパラメトリック利得がほぼ同じであること(すなわち双共振)、が必要となる。

そこで、ナノ秒グリーンレーザー(Qスイッチ Nd:YAG レーザー第二高調波、波長 0.53 $\mu\text{m}$ 、パルス幅 40ns、パルス繰返し周波数 50Hz)を1次光渦に変換して励起光として使用し、LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>(LBO)結晶(結晶長 50mm)からなる光渦パラメトリックレーザーを構築する。この共振器において、シグナル光とアイドラ 光がともに共振する双共振するシグナル光とアイドラ 光の波長を縮退条件では、発振したシグナル光、アイドラ 光がともに非整数光渦になることを実証する。

(2)「光渦モードのデコヒーレンス」を創る共振条件の解明。

KTiOPO<sub>4</sub>(KTP)結晶を用いた光渦パラメトリックレーザーでは、共振器を安定共振器にすることで発生する Gouy 位相シフトでのモード分散・非線形結晶の複屈折による Walk-off 効果・パラメトリック利得の非対称性が「光渦モードのデコヒーレンス」を誘起したと考えられる。

そこで、励起光のトポロジカルチャージ、共振器構成(共振器安定性、Q 値)をパラメーターにして実験を行い、「デコヒーレンス」が起こる物理条件・原理を明らかにする。その結果、シグナル光とアイドラ 光を両方発振させる双共振型に対して、シグナル光だけを発振させる単共振型ではアイドラ 光は固有モードである必要がないため、「デコヒーレンス」が起こりやすいことを明らかにする。

### 4. 研究成果

(1)「光渦パラメトリックレーザー」におけるトポロジカルチャージ分配則の解析。

シグナル光に対する単一共振型共振器を用いて光渦パラメトリックレーザーにおけるシグナル光とアイドラ光の感じるパラメトリック利得を積極的に非対称にした。さらにシグナル光に対するパラメトリック利得を可変するため、パラメトリック利得を決定する励起光とシグナル光の振幅重なり積分を制御することで、シグナル光のトポジカルチャージを多値(励起光のトポジカルチャージが1に対して、0, 1, 2の3値)に変調できることを発見した。また、1オクターブを超える波長可変幅(0.67–2.57  $\mu\text{m}$ )を持つ光渦の発生を実証した。この時、光渦の最大パルスエネルギーは3 mJ(波長可変全域では>0.5 mJ)を超える。

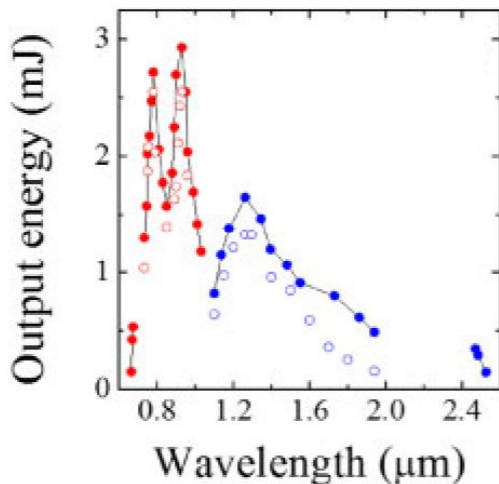


図1 光渦モードの波長可変域。

また、シグナル光とアイドラ光の波長差が小さい場合(縮退に近い場合)は、シグナル光、アイドラ光ともに非整数光渦として発振することから、トポジカルチャージ分配則を最も支配的に決定するのは、シグナル光とアイドラ光のパラメトリック利得の非対称性であることが明らかになった。

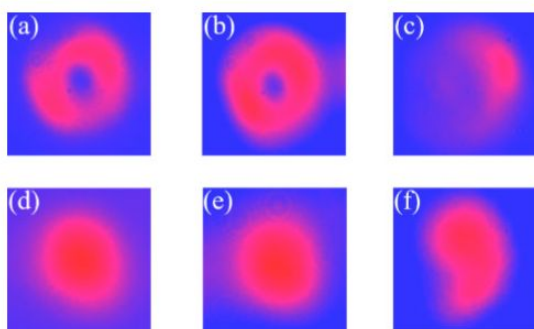


図2 縮退付近でのシグナル光の空間モード。(a)シグナル光波長 1.02 $\mu\text{m}$ , (b) 1.03 $\mu\text{m}$ , (c) 1.04 $\mu\text{m}$ 。その時のアイドラ光の空間モード (d)波長 1.11 $\mu\text{m}$ , (e) 1.10 $\mu\text{m}$ , (f) 1.09 $\mu\text{m}$ 。

(2)「光渦モードのデコヒーレンス」を創る共振条件の解明。

「光渦モードのデコヒーレンス」を誘導するために、非線形結晶の複屈折による Walk-off 効果とパラメトリック利得の非対称性を積極的に活用した。具体的には、KTP 結晶を用いたパラメトリック発振器を構築し、励起光のトポジカルチャージをシグナル光に選択的に転写することに成功した。波長可変域は 1.8-2.7  $\mu\text{m}$ 、パルスエネルギーは 0.5–5 mJ であった。さらに、シグナル光とアイドラ光の差周波光を ZnGeP<sub>2</sub> 結晶もしくは AgGaSe<sub>2</sub> 結晶を用いて発生させることで、6-18 $\mu\text{m}$  の中赤外域全域で波長可変ができる中赤外光渦レーザーを実現した。パルスエネルギーは 0.1-0.4 mJ に達した。

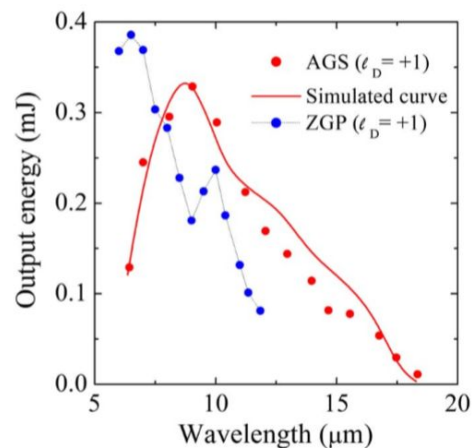


図3 中赤外光渦の波長可変範囲。

さらに、シグナル光とアイドラ光の波長を入れ替えることで、差周波光のトポジカルチャージの符号(差周波光のキラリティー)を制御できることも実証した。これらの光源は分子顕微分光、ポリマー材料の加工などに活用できる。

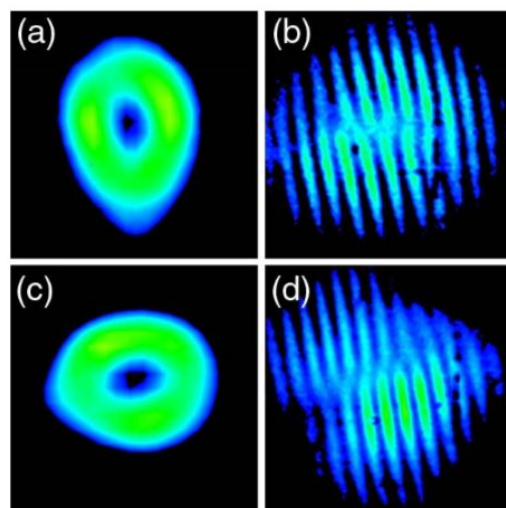


図4 トポジカルチャージが 1、-1 の中赤外光渦(波長 13 $\mu\text{m}$ )。

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 12 件)

- 1) S. Araki, K. Ando, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Ultra-widely tunable mid-infrared (6–18 $\mu$ m) optical vortex source,” *Appl. Opt.* 57 (4), 620-624 (2018).
- 2) T. Omatsu, K. Miyamoto, A. J. Lee, “Wavelength-versatile vortex lasers,” *J. Opt.*, 19, 123002/1-17 (2017).
- 3) Y. Sasaki, K. Yamaguchi, J. Shibakawa, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Ultraviolet optical vortex generation using a pair of  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> crystals with inverted orientations,” *Appl. Opt.*, 56 (29), 8075-8080 (2017).
- 4) J. C. Tung, T. Omatsu, H. C. Liang, K. F. Huang, and Y. F. Chen, “Exploring the self-mode locking and vortex structures of nonplanar elliptical modes in selectively end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers: manifestation of large fractional orbital angular momentum,” *Opt. Express*, 25 (19), 22769-22779 (2017).
- 5) S. Araki, K. Suzuki, S. Nishida, R. Mamuti, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Ultra-broadband tunable (0.67–2.57  $\mu$ m) optical vortex parametric oscillator,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 102701 (2017).
- 6) A. Ablikemu, T. Yusufu, R. Mamuti, S. Araki, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Octave-band tunable optical vortex parametric oscillator,” *Opt. Express*, 24 (14), 15204-15211 (2016).
- 7) T. Yusufu, Y. Sasaki, S. Araki, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Beam propagation of efficient frequency-doubled optical vortices,” *Appl. Opt.*, 55 (19), 5263-5266 (2016).
- 8) D. Barada, G. Juman, I. Yoshida, K. Miyamoto, S. Kawata, S. Ohno, T. Omatsu, “Constructive spin-orbital angular momentum coupling can twist materials to create spiral structures in optical vortex illumination,” *Appl. Phys. Lett.*, 108, 051108 (2016).
- 9) A. J. Lee, H. M. Pask, T. Omatsu, “A continuous-wave vortex Raman laser with sum frequency generation,” *Appl. Phys. B*, 122, 64–1-7 (2016).
- 10) M.-T. Horikawa, A. Ogawa, K. Miyamoto, T. Yusufu, T. Omatsu, “Handedness control in a tunable mid-infrared (6.0–12.5  $\mu$ m) vortex laser,” *J. Opt. Soc. Am. B*, 32 (12), 2406-2410 (2015).
- 11) A. Ablikemu, T. Yusufu, R. Mamuti, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Widely-tunable optical vortex output from a singly resonant optical parametric oscillator,” *Opt. Express*, 23, 14, 18338-18344 (2015).
- 12) T. Akiba, Y. Seki, M. Odagiri, I. Hashino, K. Suizu, Y. H. Avetisyan, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Terahertz wave generation using type II phase

matching polarization combination via difference frequency generation with LiNbO<sub>3</sub>,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 6, 062202 (2015).

[学会発表](計 24 件)すべて招待講演

- 1) T. Omatsu, “Optical vortex materials processing enables the fabrication of chiral structures,” SPIE Photonics West 2018, Jan. 29-Feb. 2. 2018 (San Francisco, USA)
- 2) T. Omatsu, “Chiral structures by optical vortices illumination,” International Conference on Materials Engineering and Applications (ICMEA 2018), Jan. 14-16 2018 (Bali island, Indonesia)
- 3) T. Omatsu, “Optical vortex parametric lasers,” 8th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics 2017, Nov. 15-17, 2017 Las Vegas, Nevada, USA
- 4) T. Omatsu, “Helical lights induced chiral mass transport,” International Conference on Metamaterials and Nanophotonics 2017, Vladivostok, Russia, 18-22 September 2017.
- 5) T. Omatsu, “Wavelength-versatile Optical Vortex Source Toward Materials Processing,” CLEO-PR 2017, Singapore, 2017. 7.31-8.3
- 6) T. Omatsu, “Optical Angular Momentum Establishes Structured Materials,” CLEO-PR 2017, Singapore, 2017. 7.31-8.3
- 7) T. Omatsu, “Optical vortex induced chiral structures,” Chirality 2017, Waseda University, 9-12 July, 2017.
- 8) T. Omatsu, “Helical light induced chiral surface relief in azo-polymer thin film,” Materials Congress 2017, Rome, Italy, 12-14 June 2017.
- 9) K. Miyamoto, T. Omatsu, “Chiral surface relief fabricated by optical vortex illumination,” EMN asia meeting, Metamaterials, China, 8-12 May 2017.
- 10) T. Omatsu, “Structured matters fabricated by optical vortex illumination,” Cooperative Conference on Materials Research 2017, Jeju island, Korea, 26-30. June 2017.
- 11) T. Omatsu, “Optical vortices create chiral nanostructures,” The 6th conference on advances in optoelectronics and micro/nano optics, AOM2017, Nanjing, China, 24 April, 2017.
- 12) T. Omatsu, “Optical angular momentum structures chiral materials and devices,” Asia Communications and Photonics Conference 2016 (ACP2016) (2-5 November 2016, Wuhan, China)
- 13) T. Omatsu, “Optical vortex structures materials,” OSJ-OSK-TPS Joint Symposium - Advanced light control and applications - (1 November 2016, Tokyo, Japan)
- 14) T. Omatsu, “Towards chiral materials science based on optical vortices illumination,” Frontiers in Optics 2016 (17–21 October 2016, Rochester, USA)
- 15) T. Omatsu, “Nanostructures creation by

optical angular momentum transfer,” SPIE Optics and Photonics 2016 (28 August - 1 September, 2016, San Diego, USA)

16) T. Omatsu, “Formation of chiral nanostructures by optical angular momentum transfer effects,” META’16, The 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (25-28 July, 2016, Malaga, Spain)

17) T. Omatsu, “Nanostructures fabrication by optical vortices illumination,” The 8th international conference on information optics and photonics (CIOP2016), (17-20 July, Shanghai, China).

18) T. Omatsu, “Chiral nanostructures formed by optical vortex illumination,” International conference on electric materials (ICEM-2016), (4-8 July 2016, Singapore)

19) T. Omatsu, "Optical parametric vortex lasers and their applications towards chiral materials science," The 5th Advanced Lasers and Photon Sources 2016 (17-20 May 2016, Yokohama)

20) T. Omatsu, “Optical vortices ‘twist’ materials to form chiral nanostructures,” Nanophotonics in Asia 2015, (10-11 December 2015, Osaka)

21) T. Omatsu, “Optical parametric vortex lasers and their applications,” The 12th International Conference "Correlation Optics" (14-18 September 2015, Chernivsti, Ukraine)

22) T. Omatsu, “Optical Vortex Forms Chiral Nanostructures,” META’15, The 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (4-7 August, 2015, New York, USA)

23) T. Omatsu, “Illumination of Optical Vortices Forms Chiral Nanostructures,” Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2015) (6-9 July, 2015, Prague, Czech)

24) T. Omatsu, “Orbital angular momentum of lights pioneers chiral materials science,” EMN Meeting on OptoElectronics, Energy materials and Nanotechnologies, Topological Phenomena in Photonics (24-27 April, 2015, Beijing, China)

#### 〔図書〕(計2件)

1) T. Omatsu, K. Miyamoto, R. Morita, “Optical Vortices Illumination Enables the Creation of Chiral Nanostructures,” Vortex Dynamics and Optical Vortices edited by Hector Perez-de-Tejada, ISBN 978-953-51-2930-1, Published: March 1, 2017, InTech

2) A. J. Lee, T. Omatsu, “Direct Generation of Vortex Laser Beams and Their Non-Linear Wavelength Conversion, Vortex Dynamics and Optical Vortices edited by Hector Perez-de-Tejada, ISBN 978-953-51-2930-1, Published: March 1, 2017, InTech

#### 〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

尾松 孝茂 (TAKASHIGE OMATSU)  
千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30241938