

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360022

研究課題名(和文)非整数量子数光渦レーザーの創成とテラヘルツ波光渦シンセシスへの展開

研究課題名(英文)Fractional optical vortex laser and its frequency extension toward a terahertz region

研究代表者

尾松 孝茂(Omatsu, Takashige)

千葉大学・融合科学研究科(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) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：光渦励起パラメトリックレーザーにおいて非整数のトポジカルチャージを有する中赤外光渦の発生を観測した。また、発生する光渦のキラリティーが励起光のキラリティーによって一意的に決定できることを発見した。非整数光渦が発振するには、光渦モードとガウスモードがコヒーレントに結合する必要がある。共振器を適切に設計することでKTP結晶の複屈折性とグイ位相のモード分散によって光渦モードとガウスモード間のコヒーレンスが解消することも分かった。この現象を用いて光パラメトリック発振におけるシグナル光とアイドラー光の差周波光を発生させることで6-12 μm の中赤外域で0.1mJを超える光渦の発生に成功した。

研究成果の概要(英文)：The first chirality control of an optical vortex output from a vortex-pumped optical parametric oscillator was demonstrated. It is found that the chirality of the optical vortex was fully identical to that of the 1 μm pump vortex beam. Over 2mJ, 2 μm optical vortex with a topological charge of ± 1 was generated. It is also found that a fractional vortex with a half integer topological charge can also be selectively generated owing to a coherent coupling between the first-order vortex and Gaussian modes. Furthermore, a widely tunable mid-infrared (6.3 - 12 μm) optical vortex laser was established by employing a ZGP difference frequency generator pumped by a 2 μm optical vortex laser with a cascaded KTP geometry. The mid-infrared vortex output carried the same topological charge as that of the 1 μm pump output without any destruction. A pulse energy of over 0.1mJ was measured in the wavelength region of 6.5-12 μm .

研究分野：非線形光学

キーワード：レーザー 量子エレクトロニクス 特異点光学 量子光学

1. 研究開始当初の背景

円筒座標系波動方程式の固有解である光渦は螺旋階段状の波面を有し、その波面中央部には位相特異点が現れる。光渦は、位相特異点に由来する「ドーナツ型光強度分布」と螺旋階段状の波面に由来する「角運動量」の二つの特徴を示す。光渦の「ドーナツ型光強度分布」をレーザー走査型顕微鏡(誘導放出による蛍光消去を利用した超解像顕微鏡)に応用すれば、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。また、光渦の「角運動量」が物質と相互作用する時、その「角運動量」が物質の新しいナノ構造や物性を発現する。具体的な例をあげると、レーザーアブレーション時に発生するプラズマに「角運動量」が作用すると、光の波長のわずか 10 分の 1 以下の直径(<100nm)を持つナノ針が形成できる(光渦超解像加工)。このナノ針は、プラズモンプローブ・電界放射電極・近接場光プローブをはじめとするナノフォトニクスに応用展開できる。

光渦の特徴の一つである「角運動量」の大きさは、周期的境界条件によって決まる量子数(トポロジカルチャージ)で特徴づけられる。したがって、トポロジカルチャージは量子力学的な知見によると一般には整数しかありえない。

では、「もし、トポロジカルチャージが 1 の光渦の光子を二つの光子に分割すると、そのトポロジカルチャージは二つの光子にどのように分配されるのか?」

研究代表者はシグナル光とアイドラー光の波長が同じである縮退光パラメトリック発振器において励起光に 1.06 μm の光渦を用いると、励起光のトポロジカルチャージが 2.12 μm 光であるシグナル光、アイドラー光に均等分配されることを見出した。すなわち、励起光のトポロジカルチャージが 1(1 次光渦)である場合、量子力学的な常識では決して現れない 0.5 という非整数のトポロジカルチャージを有するシグナル光とアイドラー光が共振器モードとしてレーザー発振(非整数光渦レーザー発振)することを世界で初めて発見した。発振した非整数光渦は通常的光渦と同様、超解像顕微分光や極限超解像加工に利用できるとともに、その開環状の強度分布を生かすことでメタマテリアルのための開環型ナノコイル創製(ナノコイル)にも潜在的には応用できる。

2. 研究の目的

「非整数光渦レーザー」の発振は研究代表者が発見した全く新しい現象である。したがって「なぜ非整数光渦がレーザー発振するのか?」そのメカニズムの詳細は全く分かっていない。本研究では、その謎を解き明かすとともに、光渦の発振波長を中赤外域(2-10 μm)に拡大する。

3. 研究の方法

主に下記 2 項目について研究を行った。

(1) 「非整数光渦レーザー」の解析

共振器におけるトポロジカルチャージ分配則を可視化するため、励起光のトポロジカルチャージ、共振器構成(共振器ミラーの曲率半径、共振器長)、共振器の Q 値、共振器内部に配置する非線形光学結晶の結晶長、結晶の種類をパラメータにして実験を行い、非整数光渦が効率よく発生する物理的条件を見出す。これらの実験をもとに非整数光渦がレーザー発振する原理を明らかにし、共振器設計の指針を一般化する。

(2) 「光渦モード間デコヒーレンス」による中赤外光渦発生

「励起光のトポロジカルチャージが 1 ならば、シグナル光もしくはアイドラー光のどちらか一方のトポロジカルチャージが 1 (もう一方は 0) となるように分配される」共振条件を「光渦モード間のデコヒーレンス」という。この場合、シグナル光とアイドラー光の差周波光発生によって、中赤外～テラヘルツ波帯の光渦が発生できる。例えば、ZnGeP₂(ZGP) 結晶を用いれば、差周波光波長は 3-10 μm 帯に相当するので、中赤外ほぼ全域で光渦が発生できる。

4. 研究成果

(1) 「非整数光渦レーザー」の解析

非整数光渦は、隣接する 0 次光渦、1 次光渦を固有状態としたコヒーレントな重畳(コヒーレント状態)である。このように光渦のコヒーレント状態からなる非整数光渦は光渦の次数分散を伴う以下のような要因で光渦間のコヒーレンス解消(光渦モード間のデコヒーレンス)が起こり安定に空間伝播できない。

第一の要因は、非線形光学結晶の複屈折性によってシグナル光(もしくはアイドラー光)波面の進行方向とエネルギーの伝播方向が異なるウォークオフ効果(Walk-off 効果)である。Walk-off 効果は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ので、非整数光渦は安定に空間伝播できない。特に Walk-off 効果が顕著な場合には、光渦そのものが消滅してしまう。

第二の要因は共振器内部で発生する空間的に不均一な Gouy 位相シフトである。

このような知見に基づき、非整数光渦を安定に発生できる共振器を提案した。具体的には、非線形光学結晶に非臨界位相整合が可能な LiB₃O₅ 結晶を用いることで Walk-off 効果、平行平面共振器を用いることで Gouy 位相のモード分散をそれぞれ低減し、シグナル光とアイドラー光が同時に非整数光渦になることを実証した。

また、励起光のトポロジカルチャージの符号を逆転すると発生するシグナル光(非整数光渦)のトポロジカルチャージの符号が反転することも実証した(図 1)。

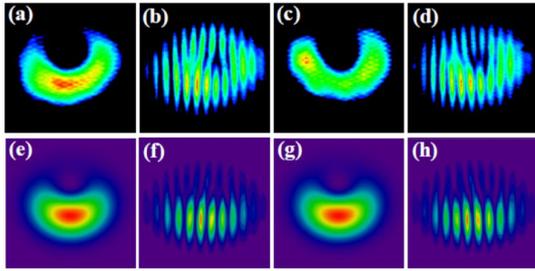


図 1 (a) (b) 右手系非整数光渦の強度分布と波面。(c)(d) 左手系非整数光渦の強度分布と波面。(e)-(h)はシミュレーション画像。

(2) 「光渦モード間デコヒーレンス」による中赤外光渦発生

KTiOPO₄(KTP)のような複屈折性の強い非線形光学結晶を用いた光パラメトリック発振器では、異常光線となるアイドラー光に励起光のトポロジカルチャージが分配される確率が低い。特に、安定共振器を用いた場合は光渦モードが自己無同着な解として存在できないことが分かった。すなわち、「光渦モード間のデコヒーレンス」が起こり、励起光のトポロジカルチャージは全てシグナル光に転写されることが分かった。この「デコヒーレンス」によって得られた光渦モードであるシグナル光とガウスモードであるアイドラー光の差周波光発生を行い、5-12 μ m 帯の中赤外光渦発生に成功した。

中赤外光のパルスエネルギーは 100 μ J を超えた。同調曲線と発生した光渦モードを図 2 に示す。

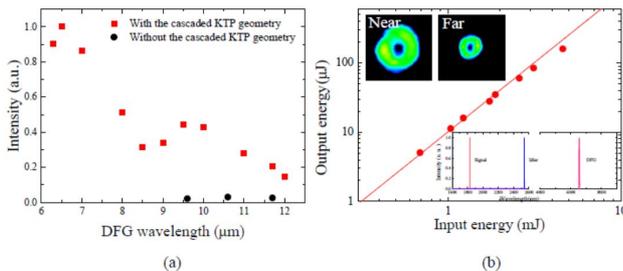


図 2 (a)中赤外光渦の同調曲線。(b)6.5 μ m 光渦の光強度と発振スペクトル。

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 7 件)

すべて査読有り

(1)“Tunable mid-infrared (6.3–12 μ m) optical vortex pulse generation,” K. Furuki, M.-T. Horikawa, A. Ogawa, K. Miyamoto, T. Omatsu, Optics Express, **22**, 21, 26351-26357 (2014).

(2)“Ultraviolet vortex generation using periodically bonded β -BaB₂O₄ device,” Y. Sasaki, M. Koyama, K. Miyamoto, Y. Ariga, T. Onda, I. Shoji, T. Omatsu, Optics Express, **22**, 11 (2014) 12829-12835.

(3)“An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser,” A. J. Lee, C. Zhang, T. Omatsu, H. M. Pask, Optics Express, **22**, 5, (2014) 5400-5409.

(4)“Handedness control in a 2- μ m optical vortex parametric oscillator,” T. Yusufu, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, Optics Express, **21**, 20 (2013) 23604-23610.

(5)“Direct generation of a first-Stokes vortex laser beam from a self-Raman laser,” A. J. Lee, T. Omatsu, H. M. Pask, Optics Express, **21**, 10, (2013) 12401–12409.

(6)“Tunable 2- μ m optical vortex parametric oscillator,” T. Yusufu, Y. Tokizane, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, Optics Express, **20**, 21, (2012) 23666-23675.

〔学会発表〕(計 18 件)

すべて招待講演。

1)“Optical vortices pioneer chiral nano-structures,” T. Omatsu, SPIE Photonics West, LASE, 935006-935006-4 (San Francisco, USA, 2015.2.9.)

2) “Chiral materials fabrication by vortex lasers,” T. Omatsu, 9th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (Matsue, Japan, 2014.9.29-10.3.)

3) “Helical lights twist materials to form chiral structures -Chiral Photonics-“, T. Omatsu, JSAP-OSA Joint Symposia, 18.4 Optical Micro sensing, Manipulation, and Fabrications (Hokkaido University, Japan, 2014.9.18.)

4) “Vortex laser technologies toward chiral materials science”, T. Omatsu, Photonics-international symposium on physics and applications of laser dynamics 2014 (Hsinchu, Taiwan, 2014.9.4.)

5) ”光波の角運動量と物質科学”, 尾松孝茂, 第 24 回光物性研究会, (大阪市大, 2013.12.13.)

6) “Optical vortex lasers for chiral material science,” T. Omatsu, Advanced solid-state lasers 2013, (Paris, France, 2013.11.1.)

7) “Angular momentum of light forces materials to become chiral nano-structures”, T. Omatsu, Structured light in structured media from classical to quantum optics incubator, (Washington DC, USA, 2013.10.1.)

8) “光のドーナツビームと軌道角運動量”, 尾松孝茂, 日本物理学会秋季大会シンポジウム (徳島, 2013.9.25.)

9) “Recent Progress of Vortex Laser,” T. Omatsu, The 12th Asia pacific physics conference, Makuhari messe international conference halls (Chiba, Japan, 2013.7.18.)

10) “Compact yellow-orange Raman lasers”, T. Omatsu, A. J. Lee, H. M. Pask, CLEO-PR 2013 (Kyoto, Japan, 2013.7.4.)

11) “Optical vortex fiber lasers and their application to material nano-processing”, T. Omatsu, CLEO2013 (San Jose, USA,

2013.6.9-14.)

12) “光の角運動量によるナノ構造体のカイラリティー・マニピュレーション”, 尾松孝茂, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、シンポジウム「物質共鳴とデザインされた光場で拓く次世代光マニピュレーション」, 27p-G16, (神奈川工科大学, 2013.3.27.)

13) “光波のヘリシティーによる物質のカイラル構造制御”, 尾松孝茂, 日本顕微鏡学会超分解能電子顕微鏡分科会第 8 回研究会 (東京駅東京八重洲ホール, 2013.3.4.)

14) “光渦レーザーが拓く新しいナノプロセッシング”, 尾松孝茂, 光材料・応用技術研究会 第四回研究会「最先端加工とそれを支えるレーザー計測」(東京, 森戸記念館, 2013.3.1.)

15) “トポロジカル光波による物質のカイラル構造制御”, 尾松孝茂, 第 8 回励起ナノプロセス研究会 (大阪大学中之島センター, 2012.12.17-18.)

16) “Recent progress of high power optical vortex laser technologies,” T. Omatsu, International conference on manufacturing with photons, energetic particles and power fields, (Wuhan, China, 2012.11.2.)

17) “トポロジカル光波とカイラリティー”, 尾松孝茂, 分子研研究会「新しい光の創成と物質科学 — 精密計測と操作への展開」(岡崎, 2012.10.12-13.)

18) “Optical vortex lasers and their application to material nano-processing,” T. Omatsu, APLS 2012 (Anhui, China) (2012.5.28.)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

なし

〔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 (Omatsu, Takashige)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号：30241938

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

宮本 克彦 (Miyamoto, Katsuhiko)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号：20375158