

## 研究課題別評価書

### 1. 研究課題名

トポロジカル光波シンセシス

### 2. 氏名

尾松孝茂

### 3. 研究のねらい

トポロジカルチャージとは光波の空間分布(トポロジカルな分布)に依存して現れる角運動量(軌道角運動量)である。トポロジカルチャージを効率良く利用できれば、例えば、液中やガス中に浮遊するサブミクロンレベルの極微粒子に光照射だけでトルクを与え、任意の回転速度で駆動できる。また、高強度パルスレーザーのトポロジカルチャージを利用すれば、アブレーション過程で発生するプラズマの空間密度分布や再結合時間をはじめとするトポロジカルな物質構造制御ができる。このように光が示す量子力学的な性質であるトポロジカルチャージは新しい量子光学、物性工学を生み出す可能性を秘めている。

本研究の目的は、非線形光学、レーザー工学を高度に駆使し、CW からフェムト秒に至る時間領域でトポロジカルチャージを有する高出力・高強度レーザー(トポロジカル光波)を高効率でかつ自在に創製(デザイン)し、新しい光科学の創成を目指すことにある。

### 4. 研究成果

以下、具体的な研究成果を項目別に列挙する。

#### 1. 高出力ラゲルガウスモードレーザー

レーザー共振器の固有モードであるエルミートガウスビームと異なるトポロジカル光波を高効率にかつ高出力に発生させることは難しく、トポロジカル光波の潜在能力は未だほとんど利用されていない。

トポロジカル光波の代表例はラゲルガウスモードである。円筒座標系における電磁気学的波動方程式の固有解であるラゲルガウスを共振器の固有モードとして発生させるために、共振器内に軸対称性を持つ位相板を挿入する、励起光をドーナツモードにする、などの方法が提案されてきた。しかしながら、いずれも位相板の挿入損失が大きい、ドーナツモードである励起光とレーザーモードとのモードマッチング効率が低い、などの理由からレーザー出力は 1W にも満たない。

われわれは、側面励起型固体レーザーにおいて共振器の安定性を決定するレーザー結晶の熱光学効果

(主にレンズ効果)がガウスモードよりラゲルガウスモードに対しては有利に作用すること、レーザー素子の利得空間ホールバーニングにより 3 次非線形性が発生すること、からラゲルガウスモードがレーザー共振器

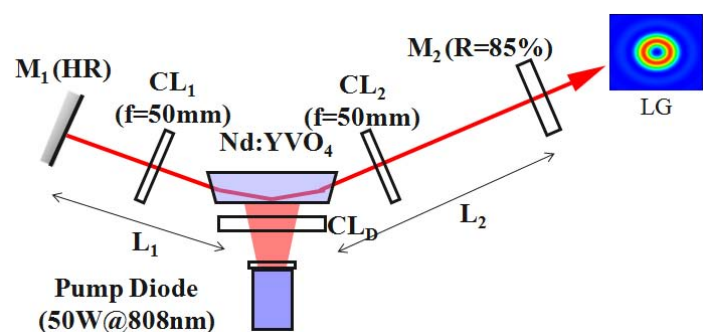


図 1 高出力トポロジカルレーザー

の固有モードとして存在できることを世界で初めて発見した。実際に図 1 に示したような簡単なレーザー共振器で 10W 以上のラゲールガウスモードが安定にレーザー発振する(図 2)。

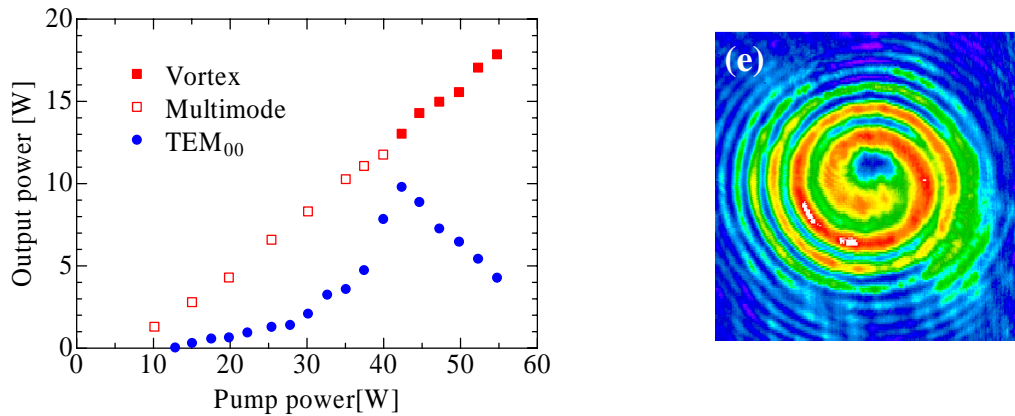


図 2 トポロジカルレーザーの出力特性と波面特性

この方法は、位相変調素子を一切必要としない。これまでに、従来の常識では不可能で  
あると考えられていた 18W を超える高出力ラゲールガウスモードの発生に成功した。

また、Yb ドープラージモードエリファイバーへ軸外入射するとともに、ファイバーへの応  
力付加することによって、ガウスビームであるピコ秒レーザーをラゲールガウスビームへ変  
換すると同時に増幅して高出力化する新たな方法を提案し、平均出力 8W(パルス幅 4.5ps、  
パルス繰り返し周波数 150MHz)を超える高出力ピコ秒ラゲールガウスビームの発生に成功  
した。

## 2.位相共役光学を用いた高出力超短パルスレーザーの創成

高品位高出力高繰返しピコ秒パルスレーザーは、極紫外光やテラヘルツ波発生をはじめと  
する先端光科学を切拓く次世代標準光源として注目を集めている。

われわれは、フォトリフラクティブ結晶であるチタン酸バリウムの Rh イオン濃度  
(400-1000ppm)、結晶方位(c-cut、45 度 cut)、屈折率回折格子間隔(1-6 $\mu$ m)を最適化してピコ  
秒パルスに対して効率よく動作する位相共役鏡を構築して側面励起型 Nd ドープバナデート  
レーザー増幅器に導入し、平均出力  
95W、ピークパワー>10MW の高出力  
高品位ピコ秒パルスレーザーを世界で  
はじめて開発した(図 3)。

位相共役波とは空間反転性を示す  
光であり、位相共役波を利用した光学  
システム設計を位相共役光学と呼ぶ。  
位相共役光学を高出力レーザー装置  
に応用できればレーザー装置に発生す  
るいかなる熱収差も自動的に補償で  
きるので、側面励起型 Nd バナデート増  
幅器の性能を最大限に引き出して高い

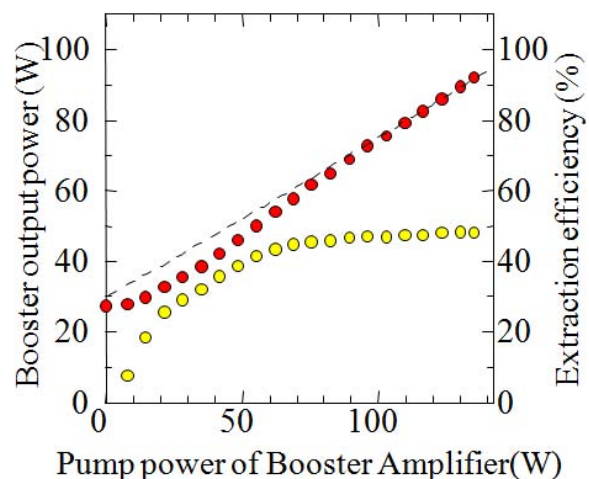


図 3 位相共役ピコ秒レーザーの出力特性

ビーム品質を維持したまま高出力レーザーが実現できる(図 4)。開発したピコ秒パルスレーザーの性能は市販されているピコ秒レーザーをはるかに凌駕する。

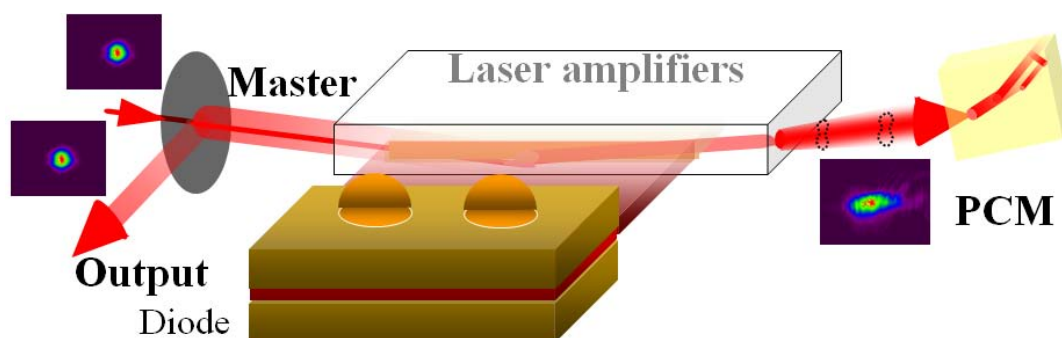


図 4 位相共役レーザーの概念図

### 3. 多重光渦による光マニピュレーション

光の作用場は波長で制限されるため、ナノ粒子の運動や配置を直接制御することを難しい。多重光渦とは、一つの波面に複数の位相特異点(光渦)を内在するトポロジカル光波である。個々の光渦によって捕捉されトルクを受け取るマイクロ微粒子群が生み出す流れの場を利用してナノ微粒子の運動制御・操作ができる。

実験には液晶空間変調器による波面変調法で発生させた3つの光渦を内在する3重光渦を用いた。図5に示したような3つの独立した光渦の次数、符号、強度を独立に制御することで、顕微鏡下のサブミクロン領域に任意の方向に水流を設計することができる。

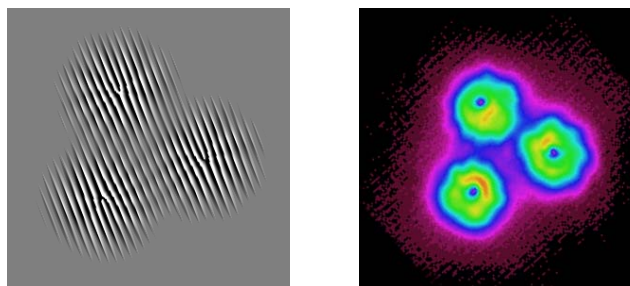


図 5 多重光渦発生用計算機ホログラムと発生した多重光渦

それぞれの渦によって捕捉されるマイクロ微粒子に 800nm 径のラテックス微小球、流れによって操作するナノ微粒子に 170nm 径ラテックスナノ微小球を用いた。ナノ微小球にはローダミン系色素が含有されており、532nm のグリーンレーザーを照射することで、その動きを蛍光画像として可視化できる。ナノ微小球は二つの光渦が作り出す流れに沿って右から左へ移動し、3 つ目の光渦の符号の違いで上方、あるいは、下方へ輸送される。(図 6 は下方へナノ微粒子が輸送された例)

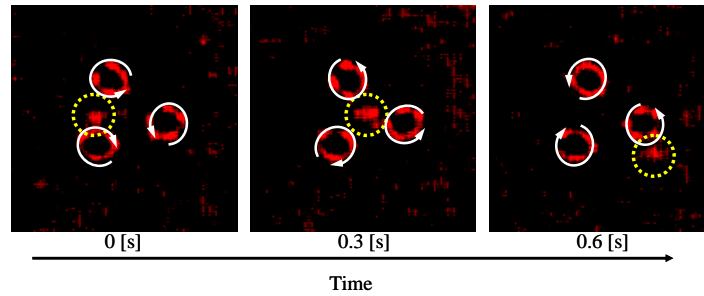


図 6 多重光渦によって輸送されたナノ微粒子。点線で囲っているのがナノ微粒子。白い矢印が渦の向きを示す。

これまでも光マニピュレーションは数多く報告されているが、多重光渦を用いてナノ微粒子を輸送したのはこの研究がはじめてである。

この他にも、トポロジカル光波を用いた光造形やレーザーアブレーションなど、研究成果が出始めている。

## 5. 自己評価

当初、狙いに掲げていた高出力・高強度トポロジカル光波の創製(デザイン)、高強度トポロジカル光波による物質構造制御のうち、前者に関しては、側面励起固体レーザーによる高出力ラゲールガウスレーザーやラージエリアモードファイバー増幅器を用いたピコ秒ラゲールガウスレーザーを含め、所定以上の成果が得られたものと確信している。これらの成果と位相共役レーザーシステムを融合することでさらにトポロジカル光波の高出力化と高強度化が狙える。

後者に関しては、光源開発に比べやや遅れていたが、今年度後半から漸く実験が進み成果が出始めた。特に、多重光渦によるナノ微粒子操作をはじめ、トポロジカル光波の示すトポロジカルチャージを利用することで初めて可能になる事例を実証することができた。さらには、高強度トポロジカル光波を用いたプラズマ制御やトポロジカル光波を用いた光造形の可能性も示すことができた。

今後、研究期間を通して開発してきた高出力・高強度トポロジカル光波を応用研究に導入することで、光によって物質のトポロジカルな構造制御を可能にする「トポロジカル光科学」へと展開できるものと確信する。

## 6. 研究総括の見解

非線形光学、レーザー工学を高度に駆使し、CW からフェムト秒に至る時間領域でトポロジカルチャージを有する高出力・高強度レーザー(トポロジカル光波)を、高効率でかつ自在に創製し、新しい光科学の創成に取り組んだ。主たる成果は次の3点である。

- ①高出力ピコ秒ラゲールガウスビーム(平均出力 8W、パルス幅 4.5ps、パルス繰り返し周波数 150MHz)の発生に成功。
- ②高出力高品位ピコ秒パルスレーザー(平均出力 95W、ピークパワー>10MW)を世界ではじめて開発。
- ③世界ではじめて多重光渦による光マニピュレーションでナノ微粒子を輸送。

研究期間を通して開発してきた高出力・高強度トポロジカル光波のいくつかは完成度も高く、実用光源として次世代のプラットフォームとなりうるもので高く評価できる。

研究成果は、16編の原著論文、16件の招待講演に纏められているが、著書・解説6件、プレス発表2件と精力的に発表を行っている。また、この研究成果に基づく特許出願も8件を数える。

今後、高出力ピコ秒レーザーはテラヘルツ波や OPCPA の励起光源として応用できるとともに、

シリコンやサファイアをはじめとする難加工材のアブレーション加工用光源として産業界にも大きく貢献すると期待される。また、プラズマ密度や再結合時間をトポロジカル光波で制御できれば、その応用に、EUV 光の発生効率改善、プラズマによる光学部品の損傷や汚染低減などの効果が期待できる。産業界に与えるインパクトが大きく、重要である。

## 7. 主な論文等

### (A) さきがけの個人研究者が主導で得られた成果

#### (1) 論文(原著論文)発表 論文(国際)

##### (1) 論文(原著論文)発表

- ・ "Characterization of 1.06  $\mu\text{m}$  optical vortex laser based on a side-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> bounce oscillator", Masahito Okida, Yasushi Hayashi, Takashige Omatsu, Junichi Hamazaki, Ryuji Morita, Appl. Phys. B (in press)
- ・ "Direct production of high-power radially-polarized output from a side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> amplifier", Junichi Hamazaki, Akira Kawamoto, Ryuji Morita, Takashige Omatsu, Optics Express, **16** Issue 14, (2008) 16762-16768
- ・ "Direct generation of high power Laguerre–Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> 1.3- $\mu\text{m}$  bounce laser", Masahito Okida, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai, Takashige Omatsu, Optics Express, **15**, No.12 (2007) 7616-7622.
- ・ "Measurement of Contrast Transfer Function in Super-Resolution Microscopy using Two-color Fluorescence Dip Spectroscopy", Yoshinori Iketaki, Takeshi Watanabe, Nándor Bokor, Takashige Omatsu, Takashi Hiraga, Kimihisa Yamamoto, Masaaki Fujii, Applied Spectroscopy, **61**, No.1 (2007) 6-10.
- ・ "Highly efficient phase-conjugation of a 1  $\mu\text{m}$  pico-second Laguerre-Gaussian beam", Gyeong Bok Jung, Keiichiro Kanaya, Takashige Omatsu, Optics Express **14** No. 6 (2006) 2250-2255.

##### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 8 件

国内特許 8 件(未公開)

##### (3) 受賞

- ・ 平成 18 年 5 月: 平成 18 年度ちばぎんひまわり賞  
「位相共役光学を用いた高品位ラップトップ超短パルスレーザー」
- ・ 平成 19 年 9 月: 平成 19 年度千葉大学オープンリサーチ 2007 学長賞最優秀賞

##### (4) 著書

- ・ “ポロジカル光波の生成とその応用”, トポロジカルデザイン ブッカーズ 尾松孝茂、森田隆二 (出版予定)
- ・ “Photorefractive materials and Applications vol.3”, Springer, Series in Optical Sciences Chap.7, “Optical phase conjugation in laser technology”, T.Omatsu, M.J.Damzen, A. Minassian, and

K.Kuroda

(5)招待講演

- ・ “100W 級高出力ピコ秒位相共役レーザーシステム”、尾松孝茂、レーザー学会学術講演会第29 回年次大会(徳島大学、2009/1/12)
- ・ “光多重渦の発生と光マニピュレーションへの応用”、尾松孝茂、第69回応用物理学会学術講演会(中部大学、2008/9/3)
- ・ “High power vortex output from a diode-pumped solid-state laser”  
T. Omatsu, The Topology and Singularity in Optical Physics (Sapporo, 23-24 July 2007)
- ・ ”Ultra-fast phase conjugate laser system”  
K. Nawata, J. Hagiwara, T. Omatsu, CLEO-Europe 2007 (Munich, 17-22 June 2007)
- ・ “Power scalability of a Pico-second Nd:YVO<sub>4</sub> phase conjugate master-oscillator power amplifier”,  
6<sup>th</sup> International conference Laser & Laser technologies: Fundamental problems & Applications (ILLA2006) (Smolyan, Bulgaria, Oct.4-7 2006)

(6)新聞発表

- ・ 2008.1.7. 化学工業日報 「100 ワットピコ秒パルスレーザー開発へ」
- ・ 2006.7.11. 日刊工業新聞 「位相共役鏡を用いた小型ピコ秒パルスレーザー アルネアラボラトリーとの共同開発」

(B)その他の主な成果

なし