

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 年度～平成 2012 年度

課題番号：23656041

研究課題名（和文） プラズマ・ベクトルホログラムによる高強度レーザーの全角運動量シンセシス

研究課題名（英文） Topological lightwave synthesis based on plasma hologram

研究代表者

尾松 孝茂 (TAKASHIGE OMATSU)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号：30241938

研究成果の概要（和文）：

プラズマ・ホログラムの位相変調により、回折光の波面変調が可能であることを実証する実験を行った。ホログラム記録材料としてアブレーション閾値などが既知である石英ガラスを用いた。光渦と平面波が石英ガラス基盤上で二光束干渉すると石英ガラスのアブレーションが起これ、プルームが発生する。それと同時に、記録されたプラズマ・ホログラムの再生光として前置縮退四光波混合に由来する自己回折光が発生した。自己回折波のエネルギーは、ホログラム記録に用いた1次光渦のエネルギーの3次関数で増加することから、光渦波面がプラズマ・ホログラムとして記録されていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

We performed forward four-wave mixing in plasma created by highly intense optical vortex, so as to transfer the total angular momentum of the optical vortex to the diffracted beam. A laser used was a picosecond Nd:YAG laser (wavelength : 1064nm, pulse width : 20ps, pulse energy : 1~5mJ), and its output was converted to optical vortex with a total angular momentum of 1 by a spiral phase plate. The optical vortex and its reference pulses were spatially overlapped on a target silica glass, thereby forming the plasma grating. Self-diffracted output with an annular intensity profile was then observed. Furthermore, self-diffracted output energy was almost proportional to the cube of the optical vortex energy. These results evidenced that the total angular momentum was transferred from the optical vortex to the diffracted output through four-wave mixing process in plasma grating.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：応用光学・量子光工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー・非線形光学・特異点光学

## 1. 研究開始当初の背景

光の「全角運動量( $J$ )」は光波面の位相特異点に由来する軌道角運動量( $L$ )と円偏光に由来するスピン角運動量( $S$ )の量子力学的ベクトル和( $J=L+S$ )で与えられる未開拓の新規光パラメータである(図 1)。光の「全角運動量」を用いると、これまで制御不能であったプラ

ズマなどの荷電粒子集団の指向性を光で自在に制御できる。一方、TW を超える極限的な光強度を示す高強度レーザーは、高次高調波発生、アト秒光パルス発生、など、新しい極限物理現象を次々と生み出している。これらの極限物理現象はすべて、レーザーとイオン・電子などの荷電粒子集団との多次元的相

相互作用によって起こる。したがって、プラズマをはじめ荷電粒子集団の指向性を直接制御できる「全角運動量」という光パラメータが高強度レーザーに加われば、極限レーザー物理現象の効率を飛躍的に向上させるだけでなく、新しい極限現象が生まれることは間違いない。

## 2. 研究の目的

パルスレーザー光照射によって誘起されるプラズマ(レーザー誘起プラズマ)にレーザー光の空間位相分布をホログラム記録する(「プラズマ・ホログラム」)。本研究では、この「プラズマ・ホログラム」を用いて、高強度レーザーの「全角運動量」を自在に制御することを目的とする。

## 3. 研究の方法

プラズマ・ホログラムの位相変調により、回折光の波面変調が可能であることを実証する実験を行った。1GW レベルのピーク強度を有するピコ秒レーザー(パルス幅 20ps、波長 1 $\mu$ m)を用いて実験を行った。空間フィルターを用いてレーザー波面をガウスビームに変換したのち、石英ガラスでできた螺旋位相板(16 分割されていて各セグメントの光学厚さが $\lambda/16$  の整数倍で与えられる)を用いて波面変調することで、1 次光渦を発生させた。ガウスビームから一次光渦への変換効率は~85%である。

この光渦とその一部を切り出して作成した平面波との二光束干渉によってプラズマ・ホログラムの書き込みと読み出しを行った。2 光束間の光量比は~1:1 である。ホログラム記録材料としてアブレーション閾値などが既知である石英ガラスを用いた。

## 4. 研究成果

光渦と平面波が石英ガラス基盤上で二光束干渉すると石英ガラスのアブレーションが起こり、ブルームが発生する。それと同時に、記録されたプラズマ・ホログラムの再生光として前置縮退四光波混合に由来する自己回折光が発生した。自己回折光のエネルギーは、ホログラム記録に用いた 1 次光渦のエネルギーの 3 次関数で増加することから、光渦波面がプラズマ・ホログラムとして記録されていることを確認した。また、自己回折光の波面が光渦であることはドーナツ型強度分布から確認できた。

また、光渦パルスを用いて金属、半導体表面のアブレーション過程で発生するブルームのダイナミクスをインテシファイド CCD カメラを用いて観測し、光渦の角運動量によるプラズマ捕捉を実験的に観測した。

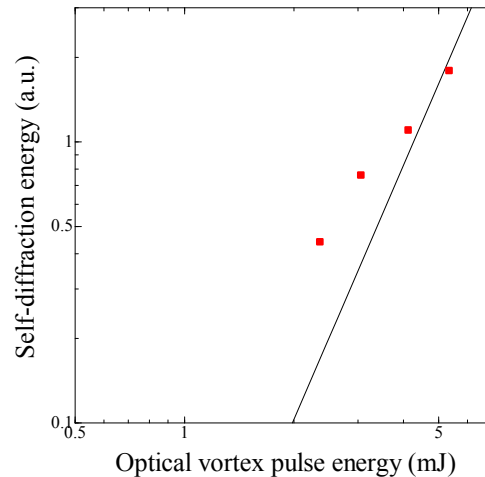


図 1 自己回折光の回折効率。

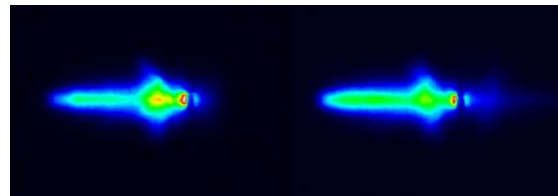


図 2 光渦によるプラズマ捕捉。左(光渦)、右図(ガウスビーム)。光渦を用いると中心部でのプラズマ密度が高くなる。

これらの結果から、高強度レーザーによるアブレーション過程で発生する荷電粒子やクラスターが光渦で力学的に操作、捕捉できることが分かる。この現象をアブレーション加工に応用した。その結果、光渦照射によって螺旋構造を有する金属ナノニードルが形成できることを実験的に見出した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- 1) “Transfer of light helicity to nanostructures,” Kohei Toyoda, Fuyuto Takahashi, Shun Takizawa, Yu Tokizane, Katsuhiko Miyamoto, Ryuji Morita, Takashige Omatsu, Phys. Rev. Lett., **110**, 14, (2013) 143603.
- 2) “Tunable 2- $\mu$ m optical vortex parametric oscillator,” Taximaiti Yusufu, Yu Tokizane, Masaki Yamada, Katsuhiko Miyamoto,

- Takashige Omatsu, *Optics Express*, **20**, 21, (2012) 23666-23675.
- 3) “Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures,” Kohei Toyoda, Katsuhiko Miyamoto, Nobuyuki Aoki, Ryuji Morita, Takashige Omatsu, *Nano Lett.* **12**, 7, (2012) 3645–3649.
  - 4) “High power neodymium-doped mixed vanadate bounce geometry laser, modelocked with nonlinear mirror,” Gabrielle M. Thomas, Takashige Omatsu, Michael J. Damzen, *Appl. Phys. B* **108**, 1, (2012) 125-128.
  - 5) “Dual-frequency picosecond optical parametric generator pumped by a Nd-doped vanadate bounce laser,” Masaki Koichi, Shuto Ujita, Takefumi Saito, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, *Opt. Express*, **19**, 19, (2011) 18523-18528.
  - 6) “Nanosecond vortex laser pulses with millijoule pulse energies from an Yb-doped double-clad fiber power amplifier.” Mio Koyama, Hirose Tetsuya, Masahito Okida, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, *Opt. Express* **19**, 15, (2011) 14420-14425.

[学会発表] (計 8 件)

- 1) 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)
- 2) “光波のヘリシティ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.)

- 3) “光渦レーザーが拓く新しいナノプロセスング”、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」(森戸記念館, 2013.3.1)
- 4) “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)
- 5) “Recent progress of high power optical vortex laser technologies,” Takashige Omatsu, International conference on manufacturing with photons, energetic particles and power fields, (Wuhan, China, 2012.11.2)
- 6) ”Optical vortex lasers and their application to material nano-processing,” Takashige Omatsu, APLS 2012 (Anhui, China)(2012.5.28.)
- 7) ”高出力光渦レーザーの開発とその波長変換,” 尾松孝茂、2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学、2012.3.16.)
- 8) ”光波の全角運動量を用いたナノプロセスング,” 尾松孝茂、森田隆二、レーザー学会学術講演会第32回年次大会(仙台、2012.1.30)

[図書] (計 1 件)

- 1) “Chiral Nanostructures Fabricated by Twisted Light with Spin”, T. Omatsu, R. Morita, Singular and Chiral Nanoplasmonics, (Pan Stanford Publishing Pte Ltd.) (in press)

[その他]  
解説記事等

- 1) “高出力側面励起Ndドーピングバナデートスラブピコ秒レーザーシステム”, 尾松孝茂, レーザ協会誌 **37** No.1 (2012)

6-14.

- 2) “Optical-fiber laser produces high-power vortex output”, T. Omatsu, SPIE Newsroom, 10.1117/2.1201102.003459 1-2 (2011)
- 3) 森田隆二, 戸田泰則, 尾松孝茂, “位相・偏光特異性を持つ極限光パルスの発生とその応用”, 表面科学, 第32巻, 748-754 (2011).

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