

尾松孝茂

千葉大学大学院融合科学研究科・教授

トポロジカル光波の全角運動量による新規ナノ構造・物性の創出

§1. 研究実施体制

(1)「千葉大」グループ

① 研究代表者:尾松孝茂 (千葉大学大学院融合科学研究科、教授)

② 研究項目

- ・「全角運動量」が制御された高出力高強度トポロジカル光源の高エネルギー化
- ・「全角運動量」が制御された未踏波長域トポロジカル光源の高効率化と波面計測
- ・トポロジカル光波によるレーザー誘起プラズマダイナミクスの解明
- ・「全角運動量」によって形成されたナノ構造体のデバイス応用

(2)「北大」グループ

① 主たる共同研究者:森田隆二 (北海道大学大学院工学研究院、教授)

② 研究項目

- ・「全角運動量」が制御された超短パルス・トポロジカル光源の開発
- ・超短パルス・トポロジカル光波の軌道角運動量スペクトル解析実験
- ・超短パルス・トポロジカル光波の非線型相互作用・伝播実験およびその特性解析

§ 2. 研究実施内容

(文中の引用番号等は(3-1)に対応する)

光波の「全角運動量(\mathbf{J})」とは、光波面のトポロジカルな構造から現れる軌道角運動量(\mathbf{L})と偏光のトポロジカルな構造によって現れるスピン角運動量(\mathbf{S})の量子力学的なベクトル和($\mathbf{J}=\mathbf{L}+\mathbf{S}$)で与えられる光パラメータである。ここでは「全角運動量(\mathbf{J})」を有する光波をトポロジカル光波と呼ぶ。これまで光波の軌道角運動量、スピン角運動量はそれぞれ独立に研究が進められてきた。しかしながら、軌道角運動量(\mathbf{L})とスピン角運動量(\mathbf{S})のベクトル和で与えられる「全角運動量(\mathbf{J})」は未だ研究例が皆無で、未開拓な光パラメータである。

本研究では、光の新規パラメータである「全角運動量(\mathbf{J})」の 2次元空間分布を超高速・高強度極限レーザー工学を用いて自在に操りトポロジカル極限光波を創成すること、極限トポロジカル光波の有する「全角運動量」を縦横無尽に駆使して物質のナノ構造・物性の極限的新機能を創出すること、さらには、光を用いたトップダウン・プロセスで機能性デバイスを創成すること、を目的とする。

目的達成に向けて、本年度は以下の A, B, C の項目に関して研究を進めた。

A. トポロジカル極限レーザー物理学

千葉大は、加圧したラージモードエアファイバー増幅器中での応力性モード分散を利用してガウスビームをトポロジカル光波へ変換する独自の方法を提案している。本年度は、ファイバー増幅器の冷却機構の改善と励起半導体レーザーを高出力することで、さらなるパワースケーリングに取り組んだ。ピコ秒パルス領域において数値目標を上回る平均出力 40W、同じくナノ秒領域で 1mJ, 25W を達成した。また、トポロジカル光波の忠実度を示す M^2 因子はピコ秒、ナノ秒ともにほぼ 2 で、理想的な一次のトポロジカル光波が発生していることが分かった。この研究成果は Optics Express に論文掲載(Opt. Express, 19, 15, (2011) 14420-14425.)された。

金属、半導体、誘電体、有機高分子を高効率にアブレーションするには、材料のプラズマ周波数や分子間結合に対応した広い波長域で高

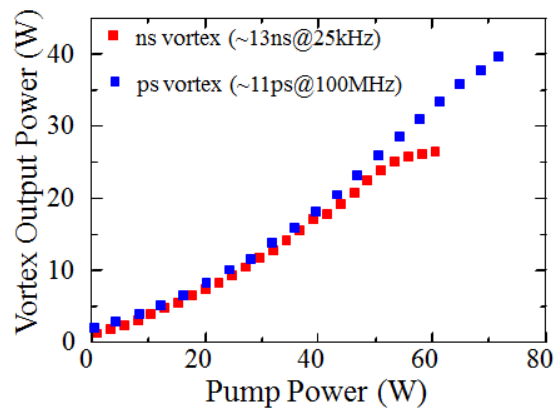


図1 トポロジカル光波の出力特性。

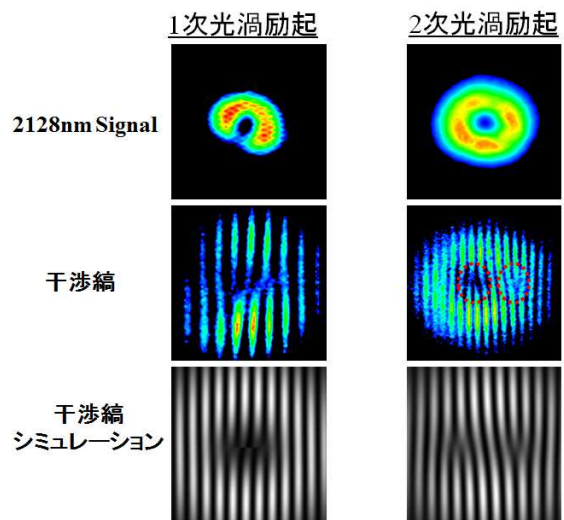


図2 2 μ mトポロジカルレーザーのビームパターン。1次光渦励起の場合に半整数光渦が発生する。

効率にトポロジカル光波を発生させる必要がある。千葉大では、KTP 結晶を用いた光パラメトリック発振器によって、2 μm 帯トポロジカル光波の開発に着手した。本年度の数値目標であったパルスエネルギー1 mJを超える2mJの2 μm 帯トポロジカル光波発生に成功した。また、共振器構成によっては半整数値のトポロジカルチャージを持つトポ

ロジカル光波(光渦モード)が安定に発振することを確認した(図 2)。

この半整数トポロジカル光波は固有状態であるトポロジカルチャージ 0 と 1 のトポロジカル光波(光渦モード)のコヒーレントな重ね合わせで発生すると考えられるが、発生の詳細なメカニズムは明らかになっていない。(Optics Express, 19, 13 (2011) 12220-12226.)

北大では、高強度超短パルス・トポロジカル光波を発生する方法として一軸結晶を用いる発生法を提案した。擬スペクトル法による光渦パルスの非線型伝播に関する数値解析を行い、本提案の有用性を明らかにした。また、フェムト秒チタンサファイアレーザー増幅器を光源として用い、軸対称波長板、一軸結晶により超短光渦を発生させ、それを光パラメトリック増幅することにより、 ~ 6 fs、 ~ 60 μJ の光渦パルスの発生に成功した。

B.トポロジカル物質科学・Cトポロジカルデバイス工学

「全角運動量(J)」を有するトポロジカル光波を用いれば、光を照射するだけのトップダウン・プロセスで金属表面から突き出す針状ナノ構造体(金属ナノ針)を創成することができる。この現象を解明するため、また、どこまで細いナノ針が形成できるか検証するため、対物レンズの NA を変えながら作製した金属ナノ針の構造解析と組成分析を走査型電子顕微鏡(SEM)によって行った。

対物レンズの NA を大きくしていくに従い、加工痕中央に形成される金属ナノ針は細くなる。NA=0.18 で高さ 8 μm 、先端曲率 36 nm の極細金属ナノ針が創成できた(図 3)。金属ナノ針の EDX スペクトルは金属基盤の EDX スペクトルと完全に一致する。また、タングステン電流プローブをナノ針に接触させて、電気抵抗を計測したところ 0.96 Ω という値を得た。これらのことからナノ針はほぼ完全な金属であり、電界放出型電極などに応用できることが分かった。現在、北大が開発したサブピコ秒から準モノサイクルに至る超短パルス・トポロジカル光波(光渦)を用いたレーザーアブレーションに着手している。これにより、金属ナノ針形成における時間発展が解析できる。

光渦を用いたポンプ・プローブ四光波混合信号に対する軌道角運動量スペクトル分解測定法を確立した。さらに、ポンプ・プローブ軌道角運動量・全角運動量変換法によるキャリアダイナミクス観測を行った。光渦によって励起された励起子は、その軌道角運動量を ~ 1.5 ps の位相

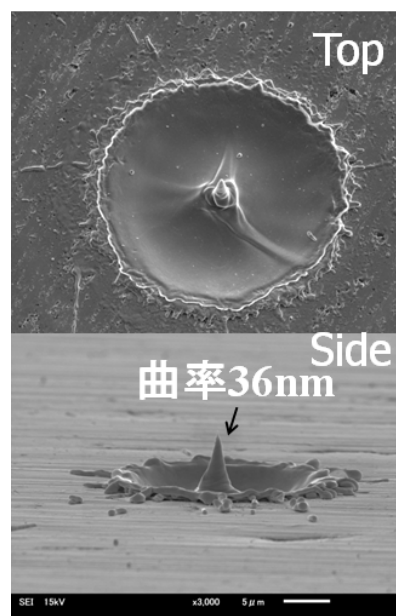


図 3 加工痕(ナノニードル)の SEM 画像。上は垂直方向に成長、下は側面図。

緩和時間内で保持していることを明らかにした。また、励起子を介した光－光軌道角運動量変換にも成功している。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. Masaki Koichi, Katsuhiko Miyamoto, Shuto Ujita, Takefumi Saito, Takashige Omatsu, “Dual-frequency picosecond optical parametric generator pumped by a Nd-doped vanadate bounce laser”, Optics Express, vol. 19, No. 19, pp.18523-18528, 2011 (DOI:10.1364/OE.19.018523)

2. Mio Koyama, Tetsuya Hirose, Masahito Okida, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, “Nanosecond vortex laser pulses with millijoule pulse energies from an Yb-doped double-clad fiber power amplifier”, Optics Express, vol. 19, No. 15, pp.14420-14425, 2011 (DOI:10.1364/OE.19.014420)

3. Katsuhiko Miyamoto, Sachio Miyagi, Masaki Yamada, Kenji Furuki, Nobuyuki Aoki, Masahito Okida, Takashige Omatsu, “Optical vortex pumped mid-infrared optical parametric oscillator”, Optics Express, vol. 19, No. 13, pp.12220-12226, 2011 (DOI:10.1364/OE.19.012220)

4. Mio Koyama, Tetsuya Hirose, Masahito Okida, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, “Power scaling of a picosecond vortex laser based on a stressed Yb-doped fiber amplifier”, Opt Express, vol. 19, No. 2, pp.994-999, 2011 (DOI:10.1364/OE.19.000994)

5. Takashige Omatsu et.al. “The current trend of SBS and phase conjugation,” Laser and Particle Beams, 30, No. 1, pp.117 – 174 (2012). (DOI:10.1017/S0263034611000644)

(3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 1 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)