

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カイラル・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

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

光波の「全角運動量(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(m)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(s)の量子力学的なベクトル和( $j=m+s$ )で与えられる光パラメータである。ここでは「全角運動量(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(m)とスピン角運動量(s)のベクトル和で与えられる「全角運動量(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(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。昨年度、この手法を用いて平均出力 40W のピコ秒パルス・トポロジカル光波の発生に成功した。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効率にトポロジカル光波を発生させる必要がある。本年度は、ピコ秒パルス・トポロジカル光波の第二高調波発生を行った。非臨界位相整合可能でかつ光損傷しきい値の高いLiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>結晶を用いて変換効率26%(基本波20Wに対して第二高調波5.3W)を達成した。また、第二高調波発生に際してトポロジカル光波のトポロジカルチャージが2倍になることを実験的に明らかにした。

さらに、励起光に1 $\mu$ mトポロジカル光波を用いた光パラメトリック発振器によって、2 $\mu$ m帯トポロジカル光波発生を行っている。励起光のトポロジカルチャージがそのままシグナル光へ移譲する共振器構成を発見し、2mJを超える2 $\mu$ m帯トポロジカル光波の発生に成功した。波長同調域は1960-2160nmである(図1)。アイドラー光はガウスモードとなるので、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、10-20 $\mu$ m帯でトポロジカル光波を発生させることが可能になる。(Opt. Express, 20, No. 9, (2013) pp. 9810-9818.)

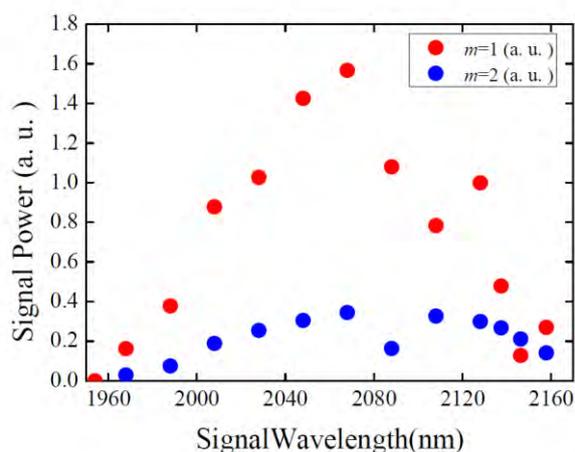


図1 2 $\mu$ mトポロジカル光波の波長同調特性。

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トポロジカル光波を種光としてパラメトリック増幅を行った。この方法を用いると、トポロジカル光波発生用素子の光損傷を避

けることができ、自在なトポロジカル光波が発生できる。具体的には、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、軸対称波長板、一軸結晶を用いて超短光渦を発生させ、光パラメトリック増幅することにより、 $\sim 6$  fs,  $\sim 60$   $\mu$ J の超短広帯域光渦パルスの発生に成功した(Opt. Express 20, No. 17, (2012) 18986-18993)。また、軌道角運動量が自在制御された光渦の光パラメトリック増幅にも成功した。

## 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、トポロジカル光波の波面の螺旋性に注目し実験を行った。その結果、金属ナノ針は螺旋構造(カイラリティー)をしており、その螺旋構造の向きがトポロジカル光波の螺旋性の符号によって時計回り、反時計回りに制御できることがわかった(Nano Lett., 12, No. 7, (2012) pp. 3645-3649)。さらに、「全角運動量( $j$ )」の絶対値を変調すれば、螺旋構造体の螺旋の巻数が制御できることも明らかになった(Phys. Rev. Lett. (in press))。(これ以降、金属ナノ針をカイラルナノニードルと呼ぶ。)これらの実験結果は、「レーザー照射時に溶融した金属とトポロジカル光波の「全角運動量」が相互作用し、カイラルナノニードルを形成する」ことを示す大きな成果である。今後、カイラルナノニードル形成に至る時間ダイナミクスを明らかにする。

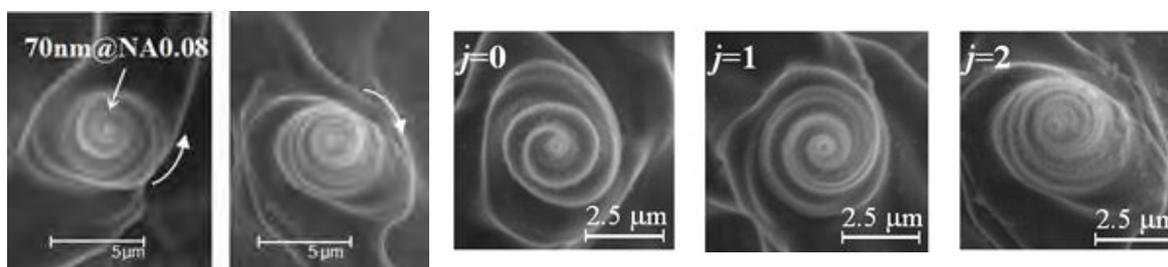


図2 螺旋性を持つ $1\mu\text{m}$ 光によってできた螺旋構造体(カイラルナノニードル)のSEM画像。左の2つの画像は光の螺旋性の向きを変えた時にできるカイラルナノニードル。カイラルナノニードルの螺旋の向きが反時計回り、時計回りになっていることがわかる。右の3つの画像は光の螺旋性の絶対値 $j$ を変えた時のカイラルナノニードル。 $j$ が大きくなるにつれて螺旋構造が密になることが分かる。

また、光渦を用いたポンプ・プローブ軌道角運動量・全角運動量変換に基づくキャリアダイナミクス観測法において、軌道角運動量 $m=0$ の成分が軌道角運動量スペクトル測定に大きな影響を与えることが明らかになった。そこで、軌道角運動量 $m=0$ を含まない光渦パルスを用いた高精度全角運動量変換法による半導体励起子キャリアダイナミクスの観測を行った。さらに、超広帯域光渦に適用できる軌道角運動量スペクトル測定法を提案し、精度良く軌道角運動量スペクトルを求めることにも成功している。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表(公開)

- 論文詳細情報

1. K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Transfer of light helicity to nanostructures," *Phys. Rev. Lett.*, 2013. (in press)
2. K. Shigematsu, Y. Toda, K. Yamane, R. Morita, "Orbital angular momentum spectral dynamics of GaN excitons excited by optical vortices", *Jpn. J. Appl. Phys.* 2013. (in press)
3. T. Yoshino, H. Seki, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Efficient high-quality picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> bounce laser system", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 30, No. 4, pp.894-897, 2013. (DOI: 10.1364/JOSAB.30.000894)
4. A. M. Mahjoub, A. Nicol, T. Abe, T. Ouchi, Y. Iso, M. Kida, N. Aoki, K. Miyamoto, T. Omatsu, J. P. Bird, D. K. Ferry, K. Ishibashi, Y. Ochiai, "GR-FET application for high frequency detection device", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 8-22, 2013. (DOI:10.1186/1556-276X-8-22)
5. K. Miyamoto, A. J. Lee, T. Saito, T. Akiba, K. Suizu, T. Omatsu, "Broadband terahertz light source pumped by a 1  $\mu$ m picosecond laser", *Appl. Phys. B*, Vol. 110, No. 3, pp.321-326, 2013. (DOI: 10.1007/s00340-013-5359-8)
6. K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Ultrashort optical-vortex pulse generation in few-cycle regime", *Opt. Express*, vol. 20, No. 17, pp. 18986-18993, 2012. (DOI: 10.1364/OE.20.018986)
7. T. Yusufu, Y. Tokizane, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Tunable 2- $\mu$ m optical vortex parametric oscillator", *Opt. Express*, Vol. 20, No. 9 , pp.9810-9818, 2012. (DOI: 10.1364/OE.20.023666)
8. K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu, "Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures", *Nano Lett.*, Vol. 12, No. 7,

pp.3645-3649, 2012. (DOI: 10.1021/nl301347j)

9. G. M. Bonner, H. M. Pask, A. J. Lee, A. J. Kemp, J. Wang, H. Zhang, T. Omatsu, “Measurement of thermal lensing in a CW BaWO<sub>4</sub> intracavity Raman laser”, *Opt. Express*, Vol. 20, No. 9, pp.9810-9818, 2012. (DOI: 10.1364/OE.20.009810)
10. G. M. Thomas, T. Omatsu, M. J. Damzen, “High-power neodymium-doped mixed vanadate bounce geometry laser, mode locked with nonlinear mirror”, *Appl. Phys. B*, Vol. 108, No. 1, pp.125-128, 2012. (DOI: 10.1007/s00340-012-4976-y)
11. T. Omatsu, M. Okida, A. Lee, H. M. Pask, “Thermal lensing in a diode-end-pumped continuous-wave self-Raman Nd-doped GdVO<sub>4</sub> laser”, *Appl. Phys. B*, Vol. 108, No. 1, pp.73-79, 2012. (DOI: 10.1007/s00340-012-4919-7)

### (3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)