

テラヘルツ領域における周波数可変高次光渦の発生

鶴丸 将平¹, 戸部 雄輝¹, 野村 陸¹, 井上 一馬¹, 辻 将太¹,
宮本 克彦^{1,2,*}, 尾松 孝茂^{1,2}

¹千葉大院融合理工 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-13)

²千葉大分子キラリティー研 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-13)

Frequency-versatile terahertz vortex generation based on difference frequency generation

Shohei TSURUMARU¹, Yuki TOBE², Riku NOMURA¹, Kazuma INOUE¹, Shota TSUJI¹,
Katsuhiko MIYAMOTO^{1,2}, and Takashige OMATSU^{1,2}

¹Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

²Molecular Chirality Research Center, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

*k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

Abstract: We demonstrate the generation of high-order tunable terahertz (THz) vortices ($\ell_{\text{THz}} = \pm 2$) with high quality in a pure mode by employing soft-aperture difference frequency generation (DFG) of vortex and Gaussian modes. THz vortex outputs exhibit a pure orbital angular momentum (OAM) mode with a topological charge of $\ell_{\text{THz}} = \pm 2$ in a frequency range of 2-6 THz. The maximum average power of the THz vortex output obtained was $\sim 3.3 \mu\text{W}$ at 4 THz.

Key Words: Terahertz (THz) vortices, Difference frequency generation (DFG)

1. 研究概要

光渦¹⁾は螺旋波面を有する光波の総称で、光の進行方向とエネルギー束の流れであるポインティングベクトルの向きが一致せず、その射影成分としてビーム断面内に軌道角運動量が生じる。これは周回方向における周期的境界条件によって量子化され、トポロジカルチャージ(光渦次数 $\ell = \pm 1, 2, \dots$)によって特徴づけられる。螺旋状ニードルの形成²⁻³⁾・超高速通信⁴⁾・超解像顕微鏡⁵⁾など多岐にわたる応用が研究されている。特にテラヘルツ領域における光渦は、物性評価やテラヘルツ通信において特に注目を集めている。われわれはこれまでに、テラヘルツ用 Tsurupica 螺旋型位相板(SPP)を用いた高効率テラヘルツ光渦発生⁶⁻⁷⁾、差周波発生を利用した高純度テラヘルツ光渦の発生⁸⁾を実現している。本研究では、高純度な高次モード($\ell=2$)の発生を目的とし、周波数同調に加えトポロジカルチャージの符号制御を行った。

2. 実験光学系

構築した実験光学系を Fig. 1 に示す。励起レーザーには、自作の高平均出力ピコ秒レーザー(波長 1064nm、繰り返し周波数 1MHz、パルス幅 7.4ps)を用いている。テラヘルツ光渦発生のため波長可変 1.5 μm 帯 2 波長光源を構築した。PPSLT 結晶(fan-out 型)に外部共振器型半導体レーザー ECLD(線幅 $< 0.1\text{nm}$)を同一光軸上に入射させ、光パラメトリック増幅により 1.5 μm 帯 2 波長光を発生させている。波長固定 $\lambda_1 = 1.56\mu\text{m}$ 光を螺旋位相板により 1 次および 2 次の光渦に変換した。また、PPSLT 結晶は fan-out 型であり、ビームの入射位置を変えることで波長可変が可能である。もう一方はコンピューターによる自動制御可能なステージに乗せ、位相整合条件を満

たし ECLD と連動させることで $\lambda_2 = 1.51 \sim 1.64\mu\text{m}$ (線幅 $< 1\text{nm}$ 、ガウスビーム)の間で波長可変な 1.5 μm 帯 ガウスビームとした。これら 2 つのビームを DAST 結晶上で時間・空間的に重ね合わせ、差周波発生を行うことでテラヘルツ光渦を得る。この際、トポロジカルチャージ保存則を満足しながらテラヘルツ光渦が発生し、ガウスビームの次数が 0 であるため励起光と同じく 1 次、2 次のテラヘルツ光渦が得られる。更に、固定波長と可変波長の大小が入れ替わることでトポロジカルチャージの符号の逆転が起こり、符号制御も可能にした。

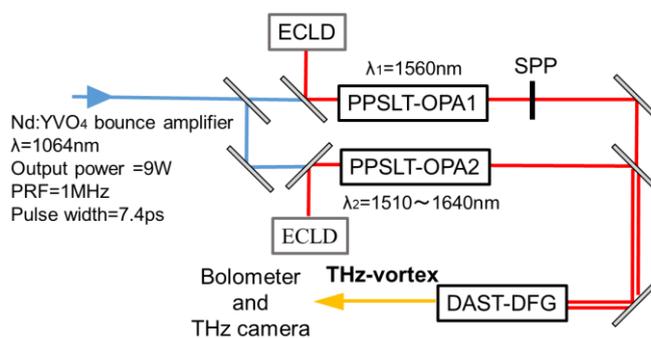


Fig.1 Experimental setup of tunable THz vortex generation.

3. 実験結果

差周波光渦発生によって得られたテラヘルツ光渦の同調曲線を Fig. 2 に示す。周波数同調範囲は 2~6THz($\ell = \pm 1, \pm 2$)であり最大出力は 4THz 発生時において 3.3 μW であった。Fig. 3 に観測された 4THz($\ell = \pm 1, \pm 2$)のビームプロファイルを示す。本手法の場合、Tsurupica 螺旋型位相板(SPP)による発生

と比較し同径方向の高次モードが抑制されていることが分かる。1.5 μm 帯励起 2 波長光の光渦とガウスビームを DAST 結晶上で空間的に重ねる際に、ガウスビームが空間アパーチャーとして働く。このため、 $\ell=\pm 2$ においても高純度な光渦の発生に成功した。テラヘルツ光渦のトポロジカルチャージの同定には、光渦の円筒対称形を崩すことで簡便に確認できる。エリミートガウスモードのスーパーポジション、つまり x および y 方向の線形和が観測でき、これにより得られる暗線の数がトポロジカルチャージに対応する。さらに暗線の傾きの向きの違いから、トポロジカルチャージの符号が反転していることがわかる。

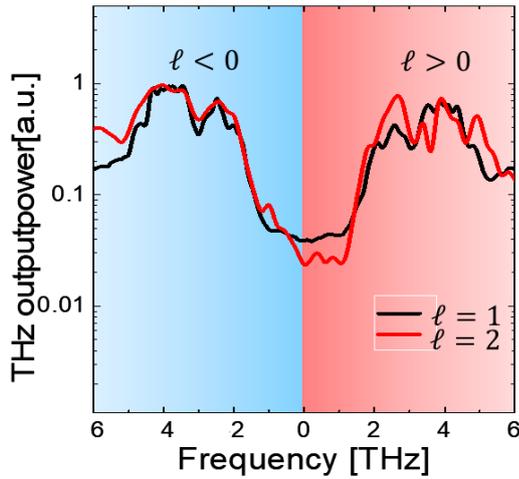


Fig.2 Frequency tunability of the THz-vortex outputs

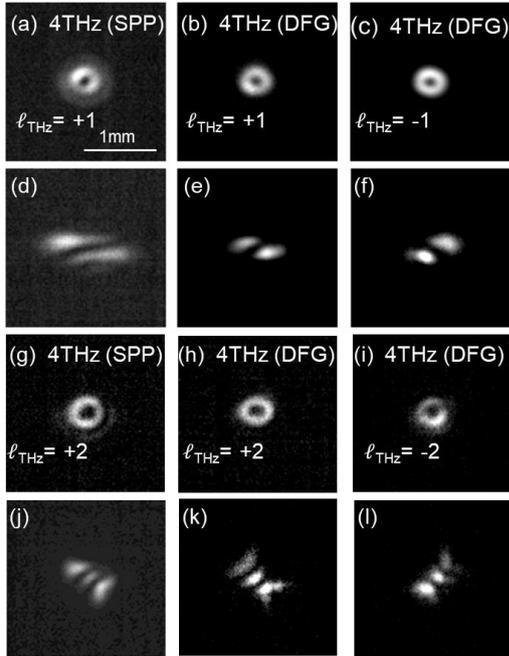


Fig.3 Spatial profiles of the 4THz ($\ell=1,2$) vortex output focused by a conventional lens (a)-(c), (g)-(i), and a tilted lens (d)-(f), (g)-(l)

4. まとめ・今後

構築した 1.5 μm 帯 2 波長光源を用い、差周波発生によるテラヘルツ光渦発生を行った。差周波発生を用いることで、高純度で高次数テラヘルツ光渦発生に成功した。周波数同調範囲は 2~6THz($\ell=\pm 1, \pm 2$)を達成し、同時にトポロジカルチャージの符号制御も可能とした。今後は、さらなる高出力化および 3 次以上の高次数テラヘルツ光渦発生を行い、物性制御、および軌道角運動量をパラメーターとした新奇テラヘルツ光渦分光への応用を目指し光源開発を行う予定である。

5. 参考文献

- 1) L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *Phys. Rev. A* 45(11), 8185–8189 (1992).
- 2) K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, and T. Omatsu, "Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures," *Nano Lett.* 12(7), 3645–3649 (2012).
- 3) T. Omatsu, K. Miyamoto, K. Toyoda, R. Morita, Y. Arita, and K. Dholakia, "A New Twist for Materials Science: The Formation of Chiral Structures using The Angular Momentum of Light," *Adv. Opt. Mater.* 7(14), 1801672 (2019).
- 4) A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, and S. Ashrafi, "Optical communications using orbital angular momentum beams," *Adv. Opt. Photonics* 7(1), 66 (2015).
- 5) M. Kamper, H. Ta, N. A. Jensen, S. W. Hell, and S. Jakobs, "Near-infrared STED nanoscopy with an engineered bacterial phytochrome," *Nat. Commun.* 9(1), 4762 (2018).
- 6) K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, and T. Omatsu, "Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate," *Appl. Phys. Lett.* 104, 261104 (2014).
- 7) K. Miyamoto, B. J. Kang, W. T. Kim, Y. Sasaki, H. Niinomi, K. Suizu, F. Rotermund, and T. Omatsu, "Highly intense monocycle terahertz vortex generation by utilizing a Tsurupica spiral phase plate," *Sci. Rep.* 6, 38880 (2016).
- 8) K. Miyamoto, K. Sano, T. Miyakawa, H. Niinomi, K. Toyoda, A. Vallés, and T. Omatsu, "Generation of high-quality terahertz OAM mode based on soft-aperture difference frequency generation," *Opt. Express* 27(22), 31840 (2019).