

テラヘルツ光渦の発生

宮本 克彦^{1,2}、尾松 孝茂^{1,2}

¹千葉大学大学院融合、²千葉大学分子キラリティー研究センター

k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

1. はじめに

位相が一意に決まらない位相特異点に由来する螺旋状波面を持つ光渦は、エルミート・ガウスビームにはない、ドーナツ型強度分布・軌道角運動量というユニークな特徴を示す[1](図 1)。円筒座標系における近軸固有解であるラゲール・ガウスビームは代表的な光渦として知られ、1 波長伝搬するごとに位相が 2π の整数(光渦の次数であるトポロジカルチャージ ℓ ($\ell=1, 2, 3, \dots$)) 倍だけ回転する周期的境界条件を満たすため、軌道角運動量の大きさは ℓ に比例し、 ℓ の符号は螺旋波面の回転方向を表わす。応用例として、光渦モードの空間多重通信[2]、2014 年にノーベル化学賞を受賞した STED 顕微鏡(Stimulated Emission Depletion Microscope)[3]などが挙げられる。さらに、われわれはレーザー加工に光渦を用いることで波面の螺旋性が金属・半導体・有機材料に転写されることを世界で初めて実証した[4-6]。現在では、様々な物質の吸収波長に対応できるように、紫外域から中赤外における光渦の発生に成功している(図 2)。

特に、分子群の大振幅振動に相当するテラヘルツ帯で光渦の発生を実現できれば、生体分子のカイラル構造体・高分子結晶の構造的カイラリティー制御・超解像テラヘルツ顕微分光などの様々な応用が期待できる。しかし、これまでテラヘルツ帯で使用できる実用的な位相板は存在しなかった。われわれは、テラヘルツ帯で屈折率分散の少ない Tsurupica 樹脂を用いて光渦を発生できる螺旋型位相板を開発し、高効率なテラヘルツ光渦の発生に成功した[7]。

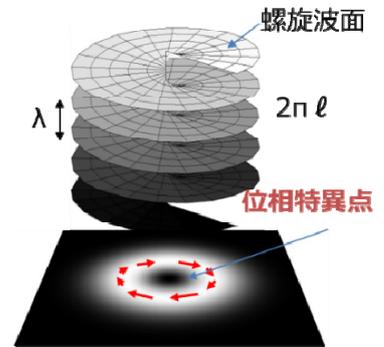


図 1 光渦の概念図

2. テラヘルツ用螺旋位相板

光渦を発生させる方法は、例えば、空間位相変調器などホログラムを活用する方法、マルチモード光ファイバーを使用する方法がある。しかしテラヘルツ帯で実現できる素子は存在せず、これらの方

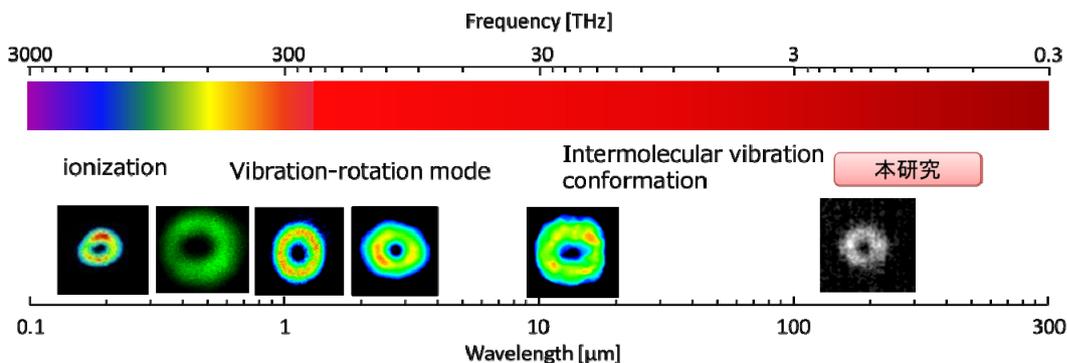


図 2 本研究室における光渦発生周波数帯域

法は適さない。最も簡便で有効な方法は、テラヘルツ帯における螺旋位相板を用いた波面変換である。螺旋位相板は、光軸の周回方向に沿って 2π の整数倍だけ位相シフトを波面に与える素子である。われわれは、Tsurupica 樹脂に着目しテラヘルツ用螺旋型位相板を開発した。この材料は、テラヘルツ帯および可視域において高い透明性(図 3(a))を示す。さらに、最も大きな特徴は屈折率の周波数分散が非常に小さい(屈折率 $n=1.52 @ 0.1-6\text{ THz}$) ことである。開発したテラヘルツ用連続螺旋型位相板の写真を図 3(b)に示す。周波数 2 THz において光渦の次数 $\ell=1$ となるよう設計し、方位角方向で厚みが同じになるよう機械研磨により作成した。段差厚み約 290 μm 、設計値との誤差は約 $\pm 1\%$ 以下である。

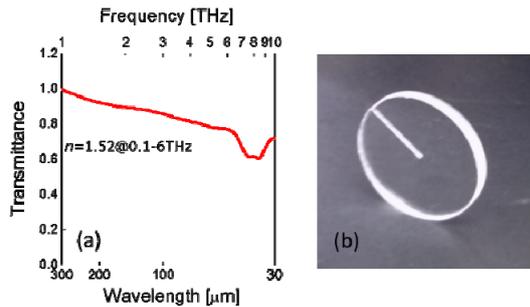


図 3 (a) Tsurupica 樹脂の透過率
(b)テラヘルツ位相板

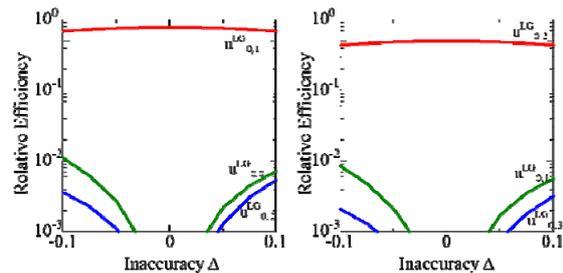


図 4 位相板を用いた際のテラヘルツ光渦のモード解析シミュレーション

螺旋位相板を用いる場合、位相のみを変調していることから、固有モードである 1 次のラゲールガウスモードへの変換効率は最高でも 78% 程度であり、動径方向に高次のラゲールモードが発生する。位相板を用いてテラヘルツガウス光からテラヘルツ光渦を発生させた際の、モード解析シミュレーションを図 4 に示す。ある周波数に対して設計した位相板における相対誤差 Δ と、ガウスビームから変換されるラゲールガウスモードの変換効率を示している。相対誤差 Δ が ± 0.1 以下の場合、 $\ell=1$ におけるテラヘルツ光渦の変換効率は 70% 以上である。また、高次の不要なモードへの変換効率は 1% 以下とほぼ無視することができ、高効率なテラヘルツ光渦の発生が実現できることがわかる。さらに、Tsurupica 樹脂はテラヘルツ帯で屈折率分散が少ないため、2 THz 用の螺旋位相板を 4 THz、6 THz でも使用可能である。この場合、螺旋位相板によって変換されたラゲールガウスモードの純度は低下する。これは $\ell > 1$ のラゲールガウスモードの中央部に現れる暗点部分が大きくなるためである。4 THz では 2 次 ($\ell=2$) のラゲールガウスモードへの変換効率は $\sim 50\%$ 、6 THz では 3 次 ($\ell=3$) のラゲールガウスモードへの変換効率は 30% 以下になる。

3. テラヘルツ光渦の発生

螺旋位相板の性能を定量評価するため、周波数線幅の狭い(周波数同調可能な)テラヘルツ光源を開発した。1 μm 帯ピコ秒励起レーザー、光パラメトリック増幅器(Optical parametric amplifier, OPA)による 1.5 μm 帯 2 波長光、4-ジメチルアミノ-N-メチル-4-スチルバズリウムトシレート結晶(DAST)によるテラヘルツ差周波発生部と、3 つの構成からなる。周期分極反転ストイキオメトリックリチウム酸タンタル結晶(fan-type PPSLT)と外部共振器型半導体レーザーによる 1.5 μm 帯 2 波長光を、DAST 結晶に入射し差周波としてテラヘルツ光を発生させている。テラヘルツ光の周波数は fan-out 型 PPSLT 結晶(結晶温度は一定)の位置ずらしに伴う分極周期変調によって 1-15 THz の範囲で可変であり、その線幅は $\sim 120\text{ GHz} @ 2.6\text{ THz}$ であった。発生周波数 3~7、9~11.5 THz において mW レベルの平均出力を有し、最高出力は $\sim 3\text{ mW}$ (4.3 THz) を達成した。テラヘルツ光の空間モードはガウスモードである。

十分コリメートされたテラヘルツ光の光路に開発した螺旋位相板を配置して光渦を発生させ、発生したテラヘルツ光渦の空間強度分布をテラヘルツカメラで計測した。図5は、それぞれのテラヘルツ周波数に対応して、テラヘルツガウス光およびテラヘルツ光渦のビームプロファイルを示している。本実験では位相板を固定のままテラヘルツガウス光の周波数を2 THzと4 THzに同調させることで、光渦次数 $\ell=1$ および2のテラヘルツ光渦の発生に成功した。Tsurupica樹脂の特徴から、光源の発生テラヘルツ周波数を変化させるだけで、光渦次数の異なる光渦の発生が可能であった。テラヘルツ光渦のビームプロファイルは、光渦特有のドーナツ型の強度分布を示し、波面中央部に位相が一意に決まらない特異点を有している。2 THz、 $\ell=1$ のテラヘルツ光渦の場合、約1 mmの環状ビームに対して、位相特異点の大きさはテラヘルツ波長 $150 \mu\text{m}$ (2 THz)より小さく約 $100 \mu\text{m}$ であった。

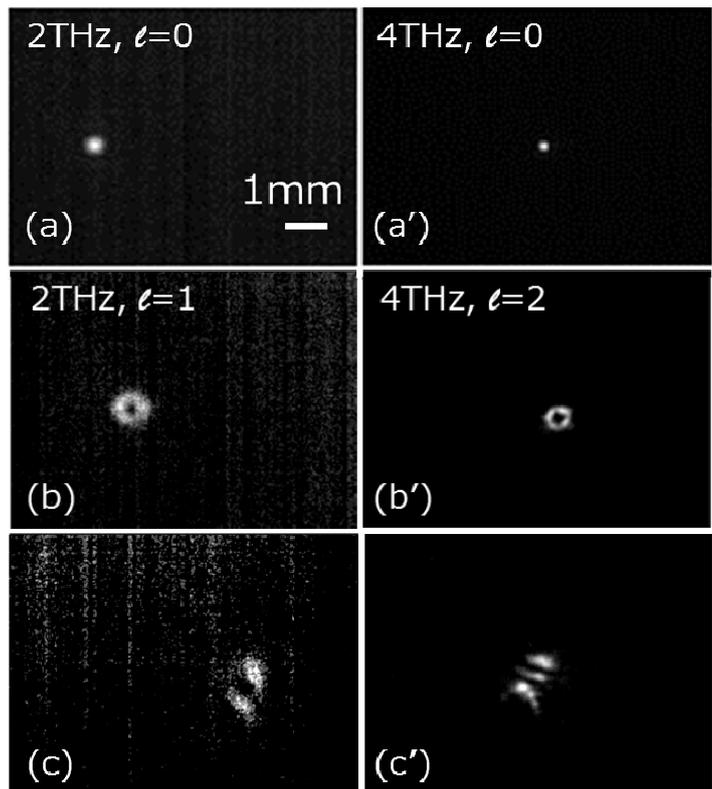


図5 2および4 THzのテラヘルツガウスビームおよびテラヘルツ光渦のビームプロファイル

テラヘルツ光渦の次数を計測するには、レンズを傾けて集光する。傾けたレンズのように円筒座標系の対称性がくずれた光学系によって、光渦はエルミートガウスモードに変換される。その結果、現れるエルミートガウス光の縦もしくは横方向(レンズの傾ける方向で決まる)の暗線の数から発生した光渦の次数を求めることができる。今回の実験の場合、 $\ell=1$ および2であることが図5(c)、(c')より確認できる。さらに、Gouy位相シフトを応用(ℓ の符号によって近視野から遠視野に向かって回転方向が反転)することで、光渦次数の符号を判別可能である。図6に示すようにテラヘルツ光渦の一部をガラスにより遮光し、この欠損部の伝搬に伴う回転方向の違いから符号が特定できた。

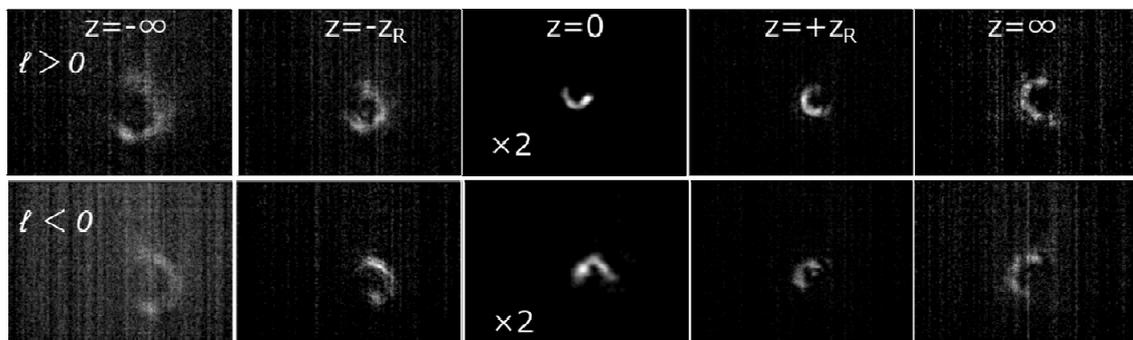


図6 テラヘルツ光渦(4 THz)の一部をガラスで遮光した際のビーム伝搬特性

4. まとめ

本研究では、高効率発生が難しかったテラヘルツ帯における光渦の発生に成功した。テラヘルツ領域において高い透明性を示す Tsurupica 樹脂を用いて螺旋位相板を開発し、周波数可変テラヘルツ光源に応用する事で位相板の性能を定量評価した。テラヘルツ光渦の次数および符号の両方についてテラヘルツカメラを用いた測定により決定した。テラヘルツ発生周波数の同調のみで、異なる次数の光渦発生も実現できた。さらに、開発した位相板は屈折率周波数分散が非常に小さいことから、広帯域テラヘルツ光源への応用も実現可能である。今後、高強度なテラヘルツ光渦を用いて飽和吸収をはじめとする非線形応答を示す材料に適用することで、超高解像テラヘルツ顕微鏡への応用が大きく期待される。また、今回開発したテラヘルツ螺旋型位相板は(有)パックスにより購入可能である。

【参考文献】

- 1) M. Padgett, J. Courtial, L. Allen, *Phys. Today* **57**, 35 (2004).
- 2) J. Wang, J. Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. E. Willner, *Nat. Photon.* **6**, 488 (2012).
- 3) S. Berning, K. I. Willig, H. Steffens, P. Dibaj, S. W. Hell, *Science*, **33**, 551 (2012).
- 4) K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu, *Nano Lett.*, **12**, 3645 (2012).
- 5) F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu, *Sci. Reports*, **6**, 21738 (2016).
- 6) M. Watabe, G. Juman, K. Miyamoto, T. Omatsu, *Sci. Repprts*, **4**, 4281 (2014).
- 7) K. Miyamoto, T. Akiba, K. Suizu, T. Omatsu, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 261104 (2014).