

平成26年7月1日
千葉大学融合科学研究科

テラヘルツ波帯光渦を高効率に発生できる ポリマー螺旋位相板の開発に成功

千葉大学の尾松孝茂教授・宮本克彦准教授のグループは、螺旋波面とドーナツ型の強度分布を持つ光(光渦)をテラヘルツ波帯で高効率に発生できる螺旋位相板を簡易な機械研磨技術で開発することに世界で初めて成功しました。本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業の一環として行われたものです。

光渦は、走査型レーザー顕微鏡の空間分解能を回折限界以下に向上できる光です。これまで光渦の発生は主として可視～近赤外で行われていました。

分子の指紋領域と呼ばれるテラヘルツ波帯は、様々な物質が強い吸収を示す波長域です。その特徴を活かした薬物検査やキュリティー検査や分子分光などのイメージング技術(テラヘルツ波イメージング)が注目を集めています。しかしながら、波長の長いテラヘルツ波では、空間分解能が実用化に向けた大きな技術的壁でした。

テラヘルツ波帯で光渦が高効率に発生できれば、テラヘルツ波イメージングにおいて回折限界を超えたマイクロメートルスケールの高い空間分解能を実現できます。また、光渦は、物質を螺旋構造体へ変形できることが知られています。したがって、テラヘルツ波帯における物質科学にも貢献が期待できます。

本研究では、テラヘルツ波帯で光渦を発生させるための螺旋型位相板を *Tsurupica* と呼ばれるポリマー樹脂を機械研磨することで開発しました。この螺旋位相板はテラヘルツ波帯で85%以上の高い透過率を示し、60%以上の高い効率でテラヘルツ波を光渦へ変換することができます。

本研究成果は、2014年6月30日(米国東部時間、日本時間7月1日)発行(予定)の米国物理学協会の学術雑誌 *Applied Physics Letters* にオンライン版で公開されます。また、本研究で使用した螺旋位相板は有限会社パックス(調布市)から購入できます。

＜研究の背景と経緯＞

光渦とは、螺旋状の波面とドーナツ型の強度分布を有する光波の総称です。光渦の応用には、超解像顕微鏡や空間多重通信や物質の構造制御などがあります。

分子の指紋領域と呼ばれるテラヘルツ波帯(0.1～20THz)の光を用いたイメージング技術は分子分光・医療診断・セキュリティー・非破壊検査などにおける新しいイメージング技術として期待されています。しかしながら、光波の未踏波長であるテラヘルツ波帯では、波面や位相を積極的に制御する技術が未成熟で、光渦に関する研究はほとんどありませんでした。

われわれは、テラヘルツ波と可視光に対して透明で機械加工性の良いポリマー樹脂 *Tsurupica* に注目し、機械研磨で螺旋型位相板を開発しました。この螺旋位相板を用いると、テラヘルツ波を高効率にかつ純度の高い光渦へ変換できます。本成果は、テラヘルツ波イメージング技術に大きく貢献すると期待できます。具体的には、ドーナツ型強度分布を活用したテラヘルツ波帯の超解像イメージングなどが挙げられます。

また、光渦の螺旋性を利用することで、分子会合体などのマクロな構造制御も可能になるかもしれません。

＜研究の内容＞

テラヘルツ波光渦の発生装置の模式図を図1に示します。われわれはテラヘルツ波帯で純度の高い光渦を発生させるため、狭線幅波長可変テラヘルツ波光源を開発しました。一般に広く用いられている広帯域テラヘルツ波光源では、波長分散が光渦の純度の低下を招くためです。また、開発したテラヘルツ波光源はテラヘルツカメラのフレームレート(10Hz)よりはるかに高速繰り返しパルス動作が可能であるため、光渦の強度分布がカメラで直接計測できます。

また、目に見えないテラヘルツ波のガイド光(可視光)も透過するポリマー樹脂である *Tsurupica* を螺旋型位相板として用いることで、短時間で容易に光渦が発生できるようになりました。今回、螺旋位相板は2THzにおいて一次の光渦が発生するように設計していますが、0.1-6THzの領域で透明で屈折率分散が少ない *Tsurupica* 螺旋位相板は、4THzのテラヘルツ波に対する二次の光渦も発生できます。

2THzの光渦のビームパターンは、歪の少ないドーナツ形です。光渦のビーム直径と比較して位相特異点(中央の暗点部分)の直径は1/5以下で回折限界の20%程度になっています。同じ螺旋位相板を用いて4THzの光渦も発生できます。また、螺旋位相板を裏表反転させると、光渦の次数の符号が反転できます。さらに、発生した光渦を傾けたレンズで集光することで、次数が同定できることも実証しました。(図2、図3を参照)。

＜今後の展開＞

開発したテラヘルツ波帯螺旋型位相板を用いて、テラヘルツ波帯の光渦を高効率に発生することに成功しました。光渦の次数や符号もテラヘルツカメラで直接観測することに成功しました。テラヘルツ波イメージングで問題となる空間分解能を飛躍的に向上できる技術として広く応用が期待できる研究成果です。

本研究成果は、2014年6月30日(米国東部時間、日本時間7月1日)発行(予定)の米国物理学協会の学術雑誌 *Applied Physics Letters* にオンライン版で公開されます。

<参考図>

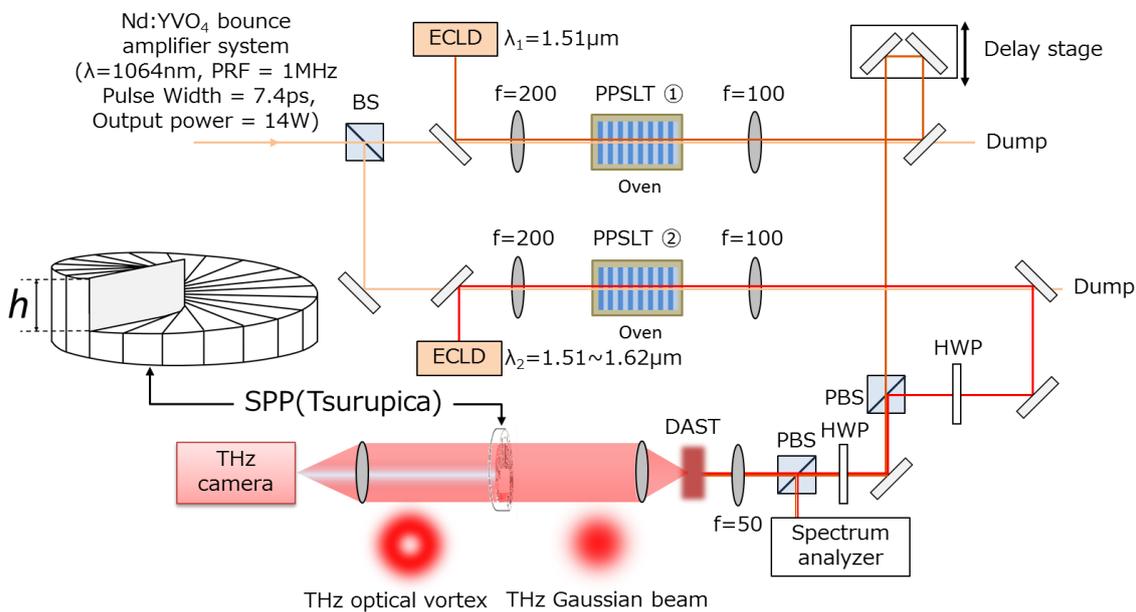


図 1 開発したテラヘルツ波光渦の発生装置の模式図。テラヘルツ波光源の波長可変域は 0.1-15THz である。テラヘルツ波を Tsurupica 螺旋型位相板によって光渦へと変換させる。螺旋型位相板は、方位角方向が同じ高さになるように機械研磨で加工されており、2THz で一次の光渦が発生するように段差を 290 μ m に設計した。

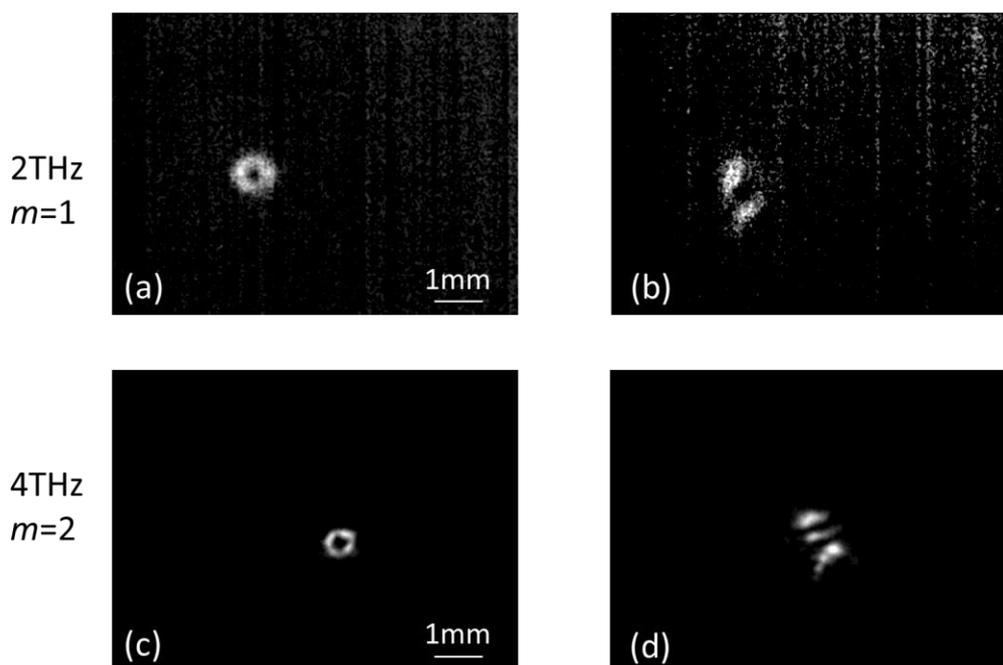


図 2 テラヘルツ波光渦の強度パターン。(a)、(b)は、2THz あるいは 4THz の光渦の強度分布を示している。ドーナツ型の強度分布を示しており、位相特異点に相当する暗点が観測できた。(b)、(d)は、傾けたレンズによって集光した光渦の強度パターン。水平方向の暗い縞の数が光渦の次数に対応している。

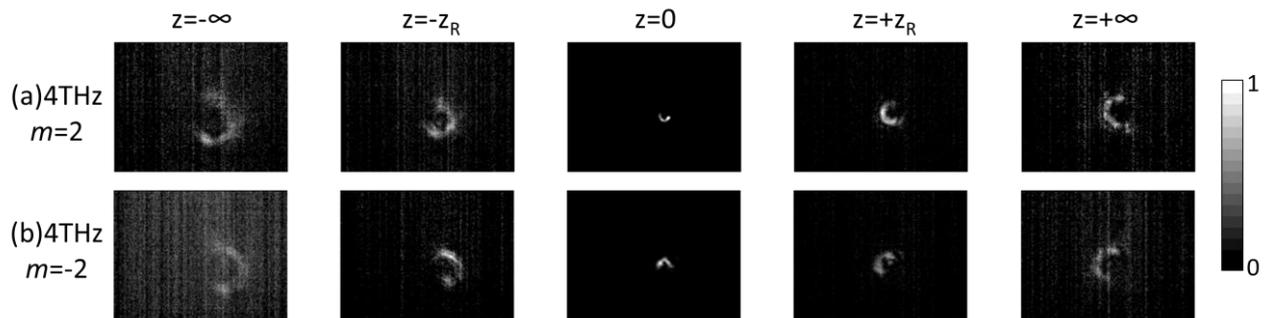


図3 光渦の符号の観測。光渦の符号には、正負がある。光渦の一部を遮蔽し欠けをつくり、空間伝播中の欠けの回転方法で符号が判別できる。(a)、(b)の画像から、光渦の符号がそれぞれ正および負であることが分かる。

<用語解説>

注1) 連続螺旋型位相板 光渦を発生させるための光学素子のこと。位相が、0 から 2π まで変化するように素子の厚みを変化させた光学素子で、方位角方向の高さが一様になっている。光渦の螺旋性 m の値は、用いる波長、位相板の厚み、位相板材料の屈折率により決定される。可視～近赤外域においては、誘電体膜の蒸着や化学的エッチングにより作成されるが、テラヘルツ光領域においては材料の吸収により制限され作成は困難。本研究では、機械加工により連続螺旋型位相板を形成した。

注2) Tsurupica 樹脂 テラヘルツ光領域におけるポリマー製の透明材料のこと。テラヘルツ光領域だけでなく可視光領域においても透明である。さらに、0.1～6THz の範囲においてほとんど分散が無く、屈折率も可視およびテラヘルツ波帯で 1.52 ほぼ一定でテラヘルツ波帯において利便性の高い材料である。

注3) 螺旋波面 光の等位相面である波面が螺旋状になっているものを螺旋波面と呼ぶ。通常のレーザー光の波面は平面であるのに対し、光渦レーザーの波面は螺旋状になる。光の波長に対する螺旋波面のねじれの巻数が m (整数)に対応する。

<論文タイトル>

“Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate”

本件に関するお問い合わせ先
千葉大学 大学院融合科学研究科
宮本 克彦
Tel : 043-290-3471 Fax : 043-290-3471
E-mail : k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp