

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05299

研究課題名(和文)非線形フォトニクスに立脚したテラヘルツ光渦シンセサイザーの開発

研究課題名(英文)High-quality THz OAM mode generation based on difference frequency generation

研究代表者

宮本 克彦 (Miyamoto, Katsuhiko)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20375158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：螺旋状波面に由来する位相特異点と軌道角運動量の特徴とする光を総称して、光渦と呼ぶ。光渦の発生方法は、波面変調素子や位相板などの光学素子を用いるのが一般的である。しかし、これらの発生手法は設計周波数でのみ動作することから、光渦のもつ軌道角運動量を保ったまま周波数を自在に変調できなかった。そこで本研究では、非線形光学効果の一種である差周波発生を用いることで周波数可変なテラヘルツ光渦の発生に成功した。周波数同調範囲は2-6THzであり、4THzにおいて $\sim 3.3\mu\text{W}$ の出力を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非線形フォトニクスに立脚した本手法において、これまで実現できなかったテラヘルツ光渦の周波数可変性を実現した。さらに、軌道角運動量の高純度固有モードを各発生周波数において担保できる点が大きな利点として挙げられる。周波数可変高純度テラヘルツ光渦光源を用いる事で、軌道角運動量を主成分とした新奇テラヘルツ分光など、テラヘルツ領域における光物性研究への新たな応用展開が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated a widely tunable terahertz (THz) vortex generation based on difference frequency generation in combination with a 4th

-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal pumped by 1.5 μm dual-wavelength pump beams having Gaussian and optical vortex profiles. The generated THz vortex output exhibits a high-purity orbital angular momentum mode with a topological charge of $L_{\text{THz}} = \pm 1$ in a frequency range of 2-6 THz. The maximum average power of the THz vortex output reached up to $\sim 3.3\mu\text{W}$ at 4 THz.

研究分野：光量子工学

キーワード：テラヘルツ 光渦 軌道角運動量

1. 研究開始当初の背景

螺旋状波面に由来する円環状の強度分布を持つ光を総称して光渦と呼ぶ。光渦は、方位方向の位相変化を表す項 $\exp(i\ell\phi)$ (ℓ : トポロジカルチャージ) によって特徴づけられる軌道角運動量を、ビーム断面に有する光波である。可視～近赤外領域においては、光マニピュレーション、超解像顕微鏡、大容量空間多重光通信、非線形分光など、数多くの研究が提案・展開されている。特に、われわれは軌道角運動量が引き起こす力学的な物質のキラルな質量移動に注目し、金属・半導体・有機材料がキラルな螺旋構造となることを報告してきた。

テラヘルツ帯で光渦を発生できれば、分子群の大振幅振動や固有振動数に相当し、生体分子のキラル構造化・高分子結晶の構造的キラリティー制御・超解像テラヘルツ顕微分光などの応用が期待できる。われわれはこれまでに、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 (Spiral phase plate: SPP) を開発し、超解像イメージングの可能性を示してきた。しかしながら、螺旋位相板によるテラヘルツ光渦発生では、周波数分散の影響により設計値と異なる周波数のテラヘルツ波に使用すると、モード純度が著しく低下してしまう。そのため、モード純度が高く広帯域で高強度なテラヘルツ光渦の発生は難しかった。本手法では、非線形光学に立脚したテラヘルツ光渦発生を行う事で、周波数可変性と高モード純度を併せ持つテラヘルツ光渦発生が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、近赤外波面変調工学と非線形波長変換を駆使して、テラヘルツ領域において周波数可変かつ固有モード性(モード純度)の高い光渦を任意の周波数で自在に発生できるテラヘルツ光渦シンセサイザーの実現を目的とした。

3. 研究の方法

非線形光学過程である差周波発生法を用いて近赤外光が持つ波面情報をテラヘルツ光へと転写することで、周波数可変テラヘルツ光渦の発生を実現する。具体的には、近赤外域の光渦(波長 λ_1 , $\ell_{\lambda_1} = 1, 2, 3, \dots$)、ガウスビーム(波長 λ_2)の差周波発生を行う。差周波光は両者の光電場の積で与えられるため、その波面はトポロジカルチャージ保存則に従い光渦($\ell_{\text{THz}} = 1, 2, 3, \dots$)になる。図1に、本手法である差周波発生を用いたテラヘルツ光渦発生の様式図を示す。図中の強度分布は、光渦の代表例であるラゲールガウスモード、位相板および本手法によって発生させた場合のシミュレーション結果である。

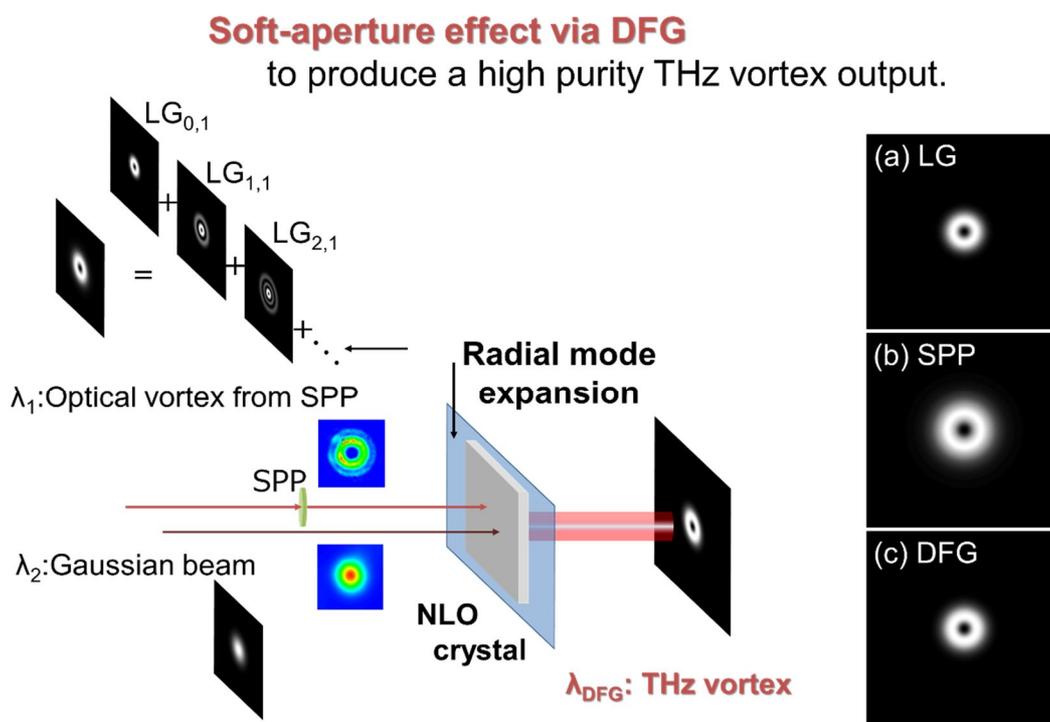


図1 差周波発生を用いた周波数可変高純度テラヘルツ光渦発生の様式図

一般に、光渦はラゲールガウスモードを用いて 式の様に固有モード展開でき、モード純度は 式で与えられる。

$$u_{vortex} = \sum_{p,\ell} a_{p,\ell} u_{p,\ell}^{LG} \dots, \quad \eta_{p,\ell}^{out} = |a_{p,\ell}|^2 \dots$$

ガウスモードを波面変調して光渦を発生させた場合、動径方向(p)の高次モードが必ず発生し、最低次数($p = 0$)であるラゲールガウスモードのモード純度はただかだか78%(1次)、50%(2次)程度にとどまる。ここで、差周波発生による光渦発生と、比較用に螺旋位相板を用いた際のテラヘルツ光渦のモード純度シミュレーションの結果を図2に示す。 λ_2 がソフトアパーチャーとして動作することから、変換効率は励起2波長のビーム径比 $\Omega(\omega_2/\omega_1)$ に依存し螺旋位相板に比べ高純度のテラヘルツ光渦発生が可能となる。

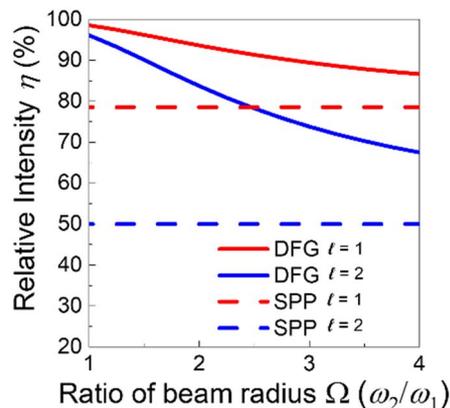


図2 モード純度シミュレーション

4. 研究成果

周波数 2-6THz において $\ell_{THz} = \pm 1$ の光渦発生に成功した。その結果を図3に示す。各周波数におけるテラヘルツ光渦は円環状のドーナツ型であり、位相特異点に起因した強度分布を示している。また、発生するテラヘルツ光渦のキラリティー(トポロジカルチャージの符号)は波長 λ_1 、 λ_2 の大小関係で決まるので、 λ_2 を λ_1 より短波長、あるいは、長波長に反転させるだけで選択できる。すなわち、テラヘルツ光渦の周波数可変とキラリティー制御が波長抜けなくシームレスに実現できた。また、位相板を用いた際に発生する動径方向の高次モードが抑制され、高純度モードのテラヘルツ光渦の発生に成功した。テラヘルツ光渦の同調範囲は、波長 λ_2 の可変域により制限されているが、原理的にはテラヘルツ全域において光渦の発生が可能である。

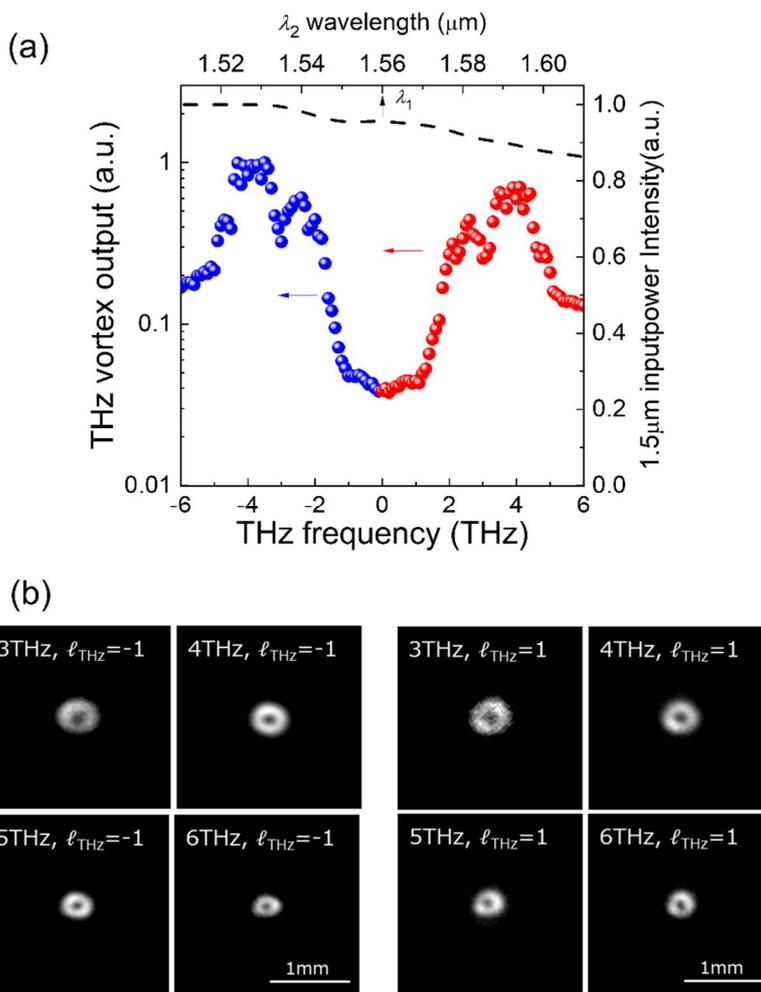


図3 (a)テラヘルツ光渦および励起波長 λ_2 の同調曲線
(b)各テラヘルツ周波数における光渦強度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 宮本克彦、尾松孝茂	4. 巻 31
2. 論文標題 軌道角運動量を有したテラヘルツ光渦の発生とその応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 22-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Katsuhiko Miyamoto, Riku Nomura, Shohei Tsurumaru, Takashige Omatsu	4. 巻 1
2. 論文標題 Tunable terahertz Bessel beams with orbital angular momentum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Continuum	6. 最初と最後の頁 633-640
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTCON.452881	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Adam Valles, Jiahuan He, Seigo Ohno, Takashige Omatsu, Katsuhiko Miyamoto	4. 巻 28
2. 論文標題 Broadband high-resolution terahertz single-pixel imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 28868 ~ 28881
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.404143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Seigo Ohno, Katsuhiko Miyamoto, Shin'ichiro Hayashi, Norihiko Sekine	4. 巻 28
2. 論文標題 Zero-spindle spectral drill: real-time spectral measurement in a fixed Fabry-Perot cavity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22088 ~ 22094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.397238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katuhiko Miyamoto, Kazuki Sano, Takahiro Miyakawa, Hiromasa Niinomi, Kohei Toyoda, Adam Valles, Takashige Omatsu	4. 巻 27
2. 論文標題 Generation of high-quality terahertz OAM mode based on soft-aperture difference frequency generation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 31840 ~ 31840
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.031840	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 辻 将太, 野村 陸, 宮本 克彦, 尾松 孝茂
2. 発表標題 軌道角運動量を有した周波数可変テラヘルツ高次ベッセルビーム
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 辻将太, 野村陸, 大野誠吾, Adam Valles, Peter Kruger, 松浦彰, 宮本克彦, 尾松孝茂
2. 発表標題 テラヘルツ多次元顕微分光システム
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上一馬, 宮本克彦, 尾松孝茂
2. 発表標題 有機非線形光学結晶における熱レンズ効果
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村陸、宮本克彦、尾松孝茂
2. 発表標題 テラヘルツ高次ベッセルビームの発生
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Nomura, K. Miyamoto, T. Omatsu
2. 発表標題 Generation of tunable terahertz Bessel beam with a Tsurupica Axicon lens
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Valles, S. Ohno, T. Omatsu, K. Miyamoto
2. 発表標題 High-resolution terahertz single-pixel imaging for 2D spectral analysis
3. 学会等名 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Adam Valles, Jiahuan He, Taisei Ookawa, Seigo Ohno, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu
2. 発表標題 Broadband terahertz single pixel imaging system
3. 学会等名 SPIE Structured Light at OPIC, Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴丸将平, 戸部雄輝, 野村 陸, 井上一馬, 辻 将太, 宮本克彦, 尾松孝茂
2. 発表標題 テラヘルツ領域における周波数可変高次光渦の発生
3. 学会等名 第38回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Adam Valles, Seigo Ohno, Takashige Omatsu, Katsuhiko Miyamoto
2. 発表標題 High pixel resolution terahertz imaging
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端VII」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村 陸, 鶴丸 将平, 辻 将太, 戸部 雄輝, 井上 一馬, 宮本 克彦, 尾松 孝茂
2. 発表標題 ツルピカアキシコンレンズによるテラヘルツ波ベッセルビーム発生
3. 学会等名 第68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本克彦, 尾松孝茂
2. 発表標題 非線形フォトニクスに立脚した光渦の発生
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会, 第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本克彦、尾松孝茂
2. 発表標題 赤外・テラヘルツ域の光渦発生とその応用
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会Optics&Photonics Japan (OPJ 2019) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu
2. 発表標題 Frequency-versatile terahertz vortex generation
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Microwave/THz science and Applications (MTSA 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Katsuhiko Miyamoto, Fabian Rotermund, Takashige Omatsu
2. 発表標題 Highly intense THz vortex generation and its applications
3. 学会等名 The 7th Advanced Electromagnetics Symposium (AES 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------