

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18712

研究課題名（和文）超高屈折率・無反射な積層材料によるテラヘルツ光渦の発生

研究課題名（英文）Generation of terahertz vortex based on reflectionless metasurface with high refractive index

研究代表者

鈴木 健仁（Suzuki, Takehito）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60550506

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、独自に生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射なメタサーフェスで構成された光渦生成素子により、光渦の生成に取り組んだ。メタサーフェスは誘電体基板の表と裏に対称にカット金属ワイヤーを配置した構造である。積層時の大きな積層ずれの課題が生じたため、接着シートを用いた密着構造の光渦生成素子も着想し、設計し、作製した。独自に生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射なメタサーフェスで構成された光渦生成素子により、光渦特有のドーナツ状の電界強度分布を実験で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波は、5G通信で使われているミリ波よりも高い周波数の電磁波で、6G(Beyond 5G)通信での利用が大きく期待されている。らせん状のテラヘルツ波を使うことで、6G通信で通信速度を大幅に向上できる可能性がある。本研究では、独自に生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射な新材料(メタサーフェス)により、平面状のテラヘルツ波をらせん状のテラヘルツ波に変換することに成功した。

研究成果の概要（英文）：This research showed that an optical element based on a reflectionless metasurface with a high refractive index converts a plane wave to an optical vortex in the terahertz waveband. The metasurface is composed of cut metal wires on the front and back of a dielectric substrate. A structure with adhesive sheets is also designed and fabricated to reduce fabrication errors in lamination. Measurements verified that the optical element based on our original reflectionless metasurface with a high refractive index generates the intensity of an electromagnetic field with a doughnut-like shape.

研究分野：テラヘルツ波工学・アンテナ工学

キーワード：テラヘルツ波 メタマテリアル メタサーフェス 高屈折率材料 極限屈折率材料

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波帯では、次世代の 6G(Beyond 5G)高速無線通信が期待されている。テラヘルツ波を効率的に制御するために必要となる高屈折率な自然材料として、屈折率 3.4 のシリコンや屈折率 3.1 の酸化マグネシウムが知られているが、自然材料は屈折率が高くなると反射率も大きくなる。研究代表者はメタサーフェスにより、偏光特性を有する高屈折率・無反射な材料を独自に生み出してきている。研究開始当初、自ら生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射なメタサーフェスにより、光渦を発生できる可能性を見出しつつあった。

2. 研究の目的

本研究では、独自に生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射なメタサーフェスで構成された光渦生成素子により、光渦の生成に挑戦する。らせん状の波面を有する光渦は、トポロジカルチャージの異なる光渦の多重により、情報を多重化できる。情報の多重化による大容量無線通信をテラヘルツ波帯で実現することで、6G 高速無線通信などの実現に貢献できる。なお、本報告書は研究代表者研究室の安川昂秀君の卒業研究[1]により実施されたものである。

3. 研究の方法

図 1(a)、(b)にそれぞれ設計した中空構造の光渦生成素子の構造と断面図を示す。中空構造の光渦生成素子は、積層間隔 a でメタサーフェスを 4 層積層して構成している。メタサーフェスでは、誘電率と透磁率の両方を制御している。

図 2 に中空構造の 4 層積層メタサーフェスの周期構造モデルを示す。図 2 の周期構造モデルを用いて、中空構造の 4 層積層メタサーフェスのカット金属ワイヤーの長辺の長さ l と長辺方向の間隔 g を変化させた場合の解析を行った。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。解析周波数は 0.312 THz である。解析したパラメータは $l=200\text{-}350\ \mu\text{m}$ 、 $g=10\text{-}350\ \mu\text{m}$ 、 $w=54\ \mu\text{m}$ 、 $s=86\ \mu\text{m}$ 、 $d=50\ \mu\text{m}$ 、 $t=0.5\ \mu\text{m}$ である。ここで、 l 、 g 、 w 、 s 、 d 、 t は、それぞれカット金属ワイヤーの長辺の長さ、長辺方向の間隔、短辺の長さ、短辺方向の間隔、誘電体基板の厚さ、カット金属ワイヤーの厚さである。積層したメタサーフェス間で起こる多重反射の影響を減らすため、積層間隔 a は 0.3 THz の 1 波長の距離である 1 mm とした。

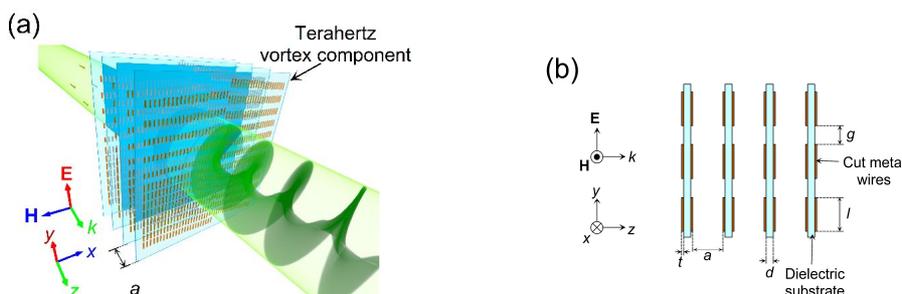


図 1 設計した中空構造の光渦生成素子の(a)構造、(b)断面図

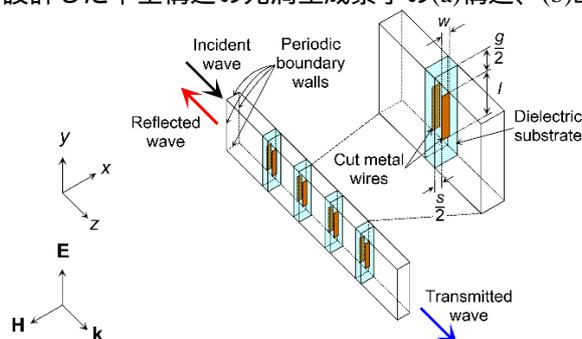


図 2 中空構造の 4 層積層メタサーフェスの周期構造モデル

図 3(a)-(c)にそれぞれ中空構造の 4 層積層メタサーフェスの透過位相遅れ、透過率、反射率の解析結果を示す。図 3(a)-(c)の白点は中空構造の光渦生成素子の設計に用いたパラメータである。今回、設計に用いた中空構造の 4 層積層メタサーフェスは 76% 以上の透過率、22% 以下の反射率を有する。図 3(a)-(c)より、中空構造の 4 層積層メタサーフェスは 70% 以上の高い透過率を有するパラメータで、360 度の位相を制御できることを確認した。

図 4(a)-(d)に、理想の透過位相遅れ、設計した中空構造の光渦生成素子の透過位相遅れ、透過率、反射率の分布を示す。図 4(a)の理想の透過位相遅れの分布は、受信側から見て、時計回りで透過位相遅れが離散的に大きくなる分布である。図 4(a)の理想の透過位相遅れの分布と誤差 ± 5 度以下となるように、図 3(a)-(c)の白点の中空構造の 4 層積層メタサーフェスを配置し、平面波

をトポロジカルチャージ $m=1$ の光渦に変換する光渦生成素子を設計した。トポロジカルチャージ m は、符号で光渦の回転方向を、値で 1 波長伝搬することの位相の回転数($m \times 2\pi$)を示している。ここでは、光渦が受信側から見て反時計回りに回転する場合を正とする。

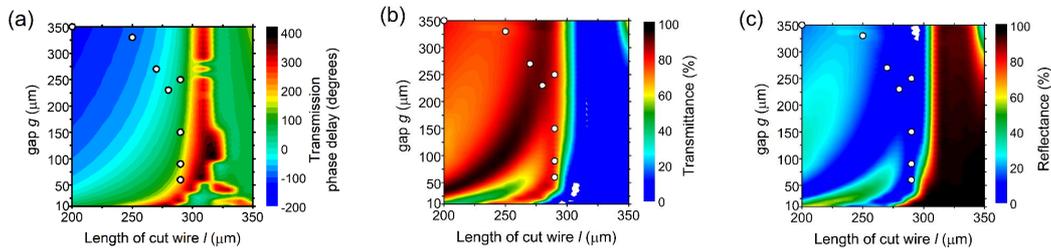


図 3 中空構造の 4 層積層メタサーフェスの(a)透過位相遅れ、(b)透過率、(c)反射率

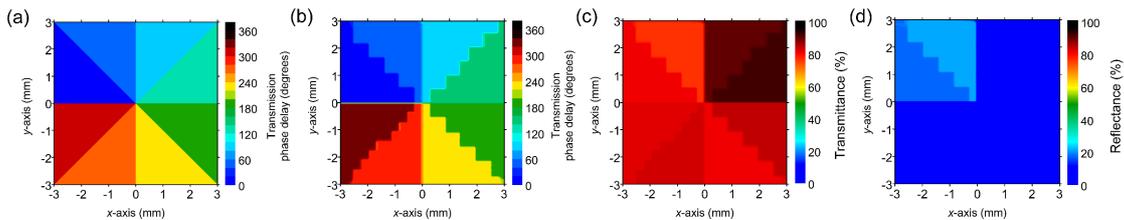


図 4 (a)理想の透過位相遅れ、設計した中空構造の光渦生成素子の(b)透過位相遅れ、(c)透過率、(d)反射率の分布

4. 研究成果

図 5(a)、(b)にそれぞれ光渦生成素子通過後 3 波長の位置での電界位相分布、電界強度分布の解析結果を示す。設計した中空構造の光渦生成素子を有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS により全構造解析している。設計した中空構造の光渦生成素子に、周波数 0.312 THz、ビーム幅 4 mm のガウシアンビームを入射した。図 5(a)より、電界位相分布は受信側から見て時計回りで位相が遅れる光渦特有のらせん状分布となっている。図 5(b)より、電界強度分布は受信側から見て光渦特有のドーナツ状に近い分布となっている。

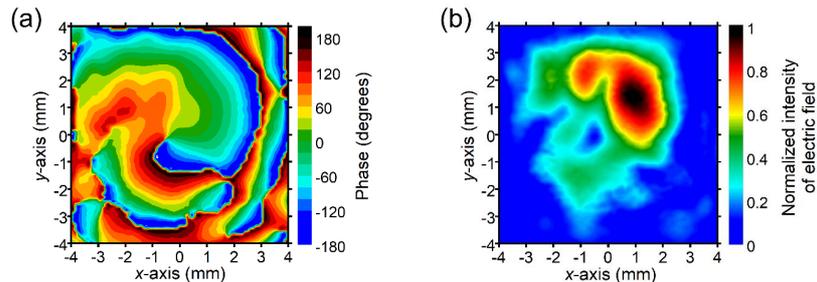


図 5 光渦生成素子通過後 3 波長の位置での(a)電界位相分布、(b)電界強度分布の解析結果

光渦生成素子の作製では、図 1 の中空構造での大きな積層ずれの課題が生じたため、新たに接着シートを用いた密着構造の光渦生成素子を着想し、設計、作製した。接着シートの導入により、大きな積層ずれの課題について解決の糸口を見いだせた。また、密着構造という新たな構造への拡張も進んだ。現在、データ整理を行っているが、図 6 の通り、独自に生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射なメタサーフェスで構成された光渦生成素子により、光渦特有のドーナツ状の電界強度分布を実験で確認した。以上により、本挑戦的研究(萌芽)の課題名である「超高屈折率・無反射な積層材料によるテラヘルツ光渦の発生」を達成したと思われる。

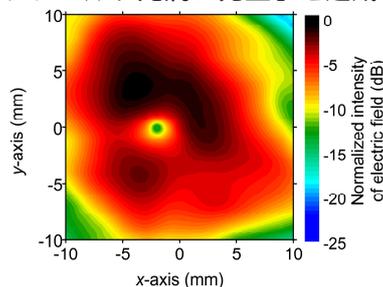


図 6 独自に生み出した偏光特性を有する高屈折率・無反射なメタサーフェスで構成された光渦生成素子による光渦特有のドーナツ状の電界強度分布の実験結果

参考文献

- [1] 安川 昂秀, “テラヘルツ波面を制御するメタサーフェスの評価法の研究” 東京農工大学卒業論文, Mar. 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kento Sato and Takehito Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Polarization-independent isotropic metasurface with high refractive index, low reflectance, and high transmittance in the 0.3-THz band	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/nanoph-2022-0788	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 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 宇野 晃生, 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯積層構造メタサーフェスアンテナの接着シートを用いた設計
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安川 昂秀, 山森 駿司, 鈴木 健仁
2. 発表標題 誘電率と透磁率の両方を制御したメタアトム配置設計によるテラヘルツ光渦生成素子
3. 学会等名 第28回電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタレンズアンテナと共鳴トンネルダイオードの融合による0.3THz帯30dB指向性利得の設計
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山森 駿司, 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 無偏光・高屈折率・低反射なメタサーフェスによるテラヘルツ光渦生成素子の設計
3. 学会等名 信学技報
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 劉 久美子, 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 熱輻射の指向性制御に向けた100THz帯メタサーフェスの作製と実験
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harumi Asada and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Metasurface demonstrating both high refractive index and low reflectance in the infrared region
3. 学会等名 The Third International Symposium on Frontiers in THz Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月 景太, 朝田 晴美, 劉 久美子, 鈴木 健仁
2. 発表標題 誘電体表裏両面にカット金属ワイヤーを有するテラヘルツ波帯メタサーフェスの分散特性の実験評価
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦島 康平, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯メタレンズアンテナを搭載した共鳴トンネルダイオードによる30dB高指向性利得設計
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nao Nakata, Kohei Urashima, Harumi Asada, and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Directivity measurement method for metasurface antennas by an alternative to terahertz compact oscillators
3. 学会等名 IRMMW-THz 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harumi Asada and Takehito Suzuki
2. 発表標題 Reflectionless metasurface with high refractive index in the 50-THz band for directivity control of thermal radiation
3. 学会等名 IRMMW-THz 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスによるテラヘルツ波帯平面アンテナと6G通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 厚さ100 nmのSiNx膜の表裏両面に正方形Auパッチを配置した構造による物体から放射された熱輻射の制御に向けた高屈折率無反射なメタサーフェス
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山森 駿司, 鈴木 健仁
2. 発表標題 テラヘルツ光渦生成メタサーフェスの機械学習のアシストも活用した最適化の検討
3. 学会等名 第27回電子情報通信学会 東京支部学生会 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 健仁
2. 発表標題 メタサーフェスと6G通信用光源の融合に向けて
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中田 成央, 佐藤 建都, 浦島 康平, 劉 久美子, 鈴木 健仁
2. 発表標題 0.3THz帯積層型両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナの設計
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 朝田 晴美, 鈴木 健仁
2. 発表標題 熱輻射制御に向けた高屈折率無反射メタサーフェスの高周波化の検討
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端」
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学 工学研究院 鈴木研究室 http://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/index.html

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
---------	---------