

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04659

研究課題名（和文）3次元バルクメタマテリアルが拓く極限屈折率材料と革新的テラヘルツ光学素子の創成

研究課題名（英文）Creation of innovative terahertz optical elements developed by 3D bulk metamaterials

研究代表者

金森 義明 (Kanamori, Yoshiaki)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10333858

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,310,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ波の波長よりも小さなメタマテリアル単位構造がポリマー粒に内包された、粉末として供給可能なメタマテリアル粉体を開発した。メタマテリアル粉体を金型に入れ成形することにより、3次元バルクメタマテリアルを製作することに成功した。メタマテリアル単位構造として、分割リング共振器、金属誘電体金属積層型メタマテリアル、誘電体メタマテリアルを設計および製作し、それを用いた3次元バルクメタマテリアルを実現した。メタマテリアル単位構造は3次元的にランダムに分散配置されている。次世代移動通信システム「Beyond 5G / 6G」で期待されている周波数において、屈折率を人工的に変化させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元バルクメタマテリアルの概念を新たに提唱し、設計・製作方法を確立し、テラヘルツ領域において屈折率を人工的に制御できたことの学術的意義は大きい。また、社会的にも今回開発したメタマテリアルは固体の粉末材料として供給可能なため、金型成形や切削加工などの機械加工により、メタマテリアルを自由に加工してテラヘルツ光学素子を実現できる点が画期的である。これらの利点を活かし、Beyond5G/6Gの通信技術をはじめ、医療・バイオ・農業・食品・環境・セキュリティなど幅広い分野での応用が大いに期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a metamaterial grain that can be supplied as a grain and has a metamaterial unit structure smaller than the wavelength of terahertz waves encapsulated in polymer grains. By placing metamaterial grains in a mold and molding them, we succeeded in fabricating a three-dimensional bulk metamaterial. We designed and fabricated split ring resonators, metal-dielectric-metal stacked metamaterials, and dielectric metamaterials as metamaterial unit structures, and realized three-dimensional bulk metamaterials using them. The metamaterial unit structures are randomly distributed in three dimensions. We succeeded in artificially changing the refractive index at frequencies expected for the next-generation mobile communication system "Beyond 5G / 6G."

研究分野：微小光工学

キーワード：メタマテリアル 光デバイス マイクロ・ナノデバイス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ領域は光波(赤外線)と電波(ミリ波)の中間にあたる電磁波帯であり、赤外線のように検査・分析に用いる他、ミリ波に次ぐ次世代通信波長帯としても期待されている。その実現には、テラヘルツ光を自在に操作する手段としてのレンズ・プリズム・フィルタ等の光学素子が必要となる。光学素子に用いる材料には、透明かつ屈折率とその波長分散の幅広い選択可能性が求められ、可視領域では種々の光学ガラスが開発されてきた。一方、テラヘルツ領域では光学材料の選択肢が乏しく、新規材料の開発が待たれている。

現状、テラヘルツ領域において利用可能な光学材料はシクロオレフィンポリマー(COP)・単結晶シリコン・ダイヤモンド・テフロン等があるが、それらの屈折率間の空白を埋める材料は見つからない。また、テラヘルツ領域では屈折率の波長分散が弱く、分光プリズムを実現しづらいという問題もある。

メタマテリアルは自然界の物質にはない超高屈折率や負の屈折率を示す人工材料として注目されている。メタマテリアルの単位胞を成す光共振器は波長より十分小さく、光共振器の設計次第で実効的な誘電率・透磁率を自在に制御できる。ただし、誘電率・透磁率変化が大きく生じるのは共振点付近のみで、光共振器の形状によっては偏光・入射角依存性を示すという難点がある。また、フォトリソグラフィ等の微細加工技術で平面的に光共振器を形成した従来のメタマテリアルはそれ自体が一つの光学素子として提供されるため、レンズ・プリズム・フィルタ等の任意形状の光学素子を形成する材料としては使いづらい。

2. 研究の目的

テラヘルツ領域では光学素子に利用可能な材料が乏しく、加工容易かつ幅広い屈折率特性を有する新規材料が求められている。本研究では、自由な形状に形成可能かつ任意の屈折率特性を有するテラヘルツ光学素子の実現を目指し、光共振器を内包した粉末状の新たな光学材料の加工・形成手法を確立する。本研究の目的は、粉末状のメタマテリアル(メタマテリアル粉体)がランダムに分散した3次元バルクメタマテリアルの加工・形成手法を確立し、テラヘルツ領域において分光プリズムを実現できるような屈折率の波長分散特性を有する3次元バルクメタマテリアルを実現することである。

3. 研究の方法

本研究は、シミュレーションを用いたメタマテリアル粉体の設計、メタマテリアル粉体の製作・評価、3次元バルクメタマテリアルの設計・製作・評価を実施する。

設計はCOP製の樹脂粉末内部に金を材質とした光共振器を形成することを想定し、電磁場解析シミュレーションソフトウェア CST Studio Suite を用いる。はじめに、光共振器を内包するメタマテリアル粉体の形状および寸法設計を行う。メタマテリアル粉体の計算モデルは、メタマテリアル単位構造(メタアトム)が2次元周期配列された2次元周期構造とする。メタアトムをxyz軸周りに回転させた複数の2次元周期構造を計算し、メタアトムに対して様々な方向からテラヘルツ波が入射した際の基本的な光学特性を取得する。3次元バルクメタマテリアルの計算モデルは、上述のメタマテリアル粉体が有効屈折率媒質としてランダムな向きで分散しているモデルとして、上述のメタマテリアル粉体の数値解析で得られた光学特性を用いて有効屈折率理論を適用して解析する。

作製プロセスで用いる装置群は、東北大学マイクロ・ナノマシニング研究教育センターの共用設備を用いる。製作には、レーザー描画装置、マスクアライナ、スパッタ成膜装置、ダイサー等を用いる。製作した光共振器および粉末材料の実寸評価には、原子間力顕微鏡や超高精細デジタルマイクロスコープを用いる。

メタマテリアルの屈折率特性を評価するため、テラヘルツ汎用分光装置(日邦プレジジョン、Tera Prospector-Kit)を用い、テラヘルツ領域(分解能6 GHz)における反射・透過スペクトル計測を行う。

4. 研究成果

3次元バルクメタマテリアルの屈折率制御範囲を拡張するために、メタマテリアル粉体内部に占める金属構造の占有率を向上させた3次元バルクメタマテリアルの製作を行った。ここで、占有率とは、メタマテリアル粉体の断面積に対する、メタアトムの分割リング共振器(split-ring resonator: SRR)が囲む面積比のことである。製作した3次元バルクメタマテリアルを図1(a)に示す。メタアトムであるSRRを円形状から矩形状に変更し、占有率をこれまでに製作した円形状SRRの29.2%から矩形状SRRで81.0%まで向上させたメタアトムで3次元バルクメタマテリアルを成型した。直径12 mm、厚さ1.0 mmの円柱状の3次元バルクメタマテリアルを製作するこ

とができた。透過特性を確認すると入射偏光方向によって透過特性が異なったが、どの偏光方向でも高周波数になるにつれて透過率の減衰が見られた。屈折率特性を確認すると、入射偏光方向によって屈折率特性が異なることが確認できた。ここでは、占有率を大きくしたことにより、SRRの外寸がメタマテリアル粉体の外寸に近い寸法になり、ダイシング時のカット位置のずれからSRR自体をカットした不良のメタマテリアル粉体が多数存在したことにより、入射偏光依存性が生じたと考えられる。本3次元バルクメタマテリアルでは、ある入射偏光方向の入射波に対する測定結果において、周波数0.412 THzにおける屈折率1.386から周波数0.641 THzにおける屈折率1.559まで屈折率が変調しており、屈折率変調度 $|N/F|$ は0.755が得られた。屈折率変調度とは、周波数に対する屈折率の傾きであり、Nは屈折率、Fは周波数を示す。円形のSRRで構成される3次元バルクメタマテリアルの屈折率変調度は0.139であったことから、SRRの占有率を大きくすることで屈折率変調度の向上に成功した。

上述の3次元バルクメタマテリアルにおいて、最大屈折率1.559を達成する0.64 THz周辺の周波数で透過率が0.2-0.3と低い値であることが問題視された。テラヘルツ周波数帯における光学素子としての応用を考えたとき、透過率が低いと応用が制限されてしまう。最大屈折率を高い透過率で実現する必要がある。そこで、3次元バルクメタマテリアルの最大屈折率の向上と最大屈折率を達成する周波数付近での透過率を改善するため、金属-絶縁体-金属構造(Metal-Insulator-Metal構造:MIM構造)を内包した3次元バルクメタマテリアルの製作を行った。製作した3次元バルクメタマテリアルを図1(b)に示す。MIM構造を内包したメタマテリアル粉体の製作手法を実証した。また、3次元バルクメタマテリアル内部でメタマテリアル粉体を取り囲む樹脂として、ポリジメチルシロキサン(PDMS)、エポキシ、ポリメチルメタクリレート(PMMA)の各樹脂で3次元バルクメタマテリアルを成型可能であることを示した。メタマテリアル粉体を取り囲む樹脂にエポキシを用いて、直径10 mm、厚さ1.0 mmの3次元バルクメタマテリアルを製作することができた。エポキシで成型した3次元バルクメタマテリアルの透過特性・屈折率特性を測定した。入射偏光角度依存性がないことを確認した。本3次元バルクメタマテリアルでは、周波数0.382 THzにおいて最大屈折率1.628を達成しており、透過率は0.47が得られた。また、周波数0.448-0.544 THzの間で屈折率分散が得られ、周波数0.448 THzにおける屈折率1.628から周波数0.544 THzにおける屈折率1.602まで屈折率が変化していた。屈折率変調度 $|N/F|$ は0.271が得られた。

次に、四方向ロッドのペアメタマテリアルを提案した。提案したメタアトムは共振周波数において波長分散を示す特性を持っており、メタアトムの特徴から、3次元バルクメタマテリアルは波長分散性を示す光学素子として期待できる。上述したこれまでの3次元バルクメタマテリアルの製作手法に加え、COPフィルム同士の接着に紫外線硬化樹脂接着剤を用いることで、より強固なメタマテリアル粉体の開発に成功した。製作したメタアトムについて、製作誤差1%以内で精度よく製作することができた。また、異層間のメタアトムは最大で縦横に7.9 μm の位置ずれがあったが、シミュレーション結果の比較により、位置ずれが光学特性に及ぼす影響が小さいことを確認した。上述したこれまでの3次元バルクメタマテリアルの製作で問題視されていた、メタマテリアル粉体の積層構造が破損してしまう点について、成型時に質量濃度の高いCOPキシレン溶液35wt%を用いることで、メタマテリアル粉体の構造を破損することなく3次元バルクメタマテリアルの製作を行うことができた。製作した3次元バルクメタマテリアルを図1(c)に示す。直径16 mm、厚さ1.3 mmの円柱状の3次元バルクメタマテリアルを製作することができた。製作した3次元バルクメタマテリアルの測定をテラヘルツ時間領域分光法(Terahertz Time Domain Spectroscopy: THz-TDS)を用いて行った。屈折率変調度 $|N/F|$ は2.31を達成した。この結果から、本研究で作製した3次元バルクメタマテリアルは、上述したこれまでの3次元バルクメタマテリアルと比較して屈折率変調度が3倍の波長分散材料となる事が期待できる。また、3次元バルクメタマテリアル内部に占めるメタマテリアル粉体の密度を変えることで、周波数0.315-0.396 THzにおいて屈折率変調度 $|N/F|$ を0.525-2.31まで制御することに成功した。

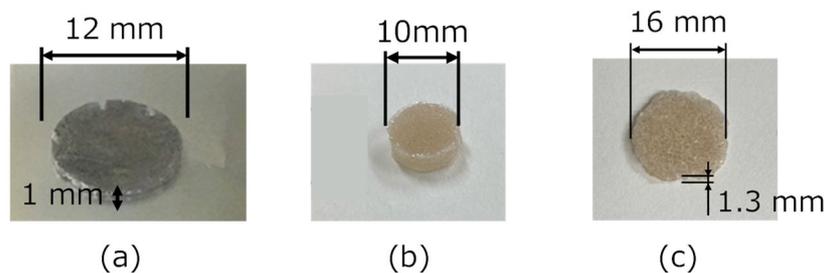


図1 製作した3次元バルクメタマテリアル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Huang Ying, Okatani Taiyu, Inomata Naoki, Kanamori Yoshiaki	4. 巻 122
2. 論文標題 A reconfigurable ladder-shaped THz metamaterial integrated with a microelectromechanical cantilever array	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 051705 ~ 051705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0124601	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 Okatani Taiyu, Sunada Yuto, Hane Kazuhiro, Kanamori Yoshiaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Terahertz 3D bulk metamaterials with randomly dispersed split-ring resonators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 2065 ~ 2074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0703	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 Huang Ying, Okatani Taiyu, Kanamori Yoshiaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Broadband stop filters for THz waves using H-shaped metamaterials with dual electronic-plasmonic functionality	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SD1007 ~ SD1007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac55dd	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡谷 泰佑, 砂田 悠斗, 羽根 一博, 金森 義明
2. 発表標題 分割リング共振器を内包する等方性 3次元バルクメタマテリアル
3. 学会等名 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 木田 喬仁, 岡谷 泰佑, 猪股 直生, 金森 義明
2. 発表標題 インクジェット印刷を用いたフレキシブルメタマテリアルの製作と透過特性評価
3. 学会等名 2022年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金森義明
2. 発表標題 Beyond 5G/ 6G に向けたメタマテリアル
3. 学会等名 第20回MEMS集中講義（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ying Huang, Taiyu Okatani, Yoshiaki Kanamori
2. 発表標題 Broadband stop filters using H-shaped metamaterial at the THz region
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

金森・岡谷研究室
<https://web.tohoku.ac.jp/kanamori/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
研究分担者	松原 正和 (Matsubara Masakazu) (50450648)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	岡谷 泰佑 (Okatani Taiyu) (80881854)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	

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