

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246022

研究課題名 (和文) テラヘルツメタマテリアルの開発と応用

研究課題名 (英文) Development and application of terahertz metamaterials

研究代表者

萩行 正憲 (HANGYO MASANORI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：10144429

研究成果の概要(和文):メタマテリアルとは、波長よりも小さな構造物を並べた人工構造物で、自然界の物質では得難い有効誘電率や有効透磁率を有するものである。本研究では、テラヘルツ領域のメタマテリアルを設計、作製、評価した。作製法では、主に超微細インクジェットプリンタを用いて平面ならびに多層メタマテリアルを作製し、テラヘルツ時間領域分光法により評価した。メタ原子を装荷した光伝導アンテナを作製し、光パルスにより放射スペクトルの動的制御が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文): Metamaterials are artificially structured materials, which have permittivity and permeability in naturally obtained materials. In this study, metamaterials in the terahertz region are designed, fabricated, and characterized. For fabrication, planar and multi-layered metamaterials are made using a super-fine ink-jet printer and evaluated by the terahertz time-domain spectroscopy. Photoconductive antennas loaded with meta-atoms are fabricated and it is demonstrated that the control of the emission spectra is possible by optical pulses.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	20,000,000	6,000,000	26,000,000
2009年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	39,100,000	11,730,000	50,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ波、メタマテリアル、負の屈折率、超微細インクジェットプリンタ、FDTDシミュレーション、光伝導アンテナ

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、ここ10年あまり未開拓電磁波と呼ばれていたテラヘルツ波(THz波、0.1～10 THz、波長3 mm～30 μm)の研究に携わり、科研費特定領域研究(B)「レーザーテラヘルツ波工学の開拓」(H11～13)の領域代表者、同基盤研究(S)「レーザー励起テラヘルツ波の高度応用」(H15～19)の研究代表者と

して、我が国のTHz波研究をリードしてきた。基盤研究(S)では、THz波光源、検出素子、分光・イメージングシステムの開発を推進するとともに、基礎物性研究から、タンパク質ダイナミクス、爆発物や引火性液体の検知、バイオ・医学応用、プラズマ診断までの広い領域に渡って、THz技術の応用を開拓してきた。この過程で、2000年前後から、THz

領域におけるフォトニック結晶や金属微細構造体(プラズモニック結晶)の重要性に気づき、2次元金属開口配列(Metal Hole Array, MHA)を中心として研究を行い、表面プラズモン-ポラリトン(SPP)を介した共鳴偏光変換、積層系における異常透過現象、ネジ穴MHAにおける巨大光学活性現象などの新しい現象を見出してきた。

一方、欧米では2000年前後から、金属フォトニック結晶(SPPが活躍するのでプラズモニック結晶と呼ばれることも多い)から発展し、金属を波長以下の周期で加工し、負の有効誘電率($\epsilon < 0$)や負の有効透磁率($\mu < 0$)を実現する試みが多くなされるようになり、「メタマテリアル」として大きな分野に発展しつつある。特に、 ϵ も μ も負の物質は、屈折率が負($n < 0$, Negative Index Material, NIM, Left-handed Material、左手系物質などと呼ばれる)となり、様々な異常な性質を示し、回折限界を超えた完全レンズを含む新しい光学素子の開発に繋がるものとして興味を持たれている(例えば、C. M. Soukoulis *et al.*, Science 315, 47 (2007))。研究代表者は、2007年にローマで開催されたメタマテリアルの初の本格的国際会議(Metamaterials 2007)に参加したが、当初予測を大きく超える約400名の参加者があり、この研究分野が急速な発展を遂げつつあることを実感した。

2. 研究の目的

本研究では、これまで研究代表者らが蓄積してきたTHz技術とメタマテリアルを融合して、新しいタイプのメタマテリアルを開発し、THzの応用分野を拡大することを目的としている。このために、フォトニック結晶の理論・シミュレーションに長年の実績のある宮崎、フェムト秒レーザー加工で実績をあげつつある小関、長年のパートナーである長島を研究分担者とした強力な体制で、計画を実行する。

研究は大きく分けると、

- (1) 誘電体及び金属を用いたメタマテリアル(2次元、3次元)の設計
- (2) 作製・評価法の確立
- (3) メタマテリアルの応用

に分けられる。テラヘルツ領域は、メタマテリアルの単位構造(メタ原子)の大きさが数十マイクロメートルであり、リソグラフィをはじめとして多くの既存技術が使える可能性があるため、メタマテリアル作製に適切な手法を見極める。テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)は、透過振幅と位相の両方が測定できるため、メタマテリアルの評価には大変有用である。さらに進んだ評価法として、近接場顕微鏡やエリプソメトリも開発する。また、メタマテリアルは、現状では材料やデバイスの種類の少ないテラヘルツ領域で、非常に有用な材

料・デバイスを提供する可能性が高い。この方面の研究も行う。

3. 研究の方法

研究目的の項目(1)については、主にFDTDシミュレーションを用いる。また、モード展開などの解析的手法も併用する。金属メタマテリアルについては主に平面メタマテリアル、誘電体メタマテリアルについては3次元の等方的メタマテリアルを目指す。金属メタマテリアルについては、シートメタマテリアルの積層による3次元化や、メタ原子を基板上で立てた立体メタマテリアルの開発も試みる。

項目の(2)については、超微細インクジェットプリンタ(SIJ)を駆使する。この手法は、まだ開発途上であることから、様々なノウハウの蓄積が必要である。金属薄膜を加工するためには、レーザー加工法を用いる。さらに、誘電体を用いたメタマテリアルについてはセラミックプロセスを利用する。その他、放電加工など、マイクロオーダーの加工に利用可能な手法は、積極的に取り入れる。評価については、時間領域分光法により、透過と反射の複素振幅を測定し、有効誘電率と有効透磁率を導出する手法を確立する。異方的あるいはカイラルメタマテリアルに対する解析手法も確立する。さらに、電気光学的手法を用いた近接場顕微鏡並びにエリプソメトリの開発も行う。

項目の(3)については、まず、受動的素子としての偏光子やフィルターへの応用を試みる。さらに、光伝導アンテナの放射特性を光パルスでスイッチングすることを試みる。これは、将来のフォトニックテラヘルツ素子への応用につながるものである。

4. 研究成果

- (1) SIJによる平面および立体メタマテリアルの作製

SIJを用いて非常に簡便に平面メタマテリアルを作製する手法を確立した。図1はシリコン基板上に作製した、分割リング共振器(SRR)配列のメタマテリアルである。比較のために閉リング共振器(CRR)配列も作製した。このような平面メタマテリアル(2500個のメタ原子を含む)を数時間の描画と220°Cで1時間の熱処理で作製することができる。図2は、THz-TDSにより測定した透過スペクトルで、SRR配列に対しては、0.4 THzにLC共振による磁気的応答(電場誘起による磁気応答)が明確に観測される。このスペクトルはFDTDシミュレーションとも一致する。

基板に対して垂直に入射するテラヘルツ波に対して、真の磁気応答を示すメタマテリアルを作製するには、SRRのリング面はを基板に対して立てる必要がある。描画法の工夫

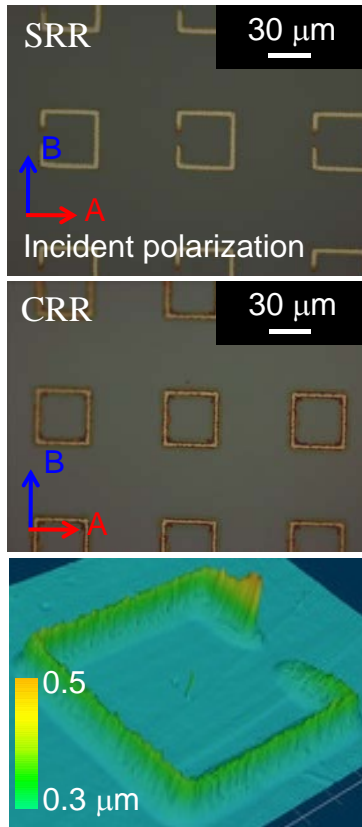


図 1 SIJ で作製した平面メタマテリアル

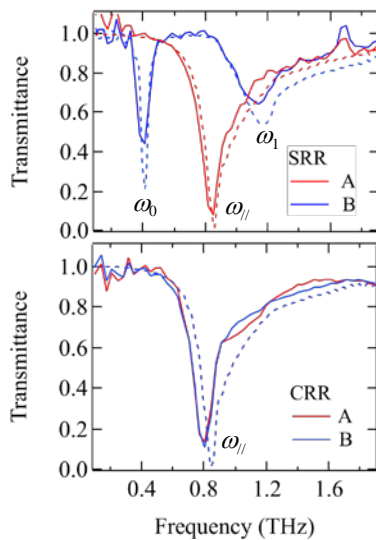


図 2 図 1 の試料のテラヘルツ透過スペクトル

により、図 3 のトポグラフィ像に示されるような立体メタマテリアルの作製に成功した。図 4 は、この試料に対する透過スペクトルを測定した結果で、ほぼ設計通りのところに透過ディップが現れている。

(2) 3次元メタマテリアル

フレキシブルシート上に SRR 配列を作製し、

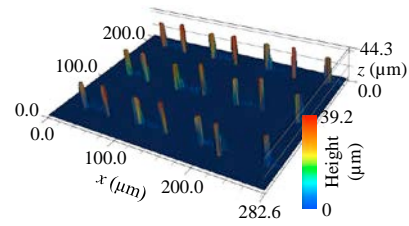


図 3 立体メタマテリアルのトポグラフィ像

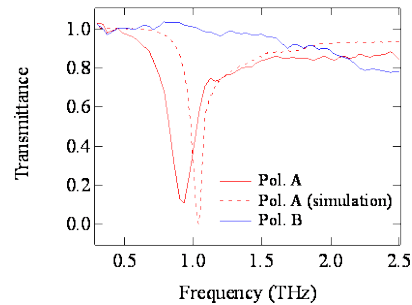
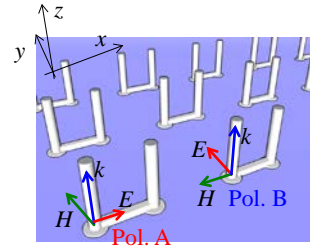


図 4 図 3 の試料のテラヘルツ透過スペクトル

これを多数積層することにより初めての3次元テラヘルツメタマテリアルを作製した(図 5)。フレキシブルシートによる吸収が相当大きいものの、図 6 に示されるように、明確な純粋な磁気応答が観測された。

(3) 誘電体メタマテリアル

セラミックプロセスで作製したTiO₂立方体の2次元メタマテリアルの解析を進めるとともに、3次元化を目指してTiO₂球を分散させたメタマテリアルの作製を行った。テープ上に分散させたTiO₂微小球の透過スペクトルで、ミー共鳴による明確な透過ディップが見られた。これらは、負の透磁率ならびに負の誘電率に対応する。

(4) ワイヤ媒質と偏光子

市販のプリンタとメタリックカラーインクを用いて、平面ワイヤ媒質ならびにカットワイヤ媒質を作製し、その透過スペクトルを測定した。ワイヤにカットを入れることによりも有効誘電率に大きな変化が起こることがわかった。即ち、ワイヤ媒質では金属的な負の誘電率を示しているのが、カットを入れることにより正に急変した。この金属-絶縁体転移は、導電性高分子において観

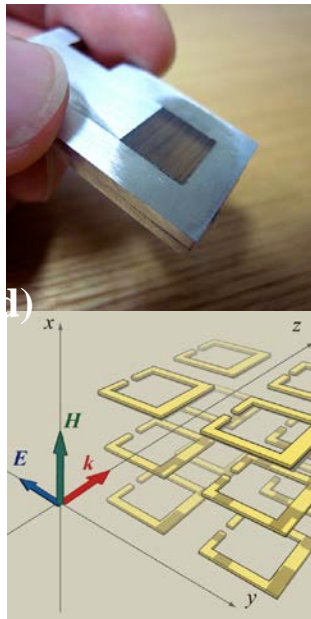


図 5 積層型の 3 次元メタマテリアル

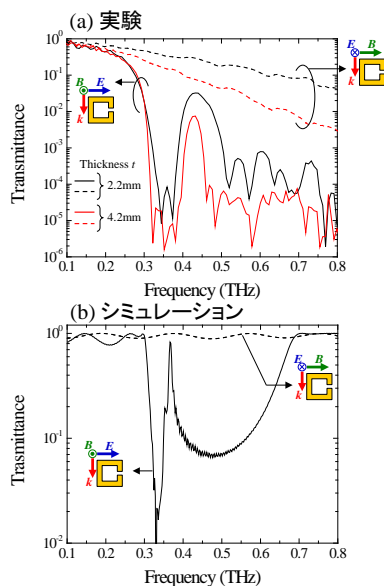


図 6 図 5 の試料のテラヘルツ透過スペクトル

測される現象に酷似している。

比較的簡便な手法であるナノインプリント法を用いて、フレキシブル基板上にワイヤーグリッド偏光子を作製した。このワイヤーグリッドは、極めて異方的な平面メタマテリアルと見做せるものである。簡便な方法であるにもかかわらず、極めて高い消光比を示すことがわかった。安価で大面積のテラヘルツ偏光子として実用に供することができる。

(5) メタ原子付き光伝導アンテナとその光スイッチング

半絶縁性ガリウム砒素 (SI-GaAs) 基板上に

テラヘルツ波放射用の光伝導アンテナを作製した。アンテナには、様々な形状のメタ原子を付加した。これらの光伝導アンテナからのテラヘルツ放射スペクトルと偏光特性をメタ原子に大きく依存することから、メタ原子により放射特性が制御できることがわかった。

さらに、SRR のギャップを光パルスで励起することによりギャップを閉じ、大きな放射特性の変化を引き起こすことができることが示された。この効果は、フォトニックテラヘルツ技術の通信応用に有用なものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- ① 萩行正憲、テラヘルツ波技術の歩みと展望、応用物理、査読有、81 巻、(2012)、271-283.
- ② 萩行正憲、高野恵介、テラヘルツ波メタマテリアル、OPTRONICS、査読無、(2011)、12 号、63-67.
- ③ K. Takano, Y. Chiyoda, T. Nishida, F. Miyamaru, T. Kawabata, H. Sasaki, M. W. Takeda, and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett., 査読有, 99 巻, (2012), 161114-1-3.
- ④ 萩行正憲、高野恵介、テラヘルツ波メタマテリアル、マテリアルインテグレーション、査読無、24 巻、(2011)、13-20.
- ⑤ K. Takano, H. Yokoyama, A. Ichii, I. Morimoto, and M. Hangyo, Wire-grid polarizer sheet in the terahertz region fabricated by nanoimprint technology, Opt. Lett., 査読有, 36 巻, (2011), 2665-2667.
- ⑥ K. Akiyama, K. Takano, Y. Abe, Y. Tokuda, and M. Hangyo, Optical transmission anomalies in a double-layered metallic slit array, Opt. Express, 査読有, 18 巻, (2010), 17876-17882.
- ⑦ F. Miyamaru, M. Kamijyo, K. Takano, M. Hangyo, H. Miyazaki, and M. W. Wada, Characteristics and generation process of surface waves excited on a perfect conductor surface, Opt. Express, 査読有, 18 巻, (2010), 17576-17583.
- ⑧ I. Yamada, K. Takano, M. Hangyo, M. Saito, and W. Watanabe, Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings, Opt. Lett., 査読有, 34 巻, (2009), 274-276.
- ⑨ 萩行正憲、宮丸文章、テラヘルツ帯におけるメタマテリアルの開発と応用、応用物理、査読有、78 巻、(2009)、511-517.
- ⑩ 萩行正憲、高野恵介、宮丸文章、メタマテリアルの基礎と最新研究動向、光技術コンタクト、査読無、47 巻、(2009)、511-517.
- ⑪ 萩行正憲、高野恵介、宮丸文章、テラヘ

ルツ領域でのメタマテリアル、光アライアンス、査読無、(2009)No. 6、6-11.

〔学会発表〕(計 36 件)

- ① 萩行正憲、イントロダクトリートーク：電磁メタマテリアルの最近の進展と将来展望、応用物理学会、2012. 3. 15、早稲田大学
- ② 萩行正憲、高野恵介、宮丸文章、テラヘルツ領域の平面、立体、3次元メタマテリアルの作製と評価、2012. 3. 15、早稲田大学
- ③ 西田 翼、宮丸文章、武田三男、高野恵介、萩行正憲、メタアトム装荷光伝導アンテナによるテラヘルツ波制御、応用物理学会、2011. 8. 31、山形大学
- ④ 高野恵介、周防裕政、大野誠吾、石原照也、萩行正憲、卍型光伝導アンテナのテラヘルツ波偏光特性、応用物理学会、2011. 8. 31、山形大学
- ⑤ 萩行正憲、テラヘルツ波とメタマテリアル、分子研研究会「大強度テラヘルツ光の発生と利用研究」、2011. 1. 14、分子科学研究所
- ⑥ 高野恵介他、メタアトム装荷光伝導アンテナからのテラヘルツ波放射、電気学会 光応用・視覚研究会、2010. 12. 27、大阪産業大学梅田サテライトキャンパス
- ⑦ M. Hangyo他、Terahertz metamaterials fabricated by a super-fine ink-jet printer, 3rd Korea-Japan THz Workshop, 2010. 12. 17, Busan, Korea
- ⑧ 萩行正憲他、電磁メタマテリアルの基礎と最近の展開、第 21 回光物性研究会、2010. 12. 10、大阪市立大学
- ⑨ 萩行正憲、テラヘルツテクノロジーの最近の進展とメタマテリアル、防衛技術協会「光波・ミリ波センシング部会」、2010. 11. 24、グランドヒル市ヶ谷
- ⑩ 萩行正憲、テラヘルツ波の発生と多様な応用、センシング技術応用研究会、2010. 11. 11、京都工業繊維大学

〔図書〕(計 1 件)

高野恵介、萩行正憲、日本工業出版、プリンテッドエレクトロニクスのおべて(第 5 章の「テラヘルツ領域における光学素子の形成」を分担執筆)、(2010)、120-124

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩行 正憲 (HANGYO MASANORI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授
研究者番号：10144429

(2) 研究分担者

長島 健 (NAGASHIMA TAKESHI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号：60332748

小関 泰之 (OZEKI YASUYUKI)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号：60437374

宮寄 博司 (MIYAZAKI HIROSHI)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号：00134007