

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月12日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20244047

研究課題名（和文） フラクタル構造メタマテリアルによるテラヘルツ電磁波の制御

研究課題名（英文） CONTROL OF THZ ELECTRO MAGNETIC WAVES BY METAMATERIALS
WITH FRACTAL STRUCTURES

研究代表者

武田 三男（TAKEDA MITSUO）

信州大学・理学部・教授

研究者番号：20115653

研究成果の概要（和文）：

当初の計画にしたがって研究を遂行し以下の成果を得た。

- ① スプリットリング共振器メタマテリアルの試作とテラヘルツ波伝播特性の解明
- ② 三次元H型フラクタル構造メタマテリアルの試作
- ③ メタルホールアレイのテラヘルツ波透過特性の解明
- ④ H型フラクタル光伝導アンテナの設計試作と発振特性の解析
- ⑤ 金属開口アレイの電磁波局在機構の解明
- ⑥ 強誘電体のメタマテリアルの可能性の探求

研究成果の概要（英文）：

- ① Fabrication of metamaterials with split ring resonator and their propagation characteristics of THz waves
- ② Fabrication of metamaterials with 3D H-fractal structure
- ③ Transmission characteristics of THz waves of metal hole arrays
- ④ Fabrication and emission characteristics of photoconductive antennas with H fractal structure
- ⑤ Mechanism of localization of electromagnetic waves on metal hole array
- ⑥ Possibility of ferroelectrics for metamaterials

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2009年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2010年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：光物性

1. 研究開始当初の背景

メタマテリアルと呼ばれる人工物質が、最近注目されている。一般的な透明物質では、誘電率と透磁率はともに正であるので物質の屈折率は正の実数となり、光は物質内に侵入することができる。金属やある種の磁性体などでは、誘電率または透磁率のどちらか一方が負となる。そのため屈折率は純虚数となり、物質内への光の侵入は禁止される。しかし、誘電率と透磁率が同時に負となる場合、物質の屈折率は負の実数となり、光は物質内へ侵入することが可能となる。1968年にV. G. Veselagoが、負の屈折率を持つ物質内の光は、従来の正の屈折率を持つ物質の場合とは全く異なった振る舞いをするを理論的に示した。最近、人工的な構造によって負の屈折率を現実のものとする物質が幾つか提案され、メタマテリアルと呼ばれている。誘電率と透磁率を人工的にデザインすることによって、従来の光学技術では実現不可能とされていた多くの光学特性（電磁気学特性）を実現できる可能性が開かれた。しかし、国内では、ほんの数例の研究結果が報告されているにとどまっており、世界各国の研究機関と切迫するためには、早急に本分野の研究を推し進めなければならない。本研究では、我々がこれまでに蓄積してきたテラヘルツ光領域でのフォトニック結晶などの微細人工構造物における電磁波局在等の光学現象に関する知識と測定技術に基づき、新規光学現象を発現するメタマテリアルの創製とその起源を解明することを目的とする。

2. 研究の目的

申請者らはこれまで、テラヘルツ光領域におけるフォトニック結晶やフラクタル構造の光学現象に関する研究を長年行ってきた。特に金属を材料としたフォトニック結晶は国内外でも研究例が少ない中、先駆的に研究を行いフォトニック結晶やプラズモニック結晶における多くの興味深い新奇光学現象を発見してきた。例えば、プラズモニック結晶における偏光回転現象の発見や、金属スクリーアレイ構造における巨大光学活性現象の発見など、独創的構造体の研究を進めてきた。最近のメタマテリアル分野の主な構造は、金属を材料として作製されており、我々のこれまでの研究成果の延長線上にある。新しいメタマテリアル構造のデザインにおいて、蓄積してきた物理学的知見が極めて有効である。

本研究の具体的内容は以下の5つのテーマである。

- (1) 新規メタマテリアル構造の設計・作製と電磁波局在機構の解明
- (2) 共鳴モードを利用したメタマテリアルの高効率アンテナ応用への基礎研究
- (3) フラクタル構造を用いたブロードバンド三次元メタマテリアルの開発
- (4) 三次元H型フラクタル構造メタマテリアル光導波路の設計と透明マント効果の実証
- (5) 半導体メタマテリアルを用いた光制御超高速光変調機構の解明

3. 研究の方法

- (1) 新規メタマテリアル構造の設計・作製と電磁波局在機構の解明

新しいメタマテリアル構造の設計を行い、理論シミュレーションによってその光学応答特性を把握し、共鳴機構を解明する。理論シミュレーションは主に時間領域差分法（FDTD法）によって行う。メタマテリアルの設計では、Hフラクタルの予備実験の結果に基づいて、誘電率及び透磁率の変調に不可欠な強い誘電共鳴及び磁気共鳴が得られる構造を追求する。また、試料作製にあたっては実際の作製可能性及び困難さを考慮しながら、構造とその作製方法を決定していく。試料作製装置についても、設計されたメタマテリアル構造に対し逐次作製装置の改良も行う。

作製されたメタマテリアルの光学応答特性を、本研究室で独自に開発したテラヘルツ時間領域パルス分光装置を用いて測定する。本装置を用いることにより、複素誘電率と複素透磁率の全てを直接測定することが可能である。測定結果を詳細に解析し、作製したメタマテリアルの局在モードの共鳴機構の解明を行う。

- (2) 共鳴モードを利用したメタマテリアルの高効率

アンテナ応用への基礎研究H型フラクタル構造のメタマテリアルは、電磁波を非常に強く局在させる性質を持つ。この共鳴効果をアンテナ構造に応用することにより、高効率なテラヘルツ光アンテナを実現することができる。実際、研究協力者のP. ShengとW. Wenは金属H型フラクタル構造において電場及び磁場の強い局在効果を発見している。また、申請者らは、テラヘルツ光発信アンテナにH型フラクタル構造を採用することにより、従来のボウタイアンテナに比較して一桁程度強い発信性能を得ている。本研究では、差周波光混合にこのH型フラクタル構造アンテナ

ナを用いてテラヘルツ光の放射強度及び受光感度が共鳴効果によりともに増大することを確認する。

(3)フラクタル構造を用いたブロードバンド三次元メタマテリアルの開発

メタマテリアルにおける特異な光学応答特性のブロードバンド化を行う。従来のメタマテリアルにおいて、特異な光学応答はある種の誘電共鳴及び磁気共鳴を利用したものである。例えば、磁気共鳴を等価回路理論で説明すると、対象とする周波数で作用するコイル（リアクタンス： L ）及びコンデンサ（キャパシタンス： C ）を人工的な微細構造によって実現し、それらの共鳴周波数において磁気共鳴が生じる。この磁気共鳴周波数付近では透磁率が大きく変調されるため、従来では予想し得なかった特異な光学応答特性が得られる。

このコイルやコンデンサを実現する構造として、スプリットリングリゾネータが、J. B. Pendryによって提案されて以来研究されているが、ごく限られた狭い周波数領域、すなわちナローバンドでのみメタマテリアルとしての効果を示す。本研究では、メタマテリアルとしての役割をブロードバンドにおいて果たす構造として、三次元Hフラクタル構造を提案し、その試料作製及びテラヘルツ波伝播特性の測定を行う。母体のH型の四隅に半分の大きさのH型が形成され、それを各フラクタルステージにおいて順々に繰り返していくことにより、全体として自己相似なフラクタル構造を形成する。この構造を金属によって作製することにより、メタマテリアルとしての光学応答特性を発現する。我々はすでに、この構造における予備的な実験結果として、複数の周波数での誘電共鳴の発現を観測している。このブロードバンドを目指した全く新しい構造は、テラヘルツ光領域の応用のみならず、メタマテリアルの研究分野発展へのプレイクスルーとなることが強く期待される。

(4)三次元H型フラクタル構造メタマテリアル光導波路の設計と透明マント効果の実証

三次元メタマテリアルの実現に当たって重要なポイントは以下の三つである。①三次元化における等方性マテリアルもしくは異方性マテリアルの設計である。これまで主に研究されている二次元メタマテリアルでは、平面基板上に金属の微細構造が形成されている。この場合、ある一方向に伝搬し、かつある決まった偏光方向の光のみに対して、誘電共鳴または磁気共鳴が発現している。しか

し三次元メタマテリアルでは、全ての方向に伝搬する光に対してもメタマテリアルの性質を有しなければならない。

特に光の伝播を自在に操ろうとする本研究テーマの光導波路の開発では、三次元メタマテリアルの等方性を確保しなければならない。②等方性マテリアルを作製するための試料作製技術の改良である。三次元のメタマテリアルを作製するためには、従来の二次元メタマテリアルを作製していたフォトリソグラフィ技術に加え、多層のパターン基板を高密度に且つ正確に積層するための積層技術が必要となる。③作製された導波路の実験的な測定評価の面においても、分光装置の改良が必要である。現有のテラヘルツ分光装置では、試料の0次透過光または反射光の測定は可能であるが、放射素子と受光素子を任意に移動させ、それらの角度依存性を測定することができない。導波路のように0次透過方向以外の方向へ透過してくる光を測定するには不向きである。

そこで、本研究テーマでは、放射素子が受光素子に対して、水平方位300度程度まで回転させても測定可能な光学系を設計製作し、現有の分光装置に装着して透過及び散乱スペクトルの角度依存性を測定する。さらに、放射素子と受光素子をより立体的に移動させることができるように、新たにガンダイオードタイプの放射及び受光素子を用いた分光装置を製作する。ガンダイオードタイプの放射/受光素子を用いると測定周波数帯域は狭くなるが、自由に位置を移動させることができる。つまり、メタマテリアル導波路を透過してきた光をあらゆる場所及びあらゆる方向で測定することができ、導波路によるテラヘルツ波の角度依存性を含む伝搬特性を実験的に測定することが可能になる。これらの実験結果をFDTDによる数値解析結果と比較検討し、フラクタル導波路の形状及び材質を決定する。

4. 研究成果

『新規メタマテリアル構造の設計・作製と電磁波局在機構の解明』

(1)スプリットリング共振器メタマテリアルの設計・試作とテラヘルツ波伝播特性解析

高分子材料PET基板に金属メッキによりスプリットリング共振器アレイを形成し、これを積層して三次元メタマテリアルを作製した。テラヘルツ時間領域分光法により透過特性の詳細をしらべ、その電磁波伝播特性を議論した。透過及び反射スペクト

ルには磁気および電気共鳴に対応する位置に異常ピーク及びディップを確認した。電磁波の入射方向依存性からこれらのモードの伝播特性を議論した。

(2)三次元H型フラクタル構造メタマテリアルの設計・試作

テラヘルツ領域で透明なセラミック基板に三次元微細加工により、三次元H型フラクタル構造を持つメタマテリアルを作製した。テラヘルツ時間領域分光法により透過特性し、FDTDにより局在モードを解析中である。

(3)メタルホールアレイのテラヘルツ波透過特性の解明

メタルホールアレイの実験結果の詳細な解析により、伝播特性を解明した。局在モードの電場及び磁場の空間分布をFDTDにより数値解析した。さらに、メタルホールアレイ表面に高分子化合物膜を張りアレイ表面の誘電率を変化させ、異常透過ピーク振動数の誘電率依存性の詳細を調べ、センシングの可能性を議論した。

『メタマテリアル構造アンテナの設計試作と発振特性の解析』

(4)H型フラクタル光伝導アンテナの設計試作と発振特性の解析

金蒸着によりGaAs基板上に対称性の異なる数種類のH型フラクタル構造を持つアンテナを作製し、そのテラヘルツ波発振特性を調べた。また、FDTDにより局在モードを解析し、共鳴効果と発振特性を考察した。これにより、点対称及び鏡面对称性を崩した場合にテラヘルツ波の発信特性が高まることを見出した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

(1) Fumiaki Miyamaru, Mototsugu Kamijyo, Naoki Hanaoka, and Mitsuo W. Takeda; Controlling extraordinary transmission characteristics of metal hole arrays with spoof surface plasmons;

Applied Physics Letters, 100, 2012, pp081112/1-4; 査読有

(2) Keisuke Takano, Yui Chiyoda, Tsubasa Nishida, Fumiaki Miyamaru, Taku Kawabata, Hirofumi Sasaki, Mitsuo W. Takeda, and Masanori Hangyo;

Optical switching of terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive

antennas;

Applied Physics Letters, 99, 2011, pp161114/1-3; 10.1063/1.3654156; 査読有

(3) Mitsuo W. Takeda, Yukio Noda & Toshihisa Yamaguchi;

Inelastic Neutron Scattering Study of Ferroelectric Phase Transition in Lithium Heptagermanate (Li₂Ge₇O₁₅);

Ferroelectrics, 412, 2011, pp45-51;

10.1080/00150193.2011.542695; 査読有

(4) Resonant terahertz transmissions through metal hole array on silicon substrate;

Xiao Xiao, Wu Jinbo, Yuki Sasagawa, Fumiaki Miyamaru, Mengying Zhang, Mitsuo W. Takeda, Chunyin Qiu, Weijia Wen, and Ping Sheng; Optics Express 18, pp18558-18564, (2010) 査読有.

(5) F. Miyamaru, M. Kamijyo, K. Takano, M. Hangyo, H. Miyazaki, and M. W. Takeda: Characteristics and generation process of surface waves excited on a perfect conductor surface; Optics Express 18, pp17576-17583, (2010) 査読有.

(6) F. Miyamaru, Y. Saito, M. W. Takeda, B. Hou, W. Wen, and P. Sheng; Characteristics of terahertz radiations emitted from fractal photoconductive antennas;

Japanese Journal of Applied Physics 49, pp70205/1-3, (2010) 査読有.

(7) F. Miyamaru, S. Kubota, K. Taima, K. Takano, M. Hangyo, and M. W. Takeda; Three-dimensional bulk metamaterials operating in the terahertz range;

Applied Physics Letters 96, pp81105/1-3, (2010) 査読有.

(8) F. Miyamaru, Y. Sasagawa, and M. W. Takeda;

Effect of dielectric thin films on reflection properties of metal hole arrays;

Applied Physics Letters 96, pp21106/1-3, (2010) 査読有.

(9) F. Miyamaru, Y. Saito, M. W. Takeda, B. Hou, L. Liu, W. Wen, and P. Sheng; Emission of terahertz radiations from fractal antennas;

Applied Physics Letters 95, pp221111/1-3, (2009) 査読有.

(10) F. Miyamaru and M. W. Takeda;

Coupling between localized resonance and

excitation of surface waves in metal hole arrays;
Physical Review B **79**, pp153405/1-4, (2009)
査読有.

[学会発表] (計15件)

(1) F. Miyamaru, M. Kamijyo, K. Takano, M. Hangyo, H. Miyazaki and M. W. Takeda;
Generation process of surface waves excited on a structured perfect conductor surface;

European Optical Society Annual Meeting
2010年10月25日, Paris, France

(2) S. Kubota, F. Miyamaru, M. W. Takeda, M. Hangyo, K. Takano, and H. Miyazaki
Terahertz response of fractal metamaterials;

International Symposium on Frontier of Terahertz Spectroscopy IV, 2010年10月20日, 長野

(3) M. Kamijyo, F. Miyamaru, M. Takeda, M. Hangyo, K. Takano, and H. Miyazaki;
Terahertz response of metal hole arrays;
International Symposium on Frontier of Terahertz Spectroscopy IV, 2010年10月20日, 長野

(4) K. Takano, T. Kawabata, F. Miyamaru, S. Kuboda, M. W. Takeda, and M. Hangyo;
Planar and three-dimensional metamaterials in the terahertz region;

The International Conference on Nanophotonics 2010, 2010年5月30日, 筑波

(5) 笹川侑希, 宮丸文章, 武田三男, 宮寄博司;

テラヘルツ領域における金属開孔アレイを用いた高感度反射センシングの研究;
日本分光学会 テラヘルツ分光部会 国際シンポジウム, 2009年10月23日, 福井

(6) S. Kubota, F. Miyamaru, M. W. Takeda;
Terahertz response of fractal metamaterials;

The 3th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave 2009, 23 September, Busan, Korea

(7) K. Takano, F. Miyamaru, K. Akiyama, Y. Chiyoda, H. Miyazaki, M. W. Takeda, Y. Abed, Y. Tokuda, H. Ito, and M. Hangyo;
Terahertz Responses of Near Self-Complementary Metallic Checkerboard Patterns;

The 3th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave 2009, 23 September, Busan, Korea

(8) F. Miyamaru, M. W. Takeda, K. Takano, M. Hangyo, and H. Miyazaki;

Coupling Between Localized Resonances and Lattice Resonances in Resonant Transmission of Metal Hole Arrays;

The 3th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave 2009, 23 September, Busan, Korea

(9) 窪田志朗, 宮丸文章, 武田三男, 萩行正憲, 高野恵介, 宮寄博司;

フラクタルメタマテリアルのテラヘルツ電磁応答;

第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日, 富山

(10) 上條元嗣, 宮丸文章, 武田三男, 萩行正憲, 高野恵介, 宮寄博司;

カゴメ格子金属開口アレイのテラヘルツ応答特性;

第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日, 富山

(11) F. Miyamaru, K. Takano, M. Takeda, and M. Hangyo;

Transmission characteristics of terahertz metamaterials fabricated on polyethylene terephthalate films;

THE THIRD INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCED ELECTROMAGNETIC MATERIALS IN MICROWAVES AND OPTICS, 2009, 1 September, London, United Kingdom

(12) F. Miyamaru, C. Otani, M. W. Takeda
Highly sensitive terahertz imaging with plasmonic crystals;

European Optical Society Annual Meeting 2008, September 29-October 2, 2008, Paris, France

(13) 宮丸文章, 武田三男, 泰磨一夫;
フレキシブルメタマテリアルのテラヘルツ光学応答特性;

2008年秋季 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月8日, 中部大

(14) 笹川侑希, 宮丸文章, 武田三男, 大谷知行;

金属フォトリソニック結晶のテラヘルツ反射特性;

2008年秋季 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月8日, 中部大

(15) 齊藤 祐, 宮丸文章, 武田三男, Liu Liyu, Hou Bo, Wen Weijia, Sheng Ping;

H型フラクタルアンテナからのテラヘルツ放射特性;

2008年秋季 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月8日, 中部大

〔図書〕(計1件)

フラクタルメタマテリアルによるテラヘルツ電磁波の制御”, “トポロジーデザインング
武田三男, 宮丸文章, 斎藤 祐, 編集: 手塚育志, *NTS*, pp386-396, Chap. 5 (2009)

〔その他〕

ホームページ等

http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz/kenkyusitu/kenkyusitu_ronbun.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 三男 (TAKEDA MITSUO)
信州大学・理学部・教授
研究者番号: 20115653

(2) 研究分担者

宮丸 文章 (MIYAMARU FUMIAKI)
信州大学・理学部・准教授
研究者番号: 20419005

(3) 連携研究者

()

研究者番号: