

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 5月 10日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560354

研究課題名（和文） 赤外線遮断特性を持つ薄膜形メタマテリアルの研究

研究課題名（英文） Study of film-type metamaterials with rejection characteristics for infrared rays

研究代表者

久保 洋 (KUBO HIROSHI)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50205126

研究成果の概要（和文）：遮断特性を持つ薄膜型メタマテリアルについて検討を行っている。これは誘電体基板上に2次元的に配置された平行導体ストリップで構成されている。まずマイクロ波領域で遮断特性の高性能化を検討する。新しい形のストリップにより入射波の偏波方向に依存しない特性の構造を実現する。波の入射角度依存性も改善する。3枚のストリップの形状を調節して遮断周波数の広帯域化を行う。リソグラフィ技術を用いることによって赤外領域に遮断特性を持つメタマテリアルを作製評価し、ストリップ構造を反映した透過特性を得る。

研究成果の概要（英文）：A film-type metamaterial with rejection characteristics is investigated. It is composed of parallel metal strips put two-dimensionally on a dielectric substrate. First, the structure is discussed for obtaining the high performance of the rejection characteristics in microwave region. The structure with characteristic independent of polarization direction of the incident wave is realized by using a new metal strip shape. The dependence on the incident angle of the wave is also improved. By adjusting the shape of three parallel strips, the rejection frequency band can be broadened. The metamaterial with rejection characteristics in an infrared range is fabricated using a lithography technique and the transmission characteristics reflecting the strip pattern is obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：マイクロ波・ミリ波

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波分野において負屈折率媒質という自然界にはない特性を実現するメタマテリアル(波長よりも小さな粒子を多数並べた人工媒質)が提案されている。この媒質は負の屈折率という物理的にエキゾチックな特性を持つため関心が高い。メタマテリアルの特性は等価誘電率及び透磁率で表される。負屈折率媒質を実現するため、ある周波数で両方が負となる媒質の研究が盛んであるが、どちらか片方だけが負となるような媒質も興味深い特性を示し研究されている。結局、この分野の研究は誘電率、透磁率の正負の値を組み合わせて独特の特性を持たせることと、そのような誘電率、透磁率を持つ粒子の実現が鍵となる。研究代表者は人工誘電体、磁性体の粒子形状の研究を行ってきており、特に磁性体粒子については薄い平面内に作成される形状を提案し、負の誘電率、透磁率を実現する粒子と構造及びその組み合わせの検討を行った。その結果、人工磁性体粒子とその配置により、透磁率が負の領域と誘電率が負の領域を周波数軸上でそれぞれ独立に設計する方法を明らかにした。周波数軸上でこれらの定数の正負を利用する研究はあまり行われていなかった。

さてガラス越しの日光は、その赤外線の効果により室内、車内の温度を上昇させる。ビルの大きなガラス窓からの赤外線の熱を冷やすために大量の電力が使用されている。逆に冬季に暖房器具から放射される遠赤外線は窓ガラスから逃げてしまいエネルギーの無駄である。ガラス中に不純物を入れて赤外光を防ぐ遮断ガラスはこれまでも使用されているが、赤外線だけでなく可視光も同様に遮断するため、効果を強くすると暗くなるという欠点がある。これを改善するため赤外光を反射させる材料の研究が行われている。

2. 研究の目的

メタマテリアル媒質の透磁率が負となる周波数領域と誘電率が負となる周波数領域を周波数軸上で並べて遮断帯域を設計し、特定の周波数帯の電磁波を遮断する板状の媒質を作る。まず製作の容易なマイクロ波領域で基本および高性能化の検討を行い、この結果を基にして赤外線を遮断する薄膜メタマテリアルを作成し基本特性を確認する。マイクロ波領域で行う高性能化のための検討項目として、媒質の遮断特性に関して入射する電磁波の偏波依存性、入射角度が斜めの際の特性、および広帯域化がある。また赤外線領域では微細加工技術による作成方法を

検討する。

3. 研究の方法

ここで検討を行う板状メタマテリアルの構造を図1に示す。x-y平面上に置いた誘電体基板の上の表裏面に導体ストリップを向かい合わせにおいて、これを周期的に並べている。この構造にx方向に偏波した平面波が入射したとき周波数により2種類の共振が起こる。図2(a)に示す共振モードでは表面と裏面の導体ストリップに同方向の電流が流れ上下端に貯まる電荷により分極が起き誘電性を示す。図2(b)に示す共振モードでは鎖交する外部磁束により表面と裏面の導体

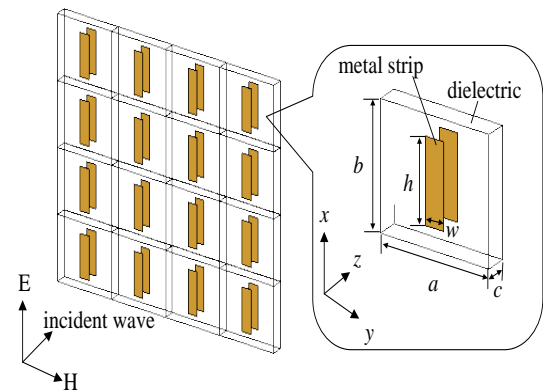


図1 周波数遮断特性を持つ板状メタマテリアルの構造

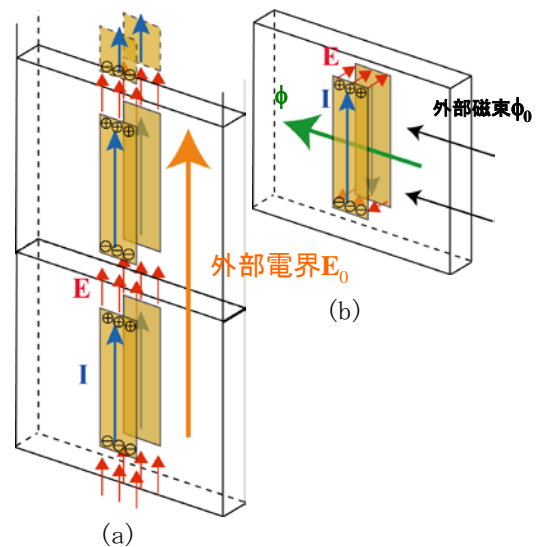


図2 (a)誘電性共振モードの電界と(b)磁性共振モードの電界の模式図

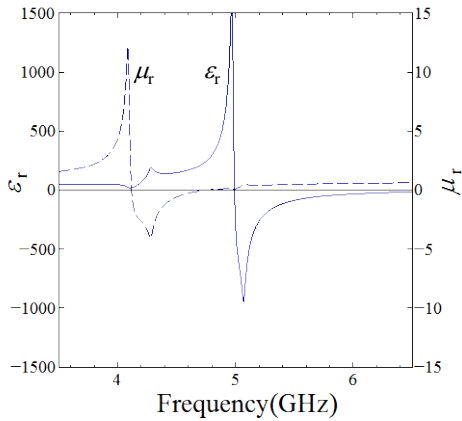


図3 等価透磁率と透過誘電率の周波数特性

ストリップに反対方向の電流が流れ二つのストリップ間に発生する電界を含めて周回するように電流が流れる。これにより磁界が発生し磁性を示す。

この構造を均質媒質とみなし等価誘電率および透磁率を計算すると図3のようになる。透磁率が正から負の値へ大きく変化している周波数が磁性の共振モードの周波数であり、誘電率が大きく変化している周波数が誘電性の共振モードの周波数である。二つのモードの共振周波数付近で、誘電率あるいは透磁率のどちらかの符号が負となる周波数領域が出来ており入射した電磁波は遮断され透過が小さくなる。

4. 研究成果

マイクロ波領域で遮断特性の高性能化を検討する。図1の構造から分かるように、この遮断特性はストリップがx軸方向に伸びているためx軸方向に偏波した電磁波に対して示すもので、y軸方向に偏波した電磁波には遮断特性を示さない。図4では表裏の導体を十字型にして作成した板状メタマテリアルを示している。x軸方向とy軸方向の双方向に金属ストリップが伸びているため偏波依存性がなくなる。また電流の最も多く流れるストリップ中央部で幅が広がることからインピーダンスが下がり、磁性が大きくなることを期待できる。透過反射特性のシミュレーション結果と試作した板状媒質の特性を図5に示す。実験は向かい合わせに置いたホーンアンテナの中央に媒質を置いて測定し、この値を、媒質を置いてないときの透過量と、完全に反射させる金属を置いた時の反射量で規格化している。赤線で示している測定値は間接波の影響で上がり下がりが見られるものの、概形としてシミュレーション値と一致している。どちらの値も透過量が30dB以上下がっており、図1の構造に比べ遮断特性

が強くなっている。また板状メタマテリアルを90度はもちろん、45度回転させても遮断特性は基本的に変化せず、入射波の偏波方向に対する依存性がないことが示された。

図1の構造において、波が板状メタマテリアルに垂直に入射した場合に比べて、斜めに入射すると遮断特性が変化する。特に磁界の向きが板に平行で、電界の向きが板に対して角度を持って入射したとき、誘電性の共振モードによる透過係数のピークの周波数が高いほうへ移動して、遮断帯域特性が崩れてしまう。これはx方向に並んだストリップに到達する波の位相がストリップにより異なるため、ストリップ端に集まる電荷の位相もストリップにより異なる。このため上下方向のストリップ間の静電容量が小さくなり、誘電性のモードの共振周波数が上がり、ピーク周波数も高い方向へ移動する。これを改善するために図6に示すようにストリップの間に横方向に伸びた細い導体パターンを追加する。これにより上下ストリップ間の静電容量が安定

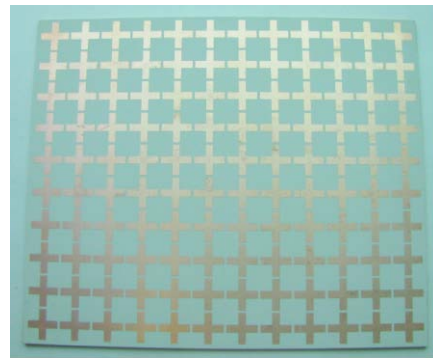


図4 十字型金属パターンを使った板状メタマテリアル

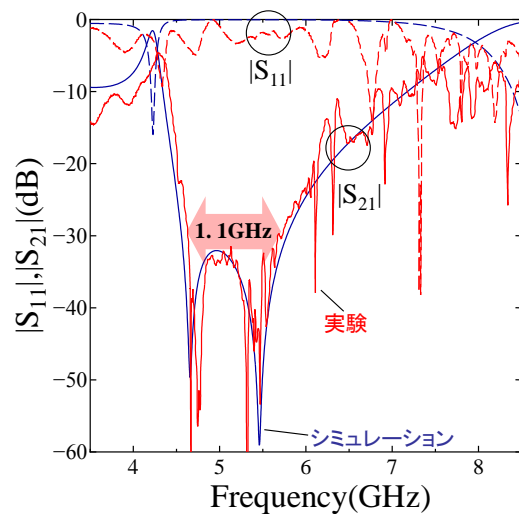


図5 十字型金属パターン板状メタマテリアルの透過反射特性

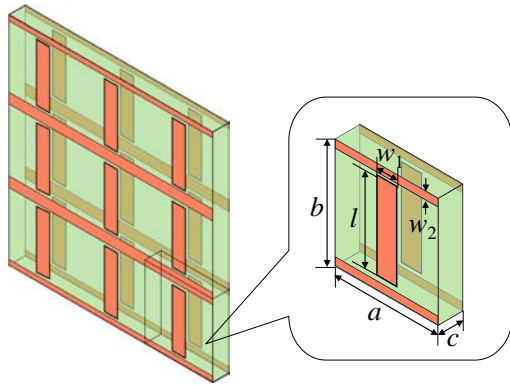


図6 横方向に伸びた細い導体パターンをストリップの間に追加した板状メタマテリアル

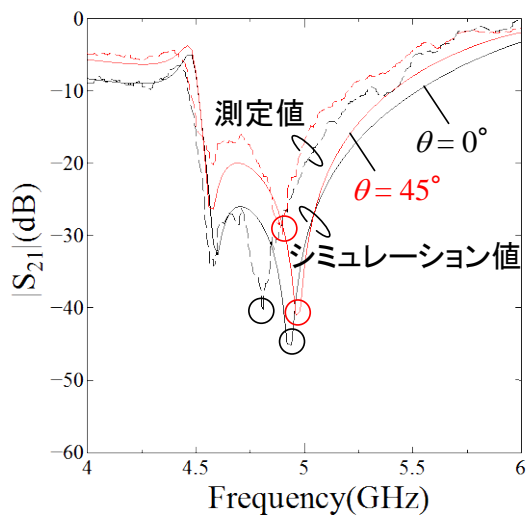


図7 図6の構造の板状メタマテリアルの透過特性

化しピーク周波数の移動を小さくすることが期待できる。図7にその透過特性を示す。実線がシミュレーション値で破線が測定値を表す。図には示していないが、細い導体パターンがないとき、入射角度 $\theta=0^\circ$ に比べて 45° では周波数が400MHz移動していた。細い導体パターンを入れるとシミュレーションでは30MHzに、実験でも100MHzまでの移動に改善されている。

図8にはストリップを3枚にした板状メタマテリアルの単位セルの構造を示している。3枚のストリップにより三つの周波数で共振モードが得られる。波を入射させたときに透過係数がピークとなる周波数での電磁界分布は、固有モード計算によって得られる電磁界分布のようにきれいなものではない。しかし、その電磁界分布を参考にしてストリップ幅を変化させることで透過係数がピークとなる周波数を調節できる。図9にはこの透過反射係数のシミュレーション値を示し

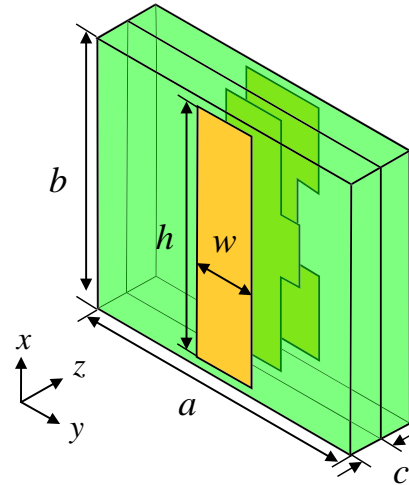


図8 3枚のストリップで構成される板状メタマテリアルの単位セル

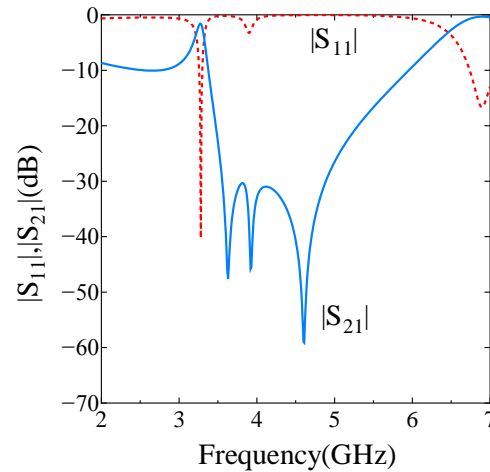


図9 図8の構造の板状メタマテリアルの透過反射特性

ている。透過係数のピークが3個になり遮断帯域が広がっている。

赤外領域に遮断特性を持つ薄膜型メタマテリアルを設計し、リソグラフィ技術を用いてサブミクロンオーダーのストリップパターンの作製を行った。2枚のストリップを用いたメタマテリアル作製においては上下層の位置合せ精度が重要であることから、今回は上層パターンを作製する際に、下層パターンをマスクとして用いるアライメントフリーな作製を試みた。このため基板および中間層は可視光から赤外領域までを透過する必要があることから CaF_2 を選択した。下層(あるいは単層)ストリップは CaF_2 基板上にAuを成膜した後、電子線直接描画およびウェットエッチングとドライエッチングにより作製

した。透過特性の評価はフーリエ変換赤外分光分析装置により行った。図 10 に単層の板状ストリップの透過特性のシミュレーション値および測定値を示す。偏波面はパターン長軸方向 (0° 偏波) である。挿入図は偏光面をパターン短軸方向にした場合であり、阻止帯域が現れていない。一方、 0° 偏波の場合は波長 $4.5 \mu\text{m}$ 近傍に阻止帯域がみられることから、構造を反映した透過特性が得られている。また、シミュレーションと比較すると遮断特性はブロードであるが中心波長はほぼ一致している。

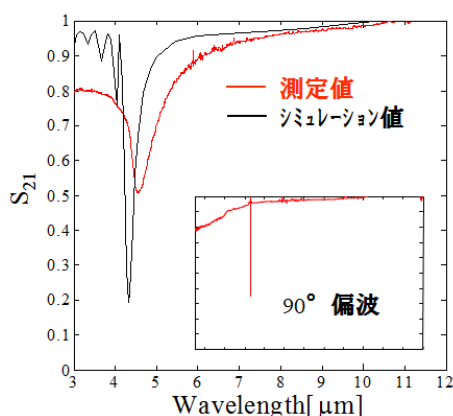


図 10 赤外領域に遮断特性をもつ1枚のストリップからなる板状メタマテリアルの透過特性

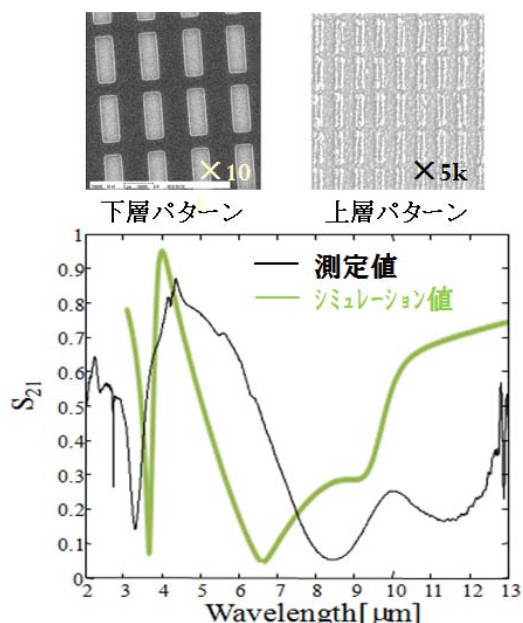


図 11 作製した図 1 の構造の板状メタマテリアルの (a) 下層および (b) 上層ストリップパターンの SEM 像、および、(c) 赤外領域における透過特性

次に、2枚のストリップからなる板状メタマテリアルの作製を行った。CaF₂中間層はスパッタ法により作製した。作製したCaF₂膜 (280 nm) の透過率は 90% 以上であった。上層パターンの作製は、裏面から光を当てることで下層パターンをマスクとしたリフトオフ法により形成した。図 11 (a), (b) にそれぞれ下層および上層AuパターンのSEM像を示す。下層パターンは設計値通りの値が得られているのに対して、上層パターンは下層パターンの凹凸のため、太る結果となった。図 11 (c) は 0° 偏波に対する透過特性のシミュレーション値および測定値である。シミュレーションに比べ、測定値では遮断特性のピーク位置が短波長側へシフトしている。これは設計値に比べ、上層パターンが太っていること、および、中間CaF₂層が薄いため (設計値 300 nm) と考えられる。しかしながら、図からわかるように同一平面内と上下層の2つの共振モードに対応した遮断特性が赤外領域において得られた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① H. Kubo, H. Iida, and A. Sanada, A Sheet-Type Metamaterial with Rejection Characteristics in a Frequency Range, 2009 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, 査読有り, Singapore, CD-ROM, 2009

[学会発表] (計 6 件)

- ① 小野航太郎, 久保洋, 真田篤志, 山本綱之, 3枚の平行導体ストリップで構成した人工媒質による周波数阻止特性, 平成 23 年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011 年 10 月 22 日, 広島工業大学, 広島
- ② 長尾達也, 大山陽平, 久保洋, 浅田裕法, 赤外領域におけるSingle Negative 粒子構造の作成と評価, 平成 23 年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011 年 10 月 22 日, 広島工業大学, 広島
- ③ 大山陽平, 久保洋, 真田篤志, 山本綱之, 向かい合った金属パターンで構成される平板型人工媒質のTM波に対する阻止特性, 2011 電子情報通信学会総合大会, 2011 年 3 月 15 日, 東京都市大学, 東京都
- ④ 大山陽平, 久保洋, 真田篤志, 山本綱之, 小寺敏郎, 金属ストリップで構成される平板型人工媒質のTM波に対する遮断特性, 平成 22 年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010 年 10 月 23 日, 岡山県立大学, 総社
- ⑤ 中村彰宏, 長尾達也, 浅田裕法, 大山陽平, 久保洋, 微細加工を用いた赤外領域用平行導体型粒子作製プロセスの基礎的

検討, 平成 22 年電気・情報関連学会中国
支部連合大会, 2010 年 10 月 23 日, 岡山
県立大学, 総社

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 洋 (KUBO HIROSHI)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号 : 50205126

(2) 研究分担者

浅田裕法 (ASADA HIRONORI)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号 : 70201887