

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760290

研究課題名(和文)極薄いメタマテリアル構造の開発

研究課題名(英文)Development of Thin Metamaterial structures

研究代表者

有馬 卓司(Arima, Takuji)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20361743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ波領域におけるメタマテリアルの新たな領域・分野への応用を目的に、ごく薄いメタマテリアル構造の開発を行った。まず、構造の開発の中核となるシミュレーション手法の開発を行った。これまでの手法では、メタマテリアルに電磁波が斜め入射した際の特性は効率よく解析できなかったが、開発した手法では精度良く解析できることが分かった。この手法を用いて、薄型のメタマテリアル構造の解析を行った。これまでの構造は球体を用いていたために比較的厚い構造であったが、それを円板構造に置換えることに成功した。このため薄いメタマテリアル構造の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, thin metamaterial structures have been developed. First, numerical analysis method for metamaterials are researched because, there were no method to analyze oblique incident case to metamaterial structures. An efficient analysis method have been proposed which based on ARMA-FDTD method. The method can analyze oblique incident case with high accuracy. Furthermore, thin metamaterial structures are developed by using the proposed analysis method. The developed structure has same characteristics to realize thin metamaterial structures. The developed structure indicates same characteristics as ordinary thick metamaterial structures.

研究分野：通信・ネットワーク工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク

キーワード：メタマテリアル FDTD法

1. 研究開始当初の背景

メタマテリアル技術とは、負の屈折率、磁壁、金属のみで電波吸収体実現、波長より細かな電界を局在させる、などこれまで自然界には存在しない現象を実現する技術であり、現在実用段階に来ている。マイクロ波領域では、アンテナの近傍に配置する事で、利得向上および省エネルギー化を実現でき、さらには、人体に吸収される電磁波の量を低減できるなど多くの利点があり、一部は実際に実用化されている。メタマテリアルの構造は図1に示すように、同じ構造を周期的に配置する周期構造により実現される。ある大きさのメタマテリアルを作成するには、横(広さ)方向および厚さ方向に、ある一つの構造を周期的に並べる事により作製される。本研究代表者も、これら研究に従事していくつか成果を上げてきた。これら研究より、メタマテリアルを応用する上で、メタマテリアルを設置するスペースは限られている事から、その厚みが問題になり、場合によってはメタマテリアルを設置できない場合がある事が分かってきた。

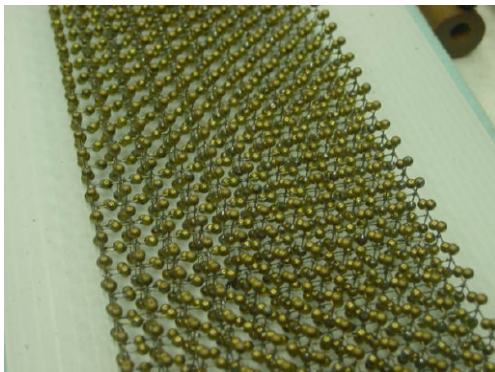


図1 周期構造 (メタマテリアル) の例

2. 研究の目的

現在、実用化されているメタマテリアル構造は必ずある程度(マイクロ波領域で数 cm 程度)の厚みが必要である。これは、メタマテリアル構造の作製に周期構造を用いており、厚さ方向にも同じ構造を並べる必要があるためである。この厚みが、薄型化できれば、その応用範囲は格段に広がり、これまで用い

られなかった領域に対して応用が期待できる。さらには、薄いという特性を生かし、曲面に配置する事や、折り曲げて配置するなど、新たな配置方法を用いてこれまでにない製品が開発される可能性がある。以上より本研究では、シミュレーションおよび実験を用いた極薄いメタマテリアルの開発および応用に関する一連の研究を行う事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では下記(1)~(3)をそれぞれのパッケージと考え、各パッケージを明らかにし、本研究課題遂行をおこなった。

(1) 構造の特性についてコンピュータを用いて解析するためのシミュレーションは、より良い構造を短い時間で開発するために非常に重要と考えられる。そこで、本研究では研究手法(1)として、シミュレーション技術の開発を行った。シミュレーション手法は、時間領域において微分を差分近似する FDTD 法を用いた。FDTD 法はそのシンプルなアルゴリズムにより複雑なモデルも比較的容易に解析することができる。FDTD 法を用いてメタマテリアルなどの周期構造を解析するには、図2に示すように周期構造を構成する単位構造に周期境界条件を適用することで、効率よく解析できる。

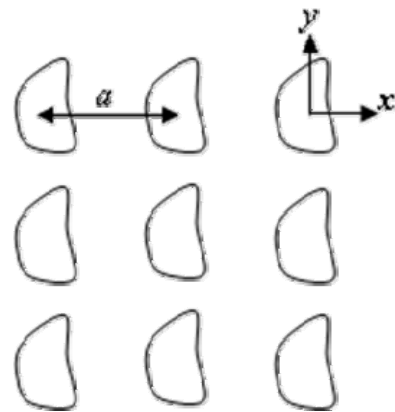


図2. 周期構造と単位構造

この周期構造は、いくつか提案されているが、斜め入射に対して有効な手法は少なく、有効性も十分明らかになっていない。そこでまず、ここでは、斜め入射に対して有効な解析手法の開発を行う。

(2) 薄型で負の誘電率特性を示す構造に関する研究について検討を行った。これまで研究代表者らが、示してきた構造の概略図を図3に示す。

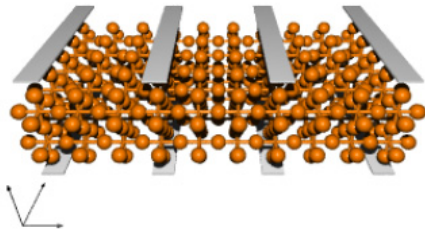


図3. これまでの提案構造

この図から分かるように厚みがあることが分かる。本研究では、この構造の薄型化を図った。薄型化を実現する方向性としては、この構造の等価回路を考えて、その電気定数が厚みを変えても変化しないように設計を行った。

3. 研究成果

(1)メタマテリアル開発に向けて、効率的な解析手法の開発を行った。ここでは、constant-k FDTD法を用いた。まず、周期境界条件は周波数領域で

$$E(x-T_x, y-T_y, w) = E(x, y, w)e^{jk_x T_x} e^{jk_y T_y}$$

とあらわされる。この式は、周期構造中においては位相が周期的に異なることを示している。ここで、 T_x, T_y は周期間隔である。

FDTD法は時間領域の解法のために、上式をフーリエ変換する必要がある。しかし、斜め入射においては未来に時間の値が必要になってしまう。Constant-k FDTD法においては、波数 k を定数とみなすことでこの問題を

回避する。波数を定数とした周期境界条件を図4に示す FDTD法セルに組み込む。

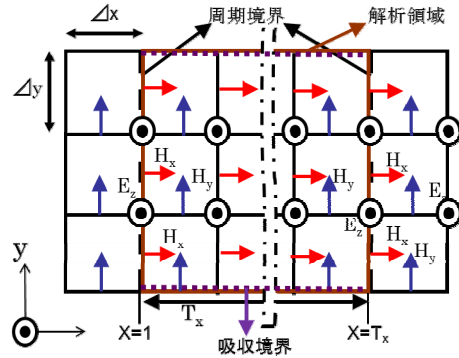


図4. FDTD法セル配置

しかし、この手法を用いても、斜め入射に対しては解がすぐには収束しないことが知られている。図5に解析例を示す。この例では、FDTD法を用いて周期構造を解析し、ある点における電界の時間変化を調べた例である。

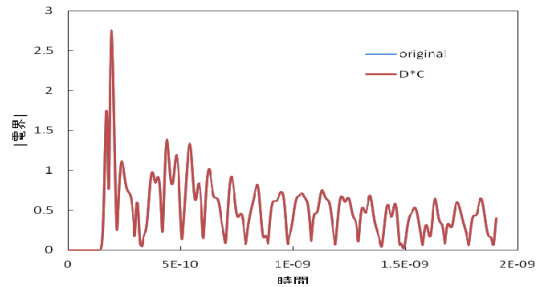


図5. 時間領域波形

このように、電界は収束することなく周期的に変化し続ける。これでは、フーリエ変換することができない。斜め入射は現実の問題においては様々な角度特性に相当するために非常に重要である。そこで、本研究ではconstant-k FDTD法にARMA(自己回帰移動平均モデル)を用いた。ARMAアルゴリズムではこの問題に対して、有理関数近似を用いて予測する手法であり。ARMAアルゴリズムでは、電界磁界の電氣的応答を伝達関数と考え、伝達関数を

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_q Z^{-q}}{1 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_p Z^{-p}}$$

と有理関数もちいて近似する．ここで $Z=\exp(j\omega)$ である．このようにすることで，電界計算について結果が収束する前に打ち切り，その後の計算結果を予測し，正しい解を近似的に得ることができる．

この ARMA-FDTD 手法を用いて実際に解析した結果を示す．解析するモデルは図 6 に示す周期構造とした．このモデルは FSS (Frequency Selective Surface) と呼ばれる特定の周波数を遮断するためメタマテリアルの一種である．この構造の反射係数を解析した．その結果を図 7 に示す．

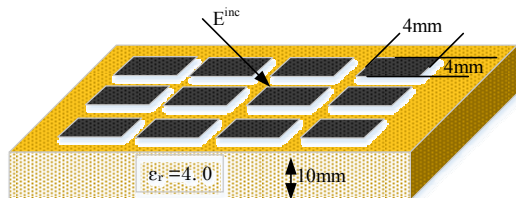


図 6. FSS 構造

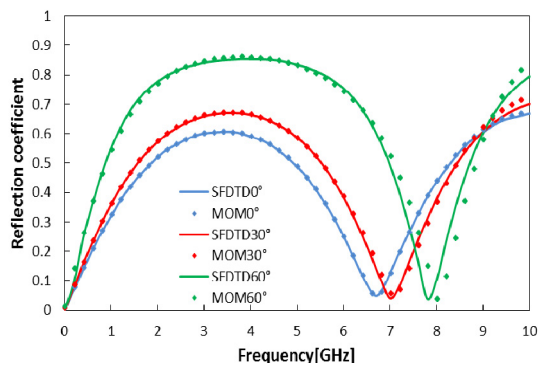


図 7. 解析結果

この結果は，図 6 の周期構造に対して，ARMA アルゴリズムを組み込んだ constant-k FDTD 法を用いて，構造の反射係数をシミュレーションした結果である．電磁波の構造への入射角度は， 0° から 60° まで計算し，その精度を他の手法と比較している．比較には，電磁界解析の代表的な手法であるモーメント法を用いた．このモデルは非常に単純な構造のためにモーメント法を解析が可能である．モーメント法の解析精度は非常に高いことが知られ

ているので，ここでは比較対象とした．この解析結果より，入射角度が高くなっても ARMA アルゴリズムを constant-k FDTD 法に組み込んでシミュレーションした結果は非常によく一致しており提案手法の有効性が確認できた．次にさらなる有効性の確認のために本研究でも注目している EBG (electrical band gap) 構造の解析をおこなった．EBG 構造は磁壁特性にを用いる事により，電磁波に対して絶縁体として用いることができるために，しばし応用されている．この構造は，先ほどに解析した FSS 構造の裏に金属の板を裏打ちした構造である．その解析モデルを下図に示す．

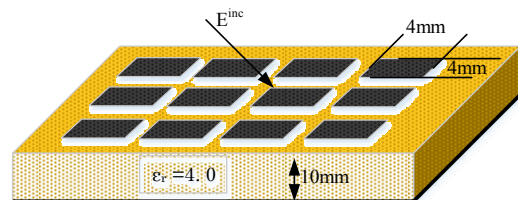


図 8. EBG 構造

このモデルは，金属で裏打ちされているために，反射係数は常に 1 である．そこで反射波の位相をシミュレーションした．その結果を図 9 に示す．

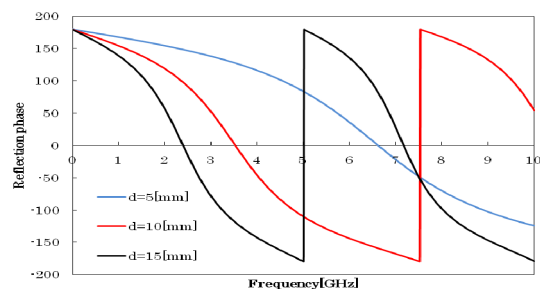


図 9. EBG の反射位相特性

この結果より，EBG 構造は入射角度が高くなると反射位相が 0 度となる周波数が高くなることがわかった．

以上より，これまで精度のよいシミュレーションが困難であった，周期構造の斜め入射の問題に対して，有効な解析手法を示すことが出来，その成果を論文等で広く解

説してきた。

(2)薄型メタマテリアル構造の開発について研究を行った。開発を行った構造を図 10 に示す。この構造は図 1 の構造をもとに薄型化に成功したものである。これまでの構造では、球を用いていたがこれが薄型化できない原因と考え、球と等価の性質を示す構造の開発を行った。その結果、図 10 に示す様に、円板構造を用いる構造に行きついた。この特性は、図 1 に示す球の構造と同じでありながら、厚みを大幅に薄くすることが出来た。

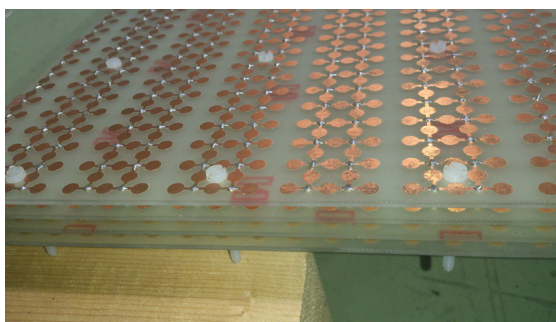


図 10. 薄型化した構造

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 3 件)

- ① Hiroaki Sakamoto, Toru Uno, Takuji Arima, and Yujiro Kushiya, "Classification of Degenerate and Non-degenerate Modes of Photonic Crystals in FDTD Analysis by Group theory" IEICE Communication express, Vol. 2, No. 5, pp. 211-216, 2013. 5, DOI:10.1578/comex.2.211, 査読有
- ② Yujiro Kushiya, Takuji Arima, Toru uno, "Experimental verification of spoof surface plasmons in wire metamaterials", Optics Express, scheduled for Vol. 20, Iss. 16, pp. 18238-18247 (07/30/2012) DOI:10.1364/OE.20.018238, 査読有

- ③ Amin Gul Hanif, Takuji Arima, Toru Uno "New Derived Finite-Difference Frequency-Domain Method Used for Band Structure Analysis of 2-D EBG Structure Composed of Drude-Type Dispersive Media" IEICE Electronics Express Vol. 9, No. 11, pp. 951-957, 2012, DOI : 10.1587/elex.9.951, 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 坂本 寛明, 宇野 亨, 有馬卓司, "ASM-FDTD 法を用いた周期構造解析空間中の非周期アンテナの入力インピーダンス解析", 2014 年電子情報通信学会総合大会論文集, B-1-134, p.134, 2014. 3. 19, 新潟県新潟市新潟大学
- ② Takuji Arima, Yugo Tanno, Toru Uno, "An efficient edge structure of finite size EBG structure", Proc. Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, 2014. 1. 10, ベトナムハノイ Le Quy Don Technical 大学
- ③ 丹野雄悟, 有馬卓司, 宇野 亨 "有限 EBG 構造における構造端部の取り扱いについて", 2013 年 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演予稿集, B-1-130, p. 130, 2013. 9. 20, 福岡県福岡市福岡工業大学
- ④ Hiroyuki Sakamoto, Toru Uno, Takuji Arima, "Classification of Degenerate and Non-degenerate Modes of Photonic Crystals by Group Theory in FDTD Analysis", Proceedings of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, pp.716-720, 2013. 5. 23, 広島県広島市広島国際会議場
- ⑤ Amin Gul Hanif, Takuji Arima and Toru Uno, "Eigen modes Analysis in

Drude-type Dispersive EBG Structures
in Frequency Domain,” International
Symposium on Antennas and Propagation,
pp. 1542-1545, 2012. 11. 2, 名古屋県名古屋
市名古屋国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有馬 卓司 (ARIMA, Takuji)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20361743

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし