

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-114489

(P2006-114489A)

(43) 公開日 平成18年4月27日(2006.4.27)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 B 3/00 (2006.01)	HO 1 B 3/00 Z	4 G 0 3 0
HO 1 G 4/12 (2006.01)	HO 1 G 4/12 4 1 5	5 E 0 0 1
HO 1 F 1/053 (2006.01)	HO 1 F 1/04 C	5 E 0 4 0
CO 4 B 35/00 (2006.01)	HO 1 F 1/04 H	5 G 3 0 3
HO 1 F 1/08 (2006.01)	CO 4 B 35/00 J	

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2005-260735 (P2005-260735)  
 (22) 出願日 平成17年9月8日 (2005.9.8)  
 (31) 優先権主張番号 特願2004-267606 (P2004-267606)  
 (32) 優先日 平成16年9月14日 (2004.9.14)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 304021277  
 国立大学法人 名古屋工業大学  
 愛知県名古屋市昭和区御器所町 (番地なし)  
 (74) 代理人 100096840  
 弁理士 後呂 和男  
 (74) 代理人 100097032  
 弁理士 ▲高▼木 芳之  
 (74) 代理人 100124187  
 弁理士 村上 二郎  
 (74) 代理人 100124198  
 弁理士 水澤 圭子  
 (71) 出願人 000004547  
 日本特殊陶業株式会社  
 愛知県名古屋市瑞穂区高辻町14番18号  
 最終頁に続く

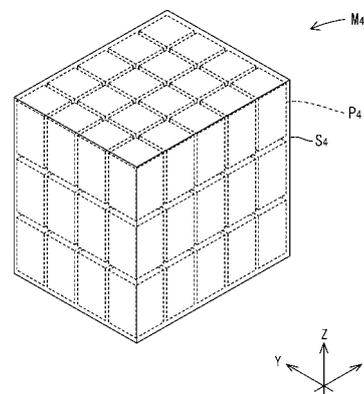
(54) 【発明の名称】 誘電体メタマテリアル、および磁性体メタマテリアル

(57) 【要約】

【課題】 磁性特性や誘電特性などの電気特性を驚異的に高めた材料を提供することを目的とする。

【解決手段】 本発明は、磁性体または誘電体を周期的に配した複合材料(メタマテリアル)である。その結合には、ソフトマテリアルを用いる。磁性体や誘電体の形は、立方体または立方体にやや変形を加えた擬似立方体あるいはその両方を組み合わせたものである。それらを3次元に周期的に配置し、その間をソフトマテリアルで繋いだものである。これらの材料を周期的(1~3次元)に配することによって、誘電特性や磁性特性を本来のものより高い特性を持つ材料を提供できる。誘電体では、チタン酸バリウム(BaTiO<sub>3</sub>)、フォルステライト、ウィルマイトなどが利用され、数倍の誘電率を得ることができる。一方、磁性材料としては、最も磁力の強い1Fe<sub>4</sub>Nd<sub>2</sub>Bより強力な磁性特性を得ることが可能である。

【選択図】 図4



M...メタマテリアル(誘電体メタマテリアル、磁性体メタマテリアル)  
 P...単位構造  
 S...ソフトマテリアル

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

誘電体材料により形成された単位構造の複数が周期的に配列されるとともに、前記単位構造同士が互いにソフトマテリアルにより結合された誘電体メタマテリアル。

## 【請求項 2】

前記単位構造が、立方体、または立方体に変形を加えた擬似立方体、あるいは前記立方体と前記擬似立方体とを組み合わせた形状であることを特徴とする請求項 1 に記載の誘電体メタマテリアル。

## 【請求項 3】

前記誘電体材料が強誘電体材料または常誘電体材料であることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の誘電体メタマテリアル。 10

## 【請求項 4】

前記誘電体材料がチタン酸バリウム ( $\text{BaTiO}_3$ )、チタン酸ストロンチウム ( $\text{SrTiO}_3$ )、フォルステライト ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )、およびウイルマイト ( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ) からなる群より選ばれる 1 種であることを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 3 のいずれか 1 項に記載の誘電体メタマテリアル。

## 【請求項 5】

前記ソフトマテリアルがルチル型酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ )、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{CeTiO}_3$ 、 $\text{NiO}_2$ 、Cu、Bi、グラファイト、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)、熱可塑性樹脂、および熱硬化性樹脂からなる群より選ばれる少なくとも 1 種であることを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 4 のいずれか 1 項に記載の誘電体メタマテリアル。 20

## 【請求項 6】

磁性体材料により形成された単位構造の複数が周期的に配列されるとともに、前記単位構造同士が互いにソフトマテリアルにより結合された磁性体メタマテリアル。

## 【請求項 7】

前記単位構造が、立方体または立方体に変形を加えた擬似立方体あるいはその両方を組み合わせた形状であることを特徴とする請求項 6 に記載の磁性体メタマテリアル。

## 【請求項 8】

前記磁性体材料がネオジ鉄ボロン ( $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ )、鉄 (Fe)、ニッケル (Ni)、およびサマリウムコバルト ( $\text{SmCo}_5$ ) からなる群より選ばれる 1 種であることを特徴とする請求項 6 または請求項 7 に記載の磁性体メタマテリアル。 30

## 【請求項 9】

前記ソフトマテリアルがルチル型酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ )、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{CeTiO}_3$ 、 $\text{NiO}_2$ 、Fe、Ni、Cu、Bi、グラファイト、ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂、および Si からなる群より選ばれる少なくとも 1 種であることを特徴とする請求項 6 ~ 請求項 8 のいずれか 1 項に記載の磁性体メタマテリアル。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、誘電体材料または磁性体材料を用いたメタマテリアルに関するものである。 40

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、現存する最大の誘電率を持つ誘電体材料としてチタン酸バリウム ( $\text{BaTiO}_3$ ) が知られている。また、現存する最大の磁性を持つ強磁性材料としてネオジ鉄ボロン ( $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ ) 化合物が知られている。

## 【0003】

誘電体材料であるチタン酸バリウム ( $\text{BaTiO}_3$ ) は、その強誘電性によりコンデンサの材料として実用に共されている。この他に誘電体材料としてチタン酸ストロンチウム、フォルステライト、ウイルマイトがあり、共振器、アンテナ等の無線通信の分野において実用に共されている。

## 【0004】

一方、強磁性材料であるネオジ鉄ボロン ( $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ ) 化合物は、結晶電場異方性 (CEF) および形状異方性を備えるため、大きな磁性特性を持っている。また、同じく強磁性材料である鉄は、粒子形状異方性が強いいため大きな磁性特性をもっている。これらは、モータや磁気記録用の材料として実用に共されている。

## 【0005】

なお、強磁性体および強誘電体を使用したメモリ素子材料の例として、特許文献1に示されるものがある。

【特許文献1】特開2002-118237公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

上記の誘電体材料や磁性体材料の誘電率や透磁率 (磁性特性) をさらに増大できれば、より高性能で小型化可能なコンデンサ、共振器、アンテナ、モータ及び磁気記録用の材料等が実現可能である。

【課題を解決するための手段】

## 【0007】

本発明者らは、この改善を達成すべく鋭意検討を重ねた結果、現存する誘電体材料や磁性体材料により形成された単位構造を周期的に配列することにより、誘電率や透磁率を、素材である誘電体材料や磁性体材料がもともと備える誘電率や透磁率と比較して劇的に増大できることを見出した。

## 【0008】

すなわち、上記の課題を解決するための第1の発明は、誘電体材料により形成された単位構造の複数が周期的に配列されるとともに、前記単位構造同士が互いにソフトマテリアルで結合された誘電体メタマテリアルである。

## 【0009】

また、第2の発明は、磁性体材料により形成された単位構造の複数が周期的に配列されるとともに、前記単位構造同士が互いにソフトマテリアルで結合された磁性体メタマテリアルである。

## 【0010】

ここで、「周期的に配列」とは、特定の周期性をもって配列されていれば配列の態様はどのようであっても良く、例えば単位構造の複数個が、一直線上に並んだ1次元周期構造であってもよく、正方格子構造・三角格子構造等のように二次元的に規則的に配列する2次元周期構造であってもよく、面心立方格子構造・体心立方格子構造・単純立方格子構造等のように3次元的に規則的に配列する3次元周期構造であってもよい。

【発明の効果】

## 【0011】

本発明によれば、誘電体材料により形成された単位構造の複数を周期的に配列し、ソフトマテリアルで結合して誘電体メタマテリアルとすることにより、誘電特性を、素材である誘電体材料がもともと有する特性と比較して飛躍的に向上させることができる。

## 【0012】

また、磁性体材料により形成された単位構造の複数を周期的に配列し、ソフトマテリアルで結合して磁性体メタマテリアルとすることにより、磁性特性を、素材である磁性体材料がもともと有する特性と比較して飛躍的に向上させることができる。磁性体材料を周期的に配列させることにより、磁束密度  $B$  は、特に低周波領域において増大する。特に、磁性体材料としてネオジ鉄ボロン ( $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ ) を使用した場合、磁性体メタマテリアルは、素材であるネオジ鉄ボロンがもともと有する透磁率と比較して驚異的に大きくなる。

## 【0013】

このような誘電体メタマテリアル・磁性体メタマテリアルは、高性能で小型化可能なコンデンサ、共振器、アンテナ、モータ及び磁気記録用材料等の材料として利用可能である

10

20

30

40

50

。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

本発明の誘電体メタマテリアルまたは磁性体メタマテリアル（以下、「メタマテリアル」と略記することがある）は、誘電体材料または磁性体材料の単位構造を周期的に配列し、ソフトマテリアルで結合したものである。

【0015】

単位構造を構成する誘電体材料としては特に制限はないが、強誘電体材料または常誘電体材料を好ましく使用できる。より具体的には、チタン酸バリウム（ $\text{BaTiO}_3$ ）、チタン酸ストロンチウム（ $\text{SrTiO}_3$ ）、フォルステライト（ $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ）、ウイルマイト（ $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ ）等を好ましく使用できる。なかでも、フォルステライトおよびウイルマイトとしては、ルチル型酸化チタンを添加することにより共振周波数の温度係数を  $0 \text{ ppm/}$  付近に調整したルチル添加フォルステライト、ルチル添加ウイルマイトを使用することもできる。

10

【0016】

また、単位構造を構成する磁性体材料としては特に制限はないが、ネオジ鉄ボロン（ $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ ）、鉄（Fe）、ニッケル（Ni）、サマリウムコバルト（ $\text{SmCo}_5$ ）を特に好ましく使用することができる。

【0017】

「ソフトマテリアル」とは、電界・磁界をかけたときにヒステリシスをもたない材料のことをいう。本発明の誘電体メタマテリアルに好適なソフトマテリアルとしては、例えばルチル型酸化チタン（ $\text{TiO}_2$ ）、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{CeTiO}_3$ 、 $\text{NiO}_2$ 、Cu、Bi、グラファイト、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂等を挙げることができる。また磁性体メタマテリアルに好適なソフトマテリアルとしては、ルチル型酸化チタン（ $\text{TiO}_2$ ）、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{CeTiO}_3$ 、 $\text{NiO}_2$ 、Fe、Ni、Cu、Bi、グラファイト、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂、Si等を挙げることができる。

20

【0018】

なお、例えば誘電体材料の中には、単位構造を構成する材料としても使用でき、単位構造同士を結合するソフトマテリアルとしても使用できるものがあるが、1つのメタマテリアルを構成する単位構造とソフトマテリアルとは、互いに異なる材料を使用することを要する。

30

【0019】

図1～図5には、誘電体材料、または磁性体材料により形成された単位構造  $P_1 \sim P_5$  を周期的に配列してソフトマテリアル  $S_1 \sim S_5$  で結合したメタマテリアル  $M_1 \sim M_5$  の例を示す。メタマテリアル  $M_1 \sim M_5$  の周期構造は、例えば図1、図2に示すように、単位構造  $P_1$  または  $P_2$  の複数個が一次的に配列する1次元周期構造であってもよく、図3に示すように、単位構造  $P_3$  が二次元的に配列する2次元周期構造であってもよく、図4、図5に示すように、単位構造  $P_4$ 、 $P_5$  が3次的に配列する3次元周期構造であってもよい。特に3次元周期構造であることが、誘電特性または磁性特性の向上のために効果的である。

【0020】

また、単位構造  $P$  の形状には特に制限はなく、例えば図1に示すように直方体であっても良く、図2に示すように立方体であっても良く、円柱（図7参照）等の形状をとることもできる。特に、立方体、または立方体に変形を加えた擬似立方体、あるいは立方体と擬似立方体とを組み合わせた形状であることが好ましい。ここで、「変形を加えた」とは、例えば立方体（正6面体）の辺の長さや角度を変化させること、頂点を削ること等を含み、「擬似立方体」としては、例えば6つの面の一部または全部が長方形で構成される直方体、立方体の頂点が削られた形状の14面体である切頂6面体（truncated-cube）等を例示できる。

40

【0021】

本発明のメタマテリアルの作成方法の一例を、図6A～図6Cを参照しつつ説明する。

50

## 【0022】

まず、誘電体材料（または磁性体材料）により作製したプレート11と、ソフトマテリアルである樹脂により作製した樹脂シート12とを用意する。そして、プレート11の複数枚を、間に樹脂シート12を挟みつつ積層し、積層体13を作製する（図6A）。次に、この積層体13に対し、例えば炭酸ガスレーザー装置を用いてプレート11の板面と直交する方向（Z軸方向）からレーザー光を照射することにより、積層体13をプレート11の積層方向に沿って複数箇所切断する（図6B）。なお、図6Bでは、積層体13をプレート11の積層方向（Z軸方向）と交差する2方向にそれぞれ複数列（具体的には、X軸方向に5列、Y軸方向に4列）に分断しているが、分断の様子は本作成例に特に限定されるものではなく、分断によって分割形成される複数個のプレート片（単位構造P<sub>6</sub>）が周期的に配列していれば良い。次いで、積層体13の切断位置に形成された隙間14の内部を、樹脂シート12の材料である樹脂と同種の樹脂で埋めるとともに、積層体13の外周面を同じ樹脂によりコーティングする。このようにして、誘電体材料（または磁性体材料）により形成された単位構造P<sub>6</sub>（プレート片）の複数個が3次的に配列し、互いにソフトマテリアルS<sub>6</sub>（樹脂シート12、および隙間14の充填と表面コーティングとに使用された樹脂）で結合されたメタマテリアルM<sub>6</sub>が完成する（図6C）。

10

## 【0023】

次に、本発明のメタマテリアルの作成方法の他の例を、図7A～図7Cを参照しつつ説明する。

## 【0024】

まず、誘電体材料または磁性体材料のペースト21を調製する。ペースト21は、誘電体材料または磁性体材料の焼結用の原料粉末と、樹脂（例えばダウ・ケミカル社製熱可塑性セルロースエーテル「エトセル（登録商標）」）と有機溶剤（例えばテルピネロール）とを3本ロールミルで混練する通常の方法により調製することができる。

20

## 【0025】

これとともに、ソフトマテリアルのグリーンシート22を準備する。まず、ソフトマテリアルを構成するセラミックスの原料粉末と、有機バインダ（例えばブチラール系樹脂、アクリル系樹脂）と、可塑剤と、有機溶媒（例えばメチルエチルケトン、エタノール、トルエンの混合溶液）をポットで混合することにより、ソフトマテリアルの原料スラリーを得る。この原料スラリーを、通常のドクターブレードキャスト装置を用いて、PET（ポリエチレンテレフタレート）キャリア部材の上に薄く均一な厚さでキャスト（塗工）した後、ヒータにより約70℃で加熱乾燥し、スラリー中の揮発成分の大部分を揮発させて、グリーンシート22を得る。このグリーンシート22を、打ち抜き金型等の周知の手段を用いて切断し、所定の大きさとする。

30

## 【0026】

次に、このグリーンシート22に、厚さ方向に貫通する複数個の貫通孔23を、メカニカルパンチ装置、あるいは、炭酸ガスレーザー装置を用いて空ける（図7A）。図7Aでは、縦2列、横4列に貫通孔23を配置したが、貫通孔の配列は周期的であれば図7Aの配列に特に限定されない。次いで、この貫通孔23に、例えばスクリーン印刷法により、誘電体材料または磁性体材料を含むペースト21を充填する。

40

## 【0027】

次いで、このように貫通孔23の形成およびペースト21の充填が施されたグリーンシート22Aの複数枚を、貫通孔23が形成されていないグリーンシート22Bを挟んで積層する。そして、ラミネート装置を用いて所定温度条件（例えば80℃）下でシート積層方向に押圧力（例えば5000kgf/cm<sup>2</sup>程度）を付与することにより、各グリーンシート22A、22Bを圧着して一体化させ、積層体24を形成する（図7B）。

## 【0028】

最後に、この積層体24を脱脂（250℃で10時間程度）し、さらに所定温度で所定時間焼成を行う。これにより、ペースト21に含まれる誘電体材料または磁性体材料の原料粉末が焼結し、誘電体材料または磁性体材料の単位構造P<sub>7</sub>となる。また、グリーンシ

50

ート22A、22Bに含まれるセラミックスの原料粉末も焼結して、単位構造 $P_7$ 同士を結合する。このようにして、単位構造 $P_7$ が周期的に配列し、互いにソフトマテリアル $S_7$ で結合されたメタマテリアル $M_7$ が得られる(図7C)。なお、焼成前に、積層体24を必要に応じて適切な大きさにカットしても構わない。

【実施例】

【0029】

<実施例1-1>

誘電体メタマテリアルの誘電特性増大効果を検証するため、チタン酸バリウム( $BaTiO_3$ )の単位構造を周期的に配列した誘電体メタマテリアルのSパラメータをコンピュータシミュレーションにより求めた。

10

【0030】

図1に例示したようにチタン酸バリウムの単位構造 $P_1$ をZ軸方向に3個直列させ、隣り合う単位構造 $P_1$ 間をソフトマテリアル $S_1$ で結合するとともに表面を同じソフトマテリアル $S_1$ でコーティングしたものを単位格子 $G_1$ とした。この単位格子 $G_1$ は、4つの反射面をもつ。この単位格子 $G_1$ をXY方向に複数並列することにより、図4に例示したような3次元周期構造の誘電体メタマテリアルを設計した。但し、単位格子 $G_1$ は、X軸方向に20列、Y軸方向に20列配列した。また、単位構造 $P_1$ の寸法は、幅 $W_1$ ×奥行き $L_1$ ×高さ $H_1 = 0.18\text{ mm} \times 0.18\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 、単位格子 $G_1$ の寸法は、幅 $W_2$ ×奥行き $L_2$ ×高さ $H_2 = 0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ とした。

【0031】

20

このようにして設計した誘電体メタマテリアルについて、FDTD(Finite Difference Time Domain)、FEM(Finite Element Method)を用いてコンピュータシミュレーションによりSパラメータを解析した。

【0032】

Sパラメータのコンピュータシミュレーションによる解析結果を図8に示した。メタマテリアルを形成することによって、28GHz付近で共振ピークが観測された。

【0033】

<実施例1-2>

図2に例示したようにチタン酸バリウムの単位構造 $P_2$ をZ軸方向に5個直列させ、隣り合う単位構造 $P_2$ 間をソフトマテリアル $S_2$ で結合するとともに表面を同じソフトマテリアル $S_1$ でコーティングしたものを単位格子 $G_2$ とした。この単位格子 $G_2$ は、6つの反射面をもつ。この単位格子 $G_2$ をXY方向に複数並列することにより、図5に例示したような3次元周期構造の誘電体メタマテリアルを設計した。但し、単位格子 $G_2$ は、X軸方向に20列、Y軸方向に20列配列した。また、単位構造 $P_2$ の寸法は、幅 $W_3$ ×奥行き $L_3$ ×高さ $H_3 = 0.18\text{ mm} \times 0.18\text{ mm} \times 0.18\text{ mm}$ 、単位格子 $G_2$ の寸法は、幅 $W_4$ ×奥行き $L_4$ ×高さ $H_4 = 0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ とした。

30

【0034】

このようにして設計した誘電体メタマテリアルについて、実施例1-1と同様にしてコンピュータシミュレーションによりSパラメータを解析した。

【0035】

40

Sパラメータのコンピュータシミュレーションによる解析結果を図9に示した。実施例1-1と比較して、Z軸方向の周期の数を3から5に増加させることによって、Sパラメータの共振ピークの低周波側へのシフトが観察された。このことから誘電率の増加が導かれる。

【0036】

<実施例2-1>

実施例1-1のチタン酸バリウムに代えて、透磁率 $\mu = 2000$ の磁性体材料を用いた他は実施例1-1と同様にして3次元周期構造の磁性体メタマテリアルを設計し、コンピュータシミュレーションを行った。

【0037】

50

Sパラメータのコンピュータシミュレーションによる解析結果を図10に示した。メタ材料を形成することによって、20GHz付近で共振ピークが観測された。

【0038】

<実施例2-2>

実施例1-2のチタン酸バリウムに代えて、透磁率 $\mu = 2000$ の磁性体材料を用いた他は実施例1-2と同様にして3次元周期構造の磁性体メタ材料を設計し、コンピュータシミュレーションを行った。

【0039】

Sパラメータのコンピュータシミュレーションによる解析結果を図11に示した。実施例2-1と比較して、Z軸方向の周期の数を3から5に増加させることによって、Sパラメータの共振ピークの高周波側へのシフトが観察された。このことから透磁率の増加が導かれる。

10

【0040】

<実施例3>

磁性体メタ材料の磁性特性増大効果を検証するため、鉄の単位構造を周期的に配列した磁性体メタ材料のSパラメータをコンピュータシミュレーションにより求めた。

【0041】

図12に示すように、幅 $W_5$  × 奥行き $L_5$  × 高さ $H_5 = 2.25\text{mm} \times 2.25\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ に形成された樹脂(ソフト材料 $S_8$ )のブロックに、幅方向に貫通する20個の貫通孔30を高さ方向に均一ピッチで形成した。この貫通孔30内に鉄製のワイヤからなる単位構造 $P_8$ を差し込むことにより、メタ材料 $M_8$ を作製した。

20

このようにして設計した磁性体メタ材料について、Broadband Microstrip Based Methodを用いてSパラメータをコンピュータシミュレーションにより解析した。

【0042】

図13には、磁性体メタ材料のSパラメータのコンピュータシミュレーションによる解析結果を示した(図中、S21wires、S22wiresとして示す)。なお、図13には、対照として、貫通孔30内に単位構造 $P_8$ を差し込んでいないソフト材料 $S_8$ のブロックについての解析結果も併せて示した(図中、S21holes、S22holesとして示す)。メタ材料のSパラメータには、対照と比較して共振ピークの増大および低周波側へのシフトが観察された。

30

【図面の簡単な説明】

【0043】

【図1】1次元周期構造のメタ材料の一例を示す斜視図

【図2】1次元周期構造のメタ材料の他の例を示す斜視図

【図3】2次元周期構造のメタ材料の一例を示す斜視図

【図4】3次元周期構造のメタ材料の一例を示す斜視図

【図5】3次元周期構造のメタ材料の他の例を示す斜視図

【図6A】誘電体材料(または磁性体材料)により作製したプレートを、樹脂シートを挟んで積層した積層体を示す斜視図

40

【図6B】積層体に切れ目を入れた様子を示す斜視図

【図6C】メタ材料の完成形を示す斜視図

【図7A】ソフト材料のグリーンシートに貫通孔を形成した様子を示す斜視図

【図7B】グリーンシートを積層した積層体を示す斜視図

【図7C】メタ材料の完成形を示す斜視図

【図8】誘電体材料としてチタン酸バリウムを用い、Z軸方向の周期数が3である3次元周期構造の誘電体メタ材料について、自由空間法によるSパラメータのコンピュータシミュレーションを行った結果を示すチャート

【図9】誘電体材料としてチタン酸バリウムを用い、Z軸方向の周期数が5である3次元周期構造の誘電体メタ材料について、Sパラメータのコンピュータシミュレーション

50

ンを行った結果を示すチャート

【図10】透磁率  $\mu = 2000$  の磁性体材料を用い、Z軸方向の周期数が3である3次元周期構造の磁性体メタ材料について、Sパラメータのコンピュータシミュレーションを行った結果を示すチャート

【図11】透磁率  $\mu = 2000$  の磁性体材料を用い、Z軸方向の周期数が5である3次元周期構造の磁性体メタ材料について、Sパラメータのコンピュータシミュレーションを行った結果を示すチャート

【図12】実施例3に用いた磁性体メタ材料の構造を示す斜視図

【図13】磁性体材料として鉄を用いた磁性体メタ材料について、Sパラメータのコンピュータシミュレーションを行った結果を示すチャート

【符号の説明】

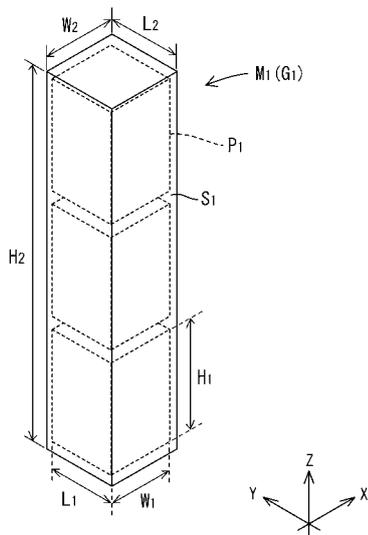
【0044】

M ... メタ材料 (誘電体メタ材料、磁性体メタ材料)

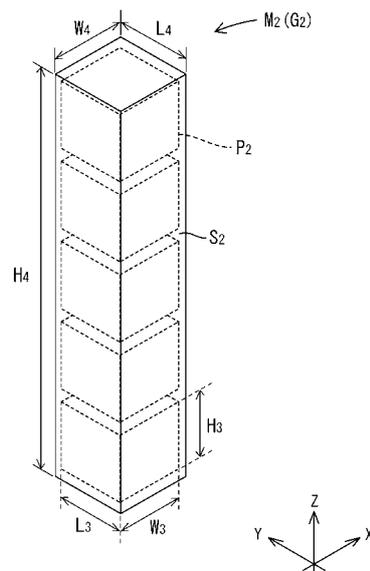
P ... 単位構造

S ... ソフト材料

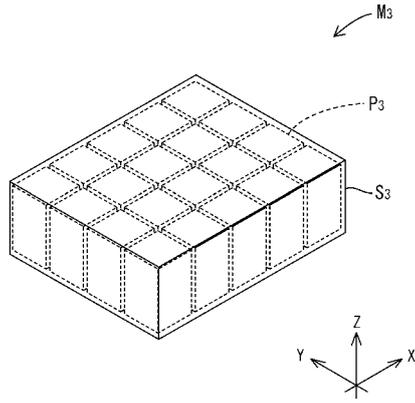
【図1】



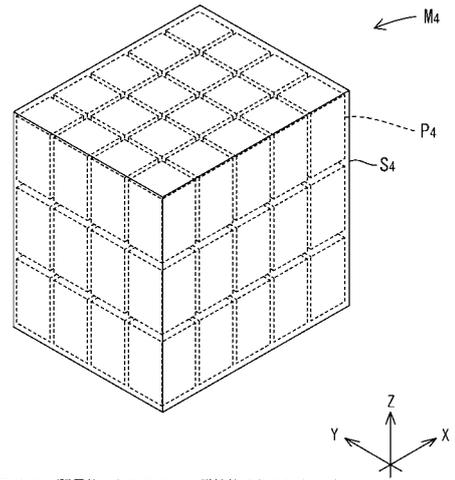
【図2】



【 図 3 】

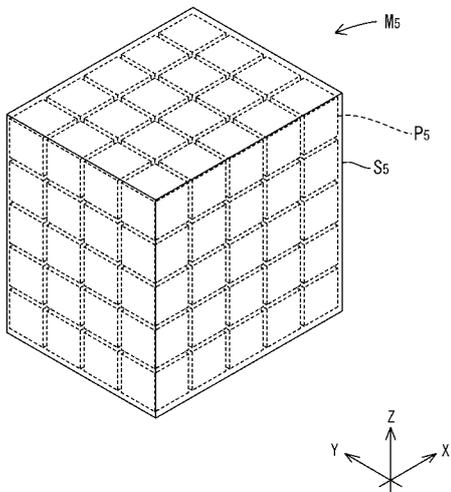


【 図 4 】

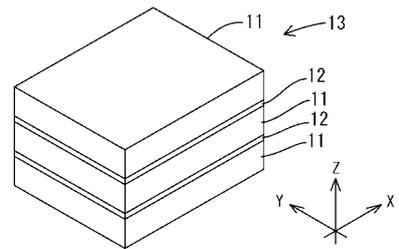


M…メタ材料(誘電体メタ材料,磁性体メタ材料)  
 P…単位構造  
 S…ソフト材料

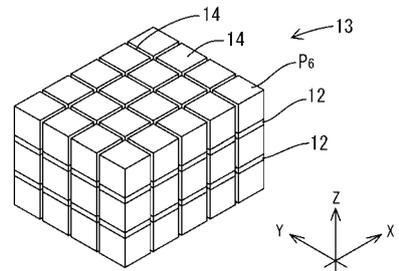
【 図 5 】



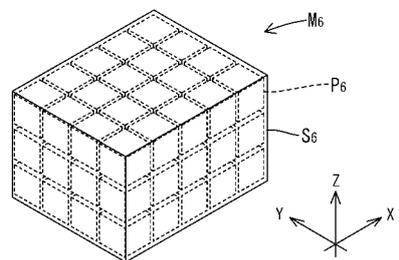
【 図 6 A 】



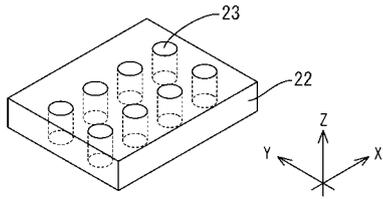
【 図 6 B 】



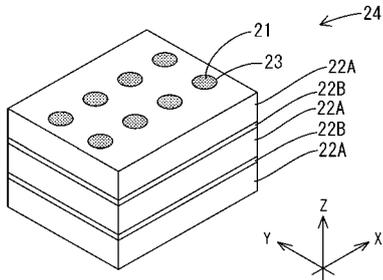
【 図 6 C 】



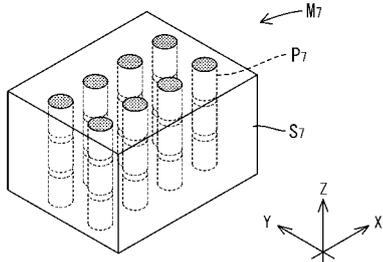
【 図 7 A 】



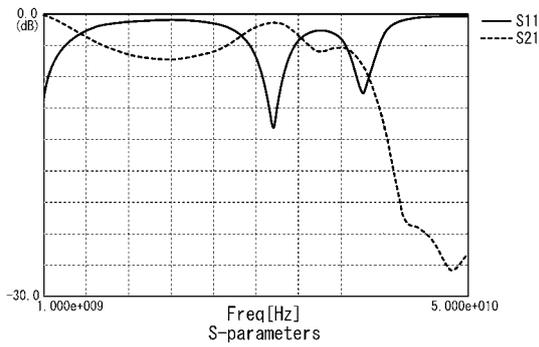
【 図 7 B 】



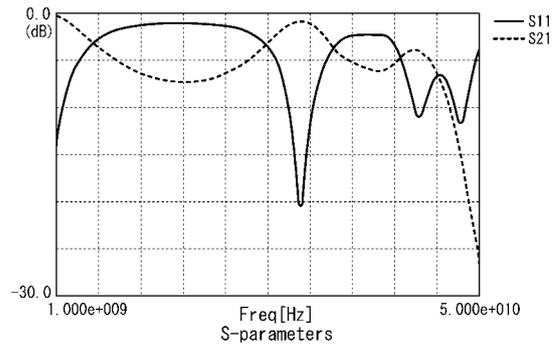
【 図 7 C 】



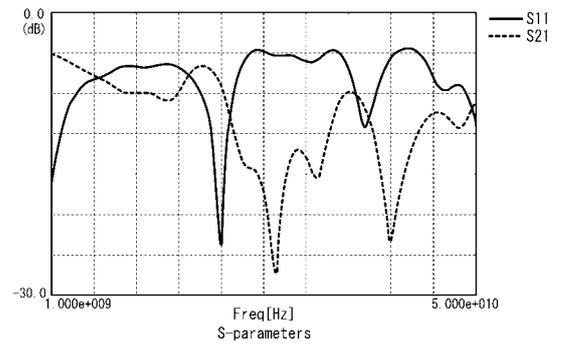
【 図 9 】



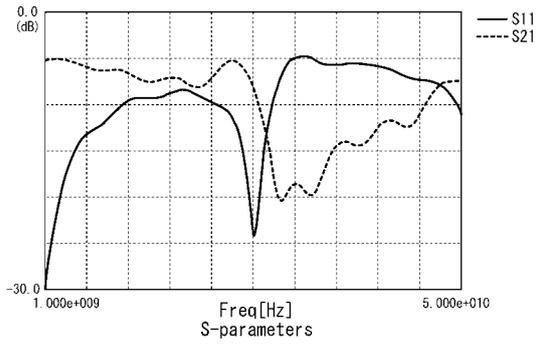
【 図 8 】



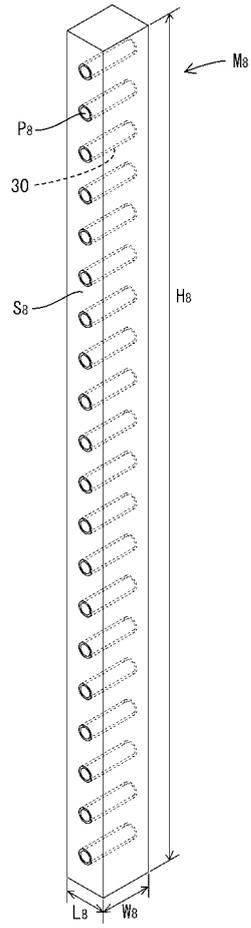
【 図 10 】



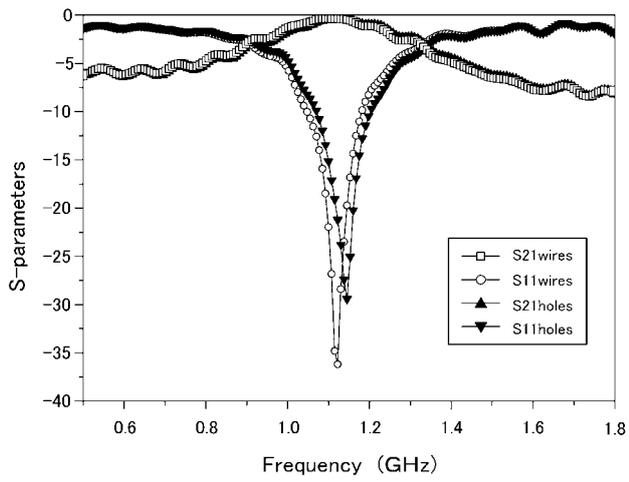
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



## フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
H 0 1 F 1/08 A

(74)代理人 100096840

弁理士 後呂 和男

(74)代理人 100097032

弁理士 高 木 芳之

(72)発明者 大里 齊

名古屋市昭和区御器所町(番地なし) 名古屋工業大学内

(72)発明者 ゾウガネリス ゲオルギオス

名古屋市南区松下町1-11-1 パークシテイ 松下南棟1006号

Fターム(参考) 4G030 AA07 AA09 AA10 AA14 AA16 AA29 AA32 AA37 AA53 AA60  
AA61 AA67 BA01 BA09 CA07 CA08 GA14 GA15 GA16 GA17  
GA19 HA09 HA25 PA22  
5E001 AA00 AE01 AE02 AE03 AJ02  
5E040 AA04 AA07 AA19 CA01  
5G303 AB05 BA11 CA01 CA09 CA11 CB03 CB05 CB08 CB11 CB17  
CB23 CB30 CB32 CB35 CB38