

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2008年10月9日 (09.10.2008)

PCT

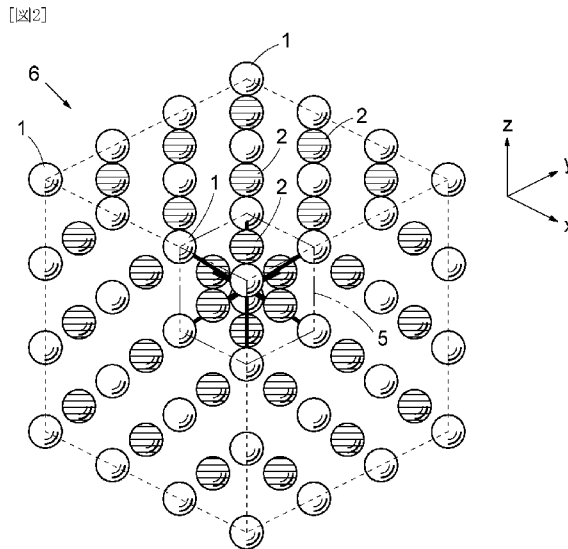
(10) 国際公開番号
WO 2008/120556 A1

- (51) 国際特許分類: *H01P 1/00* (2006.01) *H01Q 15/02* (2006.01)
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 真田 篤志 (SANADA, Atsushi) [JP/JP]; 〒7558611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1 国立大学法人山口大学工学部内 Yamaguchi (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2008/054729
- (22) 国際出願日: 2008年3月14日 (14.03.2008)
- (74) 代理人: 富崎 元成, 外(TOMISAKI, Motonari et al.); 〒1050003 東京都港区西新橋1丁目6番13号 虎ノ門吉荒ビル2階 Tokyo (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ: 特願2007-088679 2007年3月29日 (29.03.2007) JP
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG,
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人山口大学 (YAMAGUCHI UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒7538511 山口県山口市吉田1677-1 Yamaguchi (JP).

[続葉有]

(54) Title: THREE-DIMENSIONAL LEFT-HANDED METAMATERIAL

(54) 発明の名称: 3次元左手系メタマテリアル



(57) Abstract: A three-dimensional left-handed metamaterial of totally new constitution functioning as a three-dimensional electromagnetic wave propagation medium in which the equivalent permittivity and permeability of the medium have negative values simultaneously. The three-dimensional left-handed metamaterial of such a structure as cubic unit lattices (5) are arranged repeatedly in three orthogonal directions of a three-dimensional space has first particulate bodies (1) of conductor arranged around each vertex of the unit lattice, second particulate bodies (2) of conductor arranged around the center of each face of the unit lattice, first coupling portions of conductor for coupling the first particulate bodies (1) and the central point of the unit lattice, and second coupling portions of conductor for coupling the second particulate bodies (2) and the central point of the unit lattice.

(57) 要約: 3次元の電磁波伝播媒質として機能し、媒質の等価的な誘電率と透磁率の両者が同時に負の値となる、全く新たな構成による3次元左手系メタマテリアルを提供する。立方体の単位格子5を3次元空間の互いに直交する3方向に繰り返し配置した構造の3次

[続葉有]

WO 2008/120556 A1



SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE,
SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG,

添付公開書類:
— 国際調査報告書

元左手系メタマテリアルであって、導体からなり、前記単位格子の各頂点を中心とする位置に配置された第1粒子体1と、導体からなり、前記単位格子の各面の中心である面心点を中心とする位置に配置された第2粒子体2と、導体からなり、前記第1粒子体と前記単位格子の中心点とを連結する第1連結部と、導体からなり、前記第2粒子体と前記中心点とを連結する第2連結部とを有する。

明 細 書

3次元左手系メタマテリアル

技術分野

[0001] 本発明は電磁波を伝播させるための人工的な媒質(メタマテリアル)に関し、詳しくは、3次元の電磁波伝播媒質として機能し、媒質の等価的な誘電率と透磁率の両者が負となる3次元左手系メタマテリアルに関するものである。

背景技術

[0002] 金属、誘電体、磁性体、超伝導体などの小片(単位構造体)を、波長に対して十分短い間隔(波長の10分の1程度以下)で並べることで自然にはない性質を持った媒質を人工的に構成することができる。この媒質を自然にある媒質のカテゴリに比べてより大きいカテゴリに属する媒質と言う意味でメタマテリアル(metamaterials)と呼んでいる。メタマテリアルの性質は、単位構造体の形状、材質およびそれらの配置により様々に変化する。

[0003] 中でも、等価的な誘電率 ϵ と透磁率 μ とが同時に負となるメタマテリアルは、その電界と磁界と波数ベクトルが左手系をなすことから「左手系媒質(LHM:Left-Handed Materials)」と名付けられた。この左手系媒質を本明細書においては左手系メタマテリアルと呼ぶ。これに対して、等価的な誘電率 ϵ と透磁率 μ とが同時に正となる通常の媒質は「右手系媒質(RHM:Right-Handed Materials)」と呼ばれる。これら誘電率 ϵ 、透磁率 μ と媒質との関係領域は、図1に示すように、誘電率 ϵ の正負および透磁率 μ の正負に応じた第1象限～第4象限の媒質に分類できる。右手系媒質は第1象限の媒質であり、左手系媒質は第3象限の媒質である。

[0004] 特に、左手系メタマテリアルは、波の群速度(エネルギーの伝播する速度)と位相速度(位相の進む速度)の符号が逆転している波(バックワード波と呼ばれる)の存在や、また、非伝播領域で指数関数的に減衰する波であるエバネセント波の増幅、等の特異な性質を持つものである。そして、左手系メタマテリアルによるバックワード波を伝送する線路を人工的に構成することができる。このことは、下記の非特許文献1、非特許文献2にも記載されているように公知である。

[0005] この左手系媒質構成の概念に基づき、金属パターンからなる単位セルを周期的に並べてバックワード波を伝播させる線路が提案されている。これまで、その伝送特性が理論的に取り扱われ、この線路が左手系伝送帯域を持つこと、左手系伝送帯域と右手系伝送帯域との間にバンドギャップが生じること、そのバンドギャップ幅は単位セル中のリアクタンスによりコントロールすることができること等が理論的に明らかになっている。これらに関しては、下記の非特許文献3に記載されている。

非特許文献1: D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", Phys. Rev. Lett., vol.84, no.18, pp.4184-4187, May 2000

非特許文献2: C. Caloz, and T. Itoh, "Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH line", IEEE-APS Intl Symp. Digest, vol.2, pp.412-415, June 2002

非特許文献3: Atsushi Sanada, Christophe Caloz and Tatsuo Itoh, "Characteristics of the Composite Right/Left-Handed Transmission Lines", IEEE Microwave and Wireless Component Letters, Vol.14, No.2, pp.68-70, February 2004

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0006] 左手系メタマテリアルは、その構成上から共振型と非共振型に大別できる。最初に作成された左手系メタマテリアルはワイヤ共振器とスプリットリング共振器とを組み合わせた共振型のものである。この左手系メタマテリアルはワイヤ共振器とスプリットリング共振器とをx, y, z軸の直交3軸方向に配列することで3次元化が可能である。この左手系メタマテリアルは、ワイヤ共振器(人工誘電体)の実効的な誘電率およびスプリットリング共振器(人工磁性体)の実効的な透磁率が、共振周波数の近傍でともに負になる領域を使用するものである。このため、左手系媒質として機能する周波数帯域幅が狭いという欠点がある。さらに、共振周波数の近傍周波数を使用するため損失が大きくなるという欠点がある。

[0007] これに対して、非共振型の左手系メタマテリアルは、通常の媒質における伝送線路の分布定数インダクタンス(L)、分布定数キャパシタンス(C)を逆に配置した伝送線

路の特性に基づいている。このような分布定数LCを逆転させた伝送線路においては、前述のバックワード波が伝送され、左手系メタマテリアルとしての性質を持つのである。非共振型の左手系メタマテリアルは、共振型と比較すると、左手系媒質として機能する周波数帯域幅が広く、損失が小さくなるという特徴がある。

[0008] 非共振型の左手系メタマテリアルとしては、集中定数LC素子(チップインダクタ、チップコンデンサ等)を使用した伝送回路や、伝送路に周期的な構造を配置した分布定数型の媒質があった。しかし、集中定数LC素子を使用したものは動作周波数に上限(素子の自己共振周波数以下でのみ動作可能)があるという問題点があり、数GHz以上で動作する左手系メタマテリアルは実現困難であった。また、集中定数LC素子を多数使用するため製作が困難であり、製造コストも高くなる。

[0009] いずれにしても、非共振型の左手系メタマテリアルは、1次元または2次元の電磁波伝播媒質として機能するものに限られていた。これらの1次元または2次元の非共振型左手系メタマテリアルは接地導体を必要とするため、これらと同様の発想からなる3次元非共振型左手系メタマテリアルは構成が複雑になりこれまで実現されていない。

[0010] そこで、本発明は、簡単な構成で3次元の電磁波伝播媒質として機能し、媒質の等価的な誘電率と透磁率の両者が同時に負の値となる、全く新たな構成による3次元左手系メタマテリアルを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0011] 上記目的を達成するために、本発明の3次元左手系メタマテリアルは、立方体の単位格子を3次元空間の互いに直交する3方向に繰り返し配置した構造の3次元左手系メタマテリアルであって、導体からなり、前記単位格子の各頂点を中心とする位置に配置された第1粒子体と、導体からなり、前記単位格子の各面の中心である面心点を中心とする位置に配置された第2粒子体と、導体からなり、前記第1粒子体と前記単位格子の中心点とを連結する第1連結部と、導体からなり、前記第2粒子体と前記中心点とを連結する第2連結部とを有するものである。

[0012] また、上記の3次元左手系メタマテリアルにおいて、前記第1粒子体および前記第2粒子体は球体であることが好ましい。

[0013] また、上記の3次元左手系メタマテリアルにおいて、前記第1粒子体および前記第2

粒子体の球の半径は、前記単位格子の1辺の寸法の0.20~0.30倍であることが好ましい。

[0014] また、上記の3次元左手系メタマテリアルにおいて、前記単位格子の1辺の寸法は、伝搬させる電磁波の真空中の波長に対して0.5倍以下であることが好ましい。

[0015] また、上記の3次元左手系メタマテリアルを、負の屈折率を有する媒質のレンズとして形成し、回折限界を超えた分解能を実現することのできるレンズとして機能させることができる。

発明の効果

[0016] 本発明は、以上のように構成されているので、以下のような効果を奏する。

[0017] 本発明によれば、3次元の電磁波伝播媒質として機能し、媒質の等価的な誘電率と透磁率の両者が同時に負の値となる3次元左手系メタマテリアルを実現することができる。その3次元左手系メタマテリアルを利用してスーパーレンズやスーパーレンズを使用したレンズアンテナや、分散特性を利用したカップラや共振器などの種々の応用機器・デバイスを実現することができる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1]誘電率 ϵ 、透磁率 μ の正負領域と媒質との関係を示す図である。

[図2]本発明のメタマテリアル6の構成を示す斜視図である。

[図3]第1粒子体1および第2粒子体2の配置を模式的に示す図である。

[図4]メタマテリアル6を上方から見た拡大平面図である。

[図5]メタマテリアル6を上方から見た拡大平面図であり、単位格子5の上面にある第1粒子体1および第2粒子体2のみを表示したものである。

[図6]メタマテリアル6の分散特性を示すグラフである。

符号の説明

- [0019]
- 1 第1粒子体
 - 2 第2粒子体
 - 3 第1連結部
 - 4 第2連結部
 - 5 単位格子

6 メタマテリアル

50 中心点

51 頂点

52 面心点

発明を実施するための最良の形態

[0020] 本発明の実施の形態について図面を参照して説明する。図2は、本発明のメタマテリアル6の構成を示す斜視図である。図2では、メタマテリアル6の全体構成を示すために、細部および内部の構成は正確に表示されていない。メタマテリアル6は、立方体形状の単位格子5を3次元空間の互いに直交する3方向(xyz軸方向)に繰り返し密着配置した構造となっている。

[0021] 単位格子5は立方体形状であり、8個の頂点51と6個の面を有する。各面の中心点を面心点52とする。単位格子5の立方体の中心を中心点50とする。これらの各点に関しては図4、図5も参照されたい。単位格子5の8個の頂点51の位置にはそれらの頂点51を中心とする第1粒子体1がそれぞれ配置されている。また、単位格子5の6個の面心点52の位置にはそれらの面心点52を中心とする第2粒子体2がそれぞれ配置されている。これらの第1粒子体1および第2粒子体2は、第1連結部3および第2連結部4によって中心点50に連結されている。第1粒子体1および第2粒子体2、第1連結部3および第2連結部4は、それぞれ導体(典型的には金属)からなるものである。

[0022] なお、一般的に、物質は導体、半導体、絶縁体に分類され、抵抗率の大きさがそれらの指標とされたりするが、必ずしもそれらの境界線としての抵抗率の値が明確に決められているわけではない。また、本発明における導体とは、このような物質分類上の導体だけに限定されず、その他の電気伝導性を有する物質も含むものである。つまり、本発明における導体は、その周囲の絶縁性の媒質に比較して導電率の大きな(抵抗率の小さな)物質であればよい。例えば、一般的には半導体に分類されるような物質であっても、本発明における導体として機能する場合もある。しかし、通常の場合、導体としては、銀、銅、金、アルミニウムなどの導電率の大きな金属が望ましい。

[0023] なお、図2では、メタマテリアル6表面での第1粒子体1および第2粒子体2の配置を

明示するために、メタマテリアル6内部の第1粒子体1および第2粒子体2と第1連結部3および第2連結部4の表示を省略している。ただし、図示した1つの単位格子5に関しては、メタマテリアル6内部の第1粒子体1および第2粒子体2と第1連結部3および第2連結部4も表示している。

[0024] なお、図2では、第1粒子体1は白色の球体で示され、第2粒子体2はハッチングを付した球体で示されている。符号を付していないものも白色の球体は第1粒子体1であり、ハッチングを付した球体は第2粒子体2である。また、図2では、 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 個の単位格子5を配列した状態が表示されているが、実際のメタマテリアルではさらに多数の単位格子5が配列される。

[0025] 図3は、単位格子5における第1粒子体1および第2粒子体2の配置を模式的に示す図である。なお、図3では、第1粒子体1および第2粒子体2の配置と接続状態を明示するために、第1粒子体1および第2粒子体2の大きさを実際よりも小さく表示している。また、この図でも第1粒子体1が白色の球体で示され、第2粒子体2はハッチングを付した球体で示されている。

[0026] 図示のように、第1粒子体1は単位格子5の各頂点51を中心とするように配置されており、第2粒子体2は単位格子5の各面心点52を中心とするように配置されている。これらの第1粒子体1および第2粒子体2は、結晶構造で言うところの面心立方格子構造と同じ配置となっている。

[0027] また、それぞれの第1粒子体1(8個)は第1連結部3によって単位格子5の中心点50に連結されており、それぞれの第2粒子体2(6個)は第2連結部4によって単位格子5の中心点50に連結されている。ここで、第1連結部3および第2連結部4は導体からなる棒状の構造体である。図3では、両者の区別を明瞭にするために、第1連結部3を黒色で表示し、第2連結部4をハッチングを付した表示としている。実際には、両者は同一の材料(導体)からなるものでよい。

[0028] 第1粒子体1および第2粒子体2の全ては、第1連結部3および第2連結部4によって単位格子5の中心点50と連結されるので、電氣的にも中心点50と接続されることになる。また、単位格子5はxyz軸方向に繰り返し密着配置されているので、各頂点51においては8個の単位格子5が互いに接することになる。したがって、第1粒子体1

は周囲の8個の単位格子5のそれぞれの中心点50に連結されている。また、各面心点52においては2個の単位格子5が互いに接することになり、第2粒子体2は隣接する2個の単位格子5のそれぞれの中心点50に連結されている。

[0029] これらの連結により、メタマテリアル6における全ての第1粒子体1および第2粒子体2は互いに電氣的に接続されている。すなわち、メタマテリアル6は全体が1つの導体からなるものである。このため、導体同士を絶縁するための構成が必須ではなくなり、構造を簡素化することができる。また、メタマテリアル6の構造が面心立方格子構造であるため、機械的強度も大きい。

[0030] 図4は、メタマテリアル6を上方(z軸+側)から見た拡大平面図である。1つの単位格子5を中心に拡大表示している。単位格子5を二点鎖線で表示しており、単位格子5の頂点51、面心点52、中心点50も表示している。単位格子5は立方体である。また、ここでは単位格子5内部の構成を明示するために、単位格子5の上面の面心点にある第2粒子体2は表示を省略している。第1粒子体1は第1連結部3によって単位格子5の中心点50に連結されており、第2粒子体2は第2連結部4によって単位格子5の中心点50に連結されている。

[0031] 図5も、メタマテリアル6を上方(z軸+側)から見た拡大平面図であり、単位格子5の上面にある第1粒子体1および第2粒子体2のみを表示したものである。上面の各頂点51にはそれぞれ第1粒子体1が配置されており、面心点52には第2粒子体2が配置されている。図5の第1粒子体1および第2粒子体2の配置は、上面だけでなく単位格子5の6個の面の全てにおいて当てはまる。

[0032] なお、第1連結部3および第2連結部4は、ここでは断面形状が正方形の四角柱としているが、円柱や多角柱などの他の形状でもよい。また、第1粒子体1および第2粒子体2の形状も、ここでは球形としているが、立方体や他の多面体形状としてもよく、平面や曲面によって囲まれた任意形状の粒子体とすることができる。

[0033] 単位格子5の1辺の長さを寸法Pとすると、寸法Pは単位格子5の配列ピッチでもある。第1粒子体1および第2粒子体2の球の半径を寸法rとすると、寸法rは $0.25P$ としている。すなわち、第1粒子体1および第2粒子体2の球の直径($2r$)は $0.5P$ である。また、第1連結部3の断面の正方形の1辺の寸法は $0.1P$ とし、第2連結部4の断面の

正方形の1辺の寸法は0.122Pとしている。なお、ここでは第1連結部3の断面寸法と第2連結部4の断面寸法とを異なるようにしているが、両者の断面寸法は同じであってもよい。

[0034] 図5に示すように、単位格子5の1つの面に配置された第1粒子体1および第2粒子体2はその面上では接触しないように構成されている。したがって、第1粒子体1および第2粒子体2の半径 r は、 $r < \sqrt{2} \cdot P / 4 = 0.3536P$ の条件を満足する必要がある。ただし、この条件式では2の平方根を $\sqrt{2}$ と表記している。実際には、寸法 r は0.2P～0.3Pの範囲が好ましい。

[0035] 以上のようなメタマテリアル6は、隣接する第1粒子体1および第2粒子体2の間にキャパシタンスを持ち、かつ、第1連結部3および第2連結部4によるインダクタンスを持つ。このようなキャパシタンスとインダクタンスにより、どのようにしてメタマテリアル6の左手系特性が生じるのかの明確な説明はまだできていない。しかし、後述の電磁界シミュレーション結果に示すように、このメタマテリアル6は特定の周波数領域で左手系媒質の特性を示す。

[0036] このようなメタマテリアル6の各部の寸法の実例を示すと、単位格子5の1辺の寸法P:10.0mm、第1粒子体1および第2粒子体2の球の半径 r :2.5mm、第1連結部3の断面の正方形の1辺の寸法:1.0mm、第2連結部4の断面の正方形の1辺の寸法:1.22mmとする。このような寸法・配置のメタマテリアル6は、後述のように14.54～14.71GHz付近で左手系媒質の特性を示す。なお、この寸法例は一例であり、他の任意の寸法とすることができる。メタマテリアルの寸法・配置を変更すれば、左手系媒質の特性を示す周波数も変化する。

[0037] 図6に、上記の寸法・配置によるメタマテリアル6の分散特性を示す。これは図3～図5に示すような単位格子5において x 、 y 、 z 軸方向に周期境界条件を与えて計算した有限要素法による電磁界シミュレーション結果である。ここでは、導体は完全導体とみなし、抵抗率を0として計算している。黒点が最も低次の伝播モードを表し、白抜きの点はその次に周波数の低い第2次モードを表している。

[0038] x 軸方向の波数を k_x 、 y 軸方向の波数を k_y 、 z 軸方向の波数を k_z とすると、伝搬定数 β は、 $\beta = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2}$ である。図6の横軸の Γ 、X、MおよびRはそれぞれ波

数 (k_x, k_y, k_z) 空間上の高対称点すなわち点 $\Gamma(0, 0, 0)$ 、点 $X(\pi/P, 0, 0)$ 、点 $M(\pi/P, \pi/P, 0)$ 、点 $R(\pi/P, \pi/P, \pi/P)$ である。ただし、 π は円周率、 P は単位格子5の配列ピッチである。

[0039] $\Gamma-X$ 区間は β を $k_x=0 \rightarrow \pi/P$ かつ $k_y=k_z=0$ なる関係で変化させた区間を、 $X-M$ 区間は β を $k_x=\pi/P, k_y=0 \rightarrow \pi/P, k_z=0$ なる関係で変化させた区間を示す。また、 $M-R$ 区間は β を $k_x=k_y=\pi/P, k_z=0 \rightarrow \pi/P$ なる関係で変化させた区間を、および $R-\Gamma$ 区間は β を $k_x=k_y=k_z, k_x=\pi/P \rightarrow 0$ なる関係で変化させた区間をそれぞれ示す。

[0040] また図6の縦軸は周波数 f である。この分散曲線の $\Gamma-X$ 区間および $R-\Gamma$ 区間中の任意の点において、点 Γ から引いた直線の傾きに 2π を乗じたもの $2\pi f/\beta (= \omega/\beta; \omega$ は角周波数)は位相速度(v_p)を示し、またこの点における接線の傾きに 2π を乗じたもの $2\pi \partial f/\partial \beta (= \partial \omega/\partial \beta)$ は群速度(v_g)を示す。

[0041] 黒点の最低次モードに着目すると、本分散曲線の $\Gamma-X$ 区間および $R-\Gamma$ 区間において、 β の絶対値が増加するに従って周波数が低くなる領域がある。このような領域では群速度と位相速度との符号が異なるバックワード波が伝播することが分かる。これは、この領域でメタマテリアル6が左手系媒質の特性となっていることを示すものである。すなわち、メタマテリアル6は14.54~14.71GHz付近で左手系媒質の特性を示す。

[0042] 以上のメタマテリアル6において、前述のように、第1連結部3および第2連結部4の形状は、四角柱だけでなく円柱や多角柱などの他の形状でもよい。また、第1連結部3および第2連結部4の太さ(断面寸法)は小さくするほど左手系媒質として動作する周波数が低下し、メタマテリアル6がより均質媒質として機能することが分かっている。

[0043] なお、メタマテリアル6の単位格子5の寸法と、左手系媒質として伝搬する電磁波の真空中における波長とは比例する。つまり、単位格子5の各部の寸法を2倍とすれば、左手系媒質として伝搬する電磁波の真空中の波長も2倍となり、伝搬する電磁波の周波数は1/2倍となる。前述のような各部の寸法のメタマテリアル6では、図6に示すように14.54~14.71GHz付近で左手系媒質の特性を示している。左手系媒質として動作する中心周波数は14.625GHzであり、この周波数の電磁波の真空中の

波長 λ は20.5mmとなる。この場合、メタマテリアル6の単位格子5の1辺の寸法Pと、伝搬する電磁波の真空中の波長 λ との比 P/λ の値は約0.488である。

[0044] 前述のように、第1連結部3および第2連結部4の太さを小さくするほど、左手系媒質として動作する周波数が低下する。その場合、単位格子5の寸法Pと電磁波の真空中の波長 λ との比 P/λ の値も低下する。この比 P/λ の値が小さいほどメタマテリアル6がより均質媒質として機能するので、比 P/λ の値は0.5以下であることが望ましい。

[0045] なお、単位格子5は直交3軸(xyz軸)方向に等間隔で周期的に配置されていることが望ましい。しかし、単位格子5の位置および内部構造各部の寸法が厳密に正確な周期性を持っていなくとも、左手系メタマテリアルとしての特性を示し、ある程度の範囲での位置ずれおよび寸法誤差は許容される。

[0046] このようなメタマテリアル6の製造方法としては、3次元光造形技術を使用することが考えられる。これは、粒径が数十 μm の金属粉末を薄い層に敷き詰めて高出力のレーザー光により必要な部分のみを溶融固化する。さらにその上に次の薄い層として金属粉末を敷き詰めて、同様に必要な部分のみを溶融固化するとともに下の層に接合する。このように、任意形状の薄層を順次形成して積み重ねていくことにより、任意の形状の3次元造形物を形成することができる。なお、溶融固化されていない金属粉末は容易に除去できる。

[0047] また、金属粉末の代わりに、溶融性樹脂や光硬化性樹脂を用いても、レーザー光による同様の造形手順により、任意の形状の3次元造形物を形成することができる。そのような樹脂による3次元造形物に、金属メッキ等の表面処理を施して導電性を付与し、メタマテリアル6を製造することもできる。または、第1粒子体、第2粒子体、第1連結部、第2連結部に相当する金属製の部品を作成し、それらを結晶模型のように組み立ててメタマテリアル6を製造することもできる。

[0048] 以上のような、3次元左手系メタマテリアルの応用例としては、媒質が負の屈折率となることを利用したレンズがある。この負屈折率レンズは結像した像の分解能が波源の大きさ以下となり、いわゆるスーパーレンズとして動作する。スーパーレンズとは、分解能が波の回折限界(波長程度)を超えて高くなるレンズである。通常の右手系媒

質によるレンズでは、結像の分解能は波の回折限界によって波源の波長よりも大きくなってしまふ。

[0049] 負屈折率の媒質では単純な平板状の媒質境界でも集光機能がある。そのため、負屈折率レンズは、正屈折率の通常のレンズのように必ずしも凹凸曲面形状とする必要はない。しかし、凹曲面形状として、光軸方向の厚さを変化させてもよい。なお、メタ材料の単位格子の各部の寸法を変化させることで屈折率を変化させることができる。

[0050] 本発明のメタ材料6は面心立方格子構造であるが、単位格子の各部の寸法を調整することにより、異方性をほぼなくすことができる。異方性をなくすことにより、屈折率の値が電磁波の方向に依存しないようにすることができ、レンズの結像精度を向上させることができる。

[0051] 3次元左手系メタ材料の応用例としては、さらに、上記のスーパーレンズによる短波長領域での電磁波イメージングや高分解能フォトソグラフィ、負屈折率を利用したビーム走査アンテナ、分散特性を利用したカップラや共振器など種々のデバイスが考えられる。

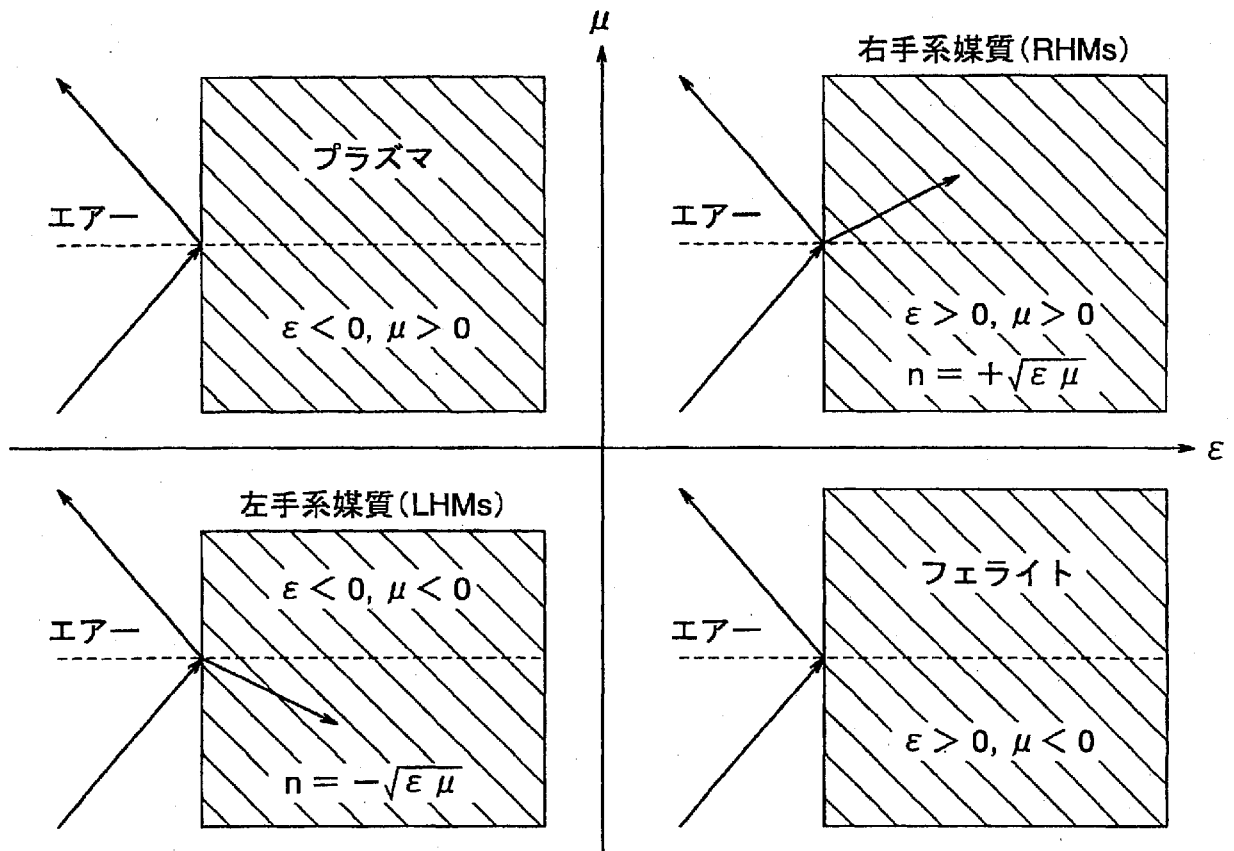
産業上の利用可能性

[0052] 本発明によれば、3次元の電磁波伝播媒質として機能し、媒質の等価的な誘電率と透磁率の両者が同時に負の値となる3次元左手系メタ材料を実現することができる。また、その3次元左手系メタ材料を利用してスーパーレンズや、そのスーパーレンズによる電磁波イメージングや高分解能フォトソグラフィ、分散特性を利用したカップラや共振器などの種々の応用機器・デバイスを実現することができる。

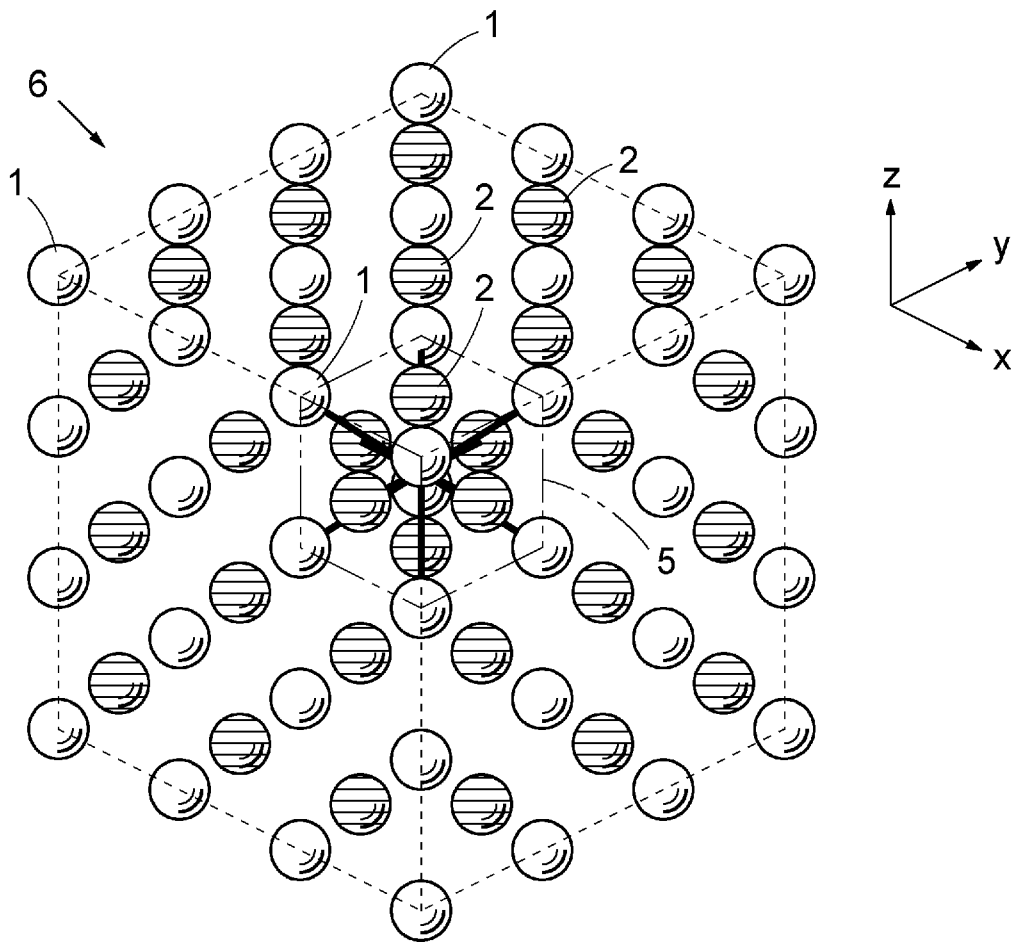
請求の範囲

- [1] 立方体の単位格子(5)を3次元空間の互いに直交する3方向に繰り返し配置した構造の3次元左手系メタマテリアルであって、
導体からなり、前記単位格子(5)の各頂点(51)を中心とする位置に配置された第1粒子体(1)と、
導体からなり、前記単位格子(5)の各面の中心である面心点(52)を中心とする位置に配置された第2粒子体(2)と、
導体からなり、前記第1粒子体(1)と前記単位格子(5)の中心点(50)とを連結する第1連結部(3)と、
導体からなり、前記第2粒子体(2)と前記中心点(50)とを連結する第2連結部(4)とを有する3次元左手系メタマテリアル。
- [2] 請求項1に記載した3次元左手系メタマテリアルであって、
前記第1粒子体(1)および前記第2粒子体(2)は球体である3次元左手系メタマテリアル。
- [3] 請求項2に記載した3次元左手系メタマテリアルであって、
前記第1粒子体(1)および前記第2粒子体(2)の球の半径は、前記単位格子(5)の1辺の寸法の0.20~0.30倍である3次元左手系メタマテリアル。
- [4] 請求項3に記載した3次元左手系メタマテリアルであって、
前記単位格子(5)の1辺の寸法は、伝搬させる電磁波の真空中の波長に対して0.5倍以下である3次元左手系メタマテリアル。
- [5] 請求項1~4のいずれか1項に記載した3次元左手系メタマテリアルであって、
負の屈折率を有する媒質のレンズとして形成し、回折限界を超えた分解能を実現することのできるレンズとして機能させるようにした3次元左手系メタマテリアル。

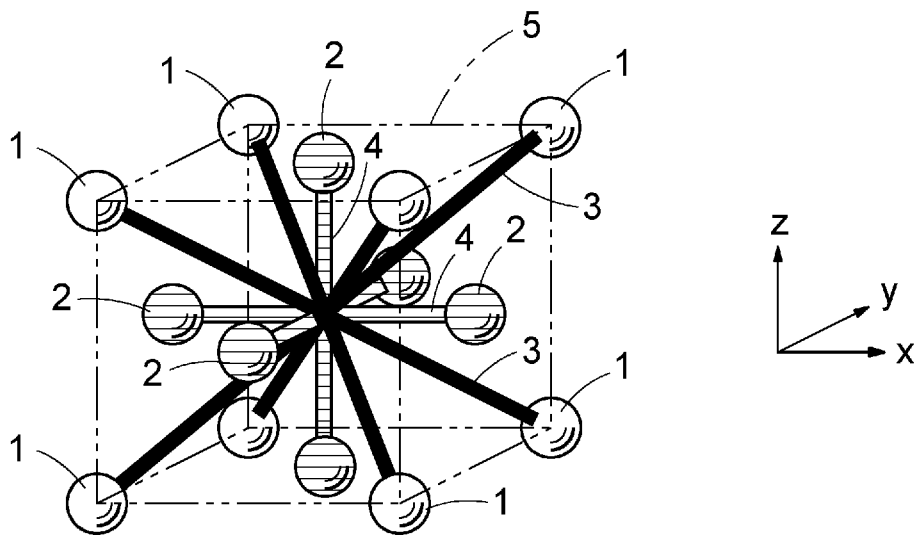
[図1]



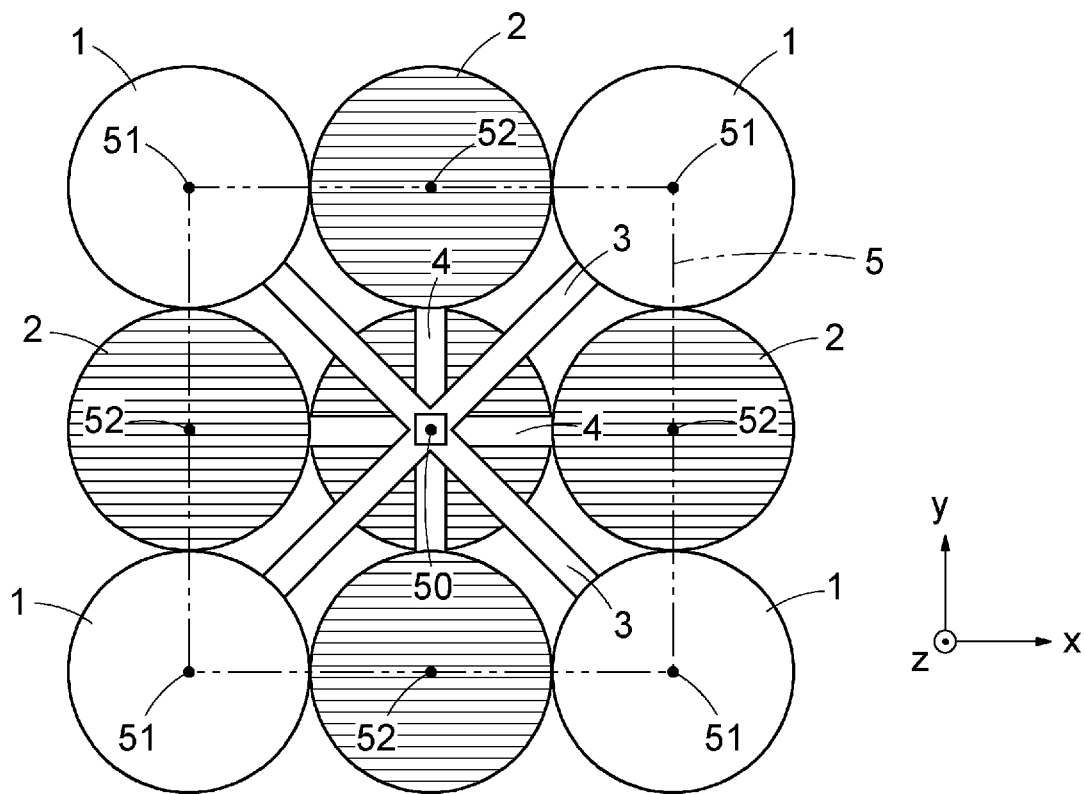
[図2]



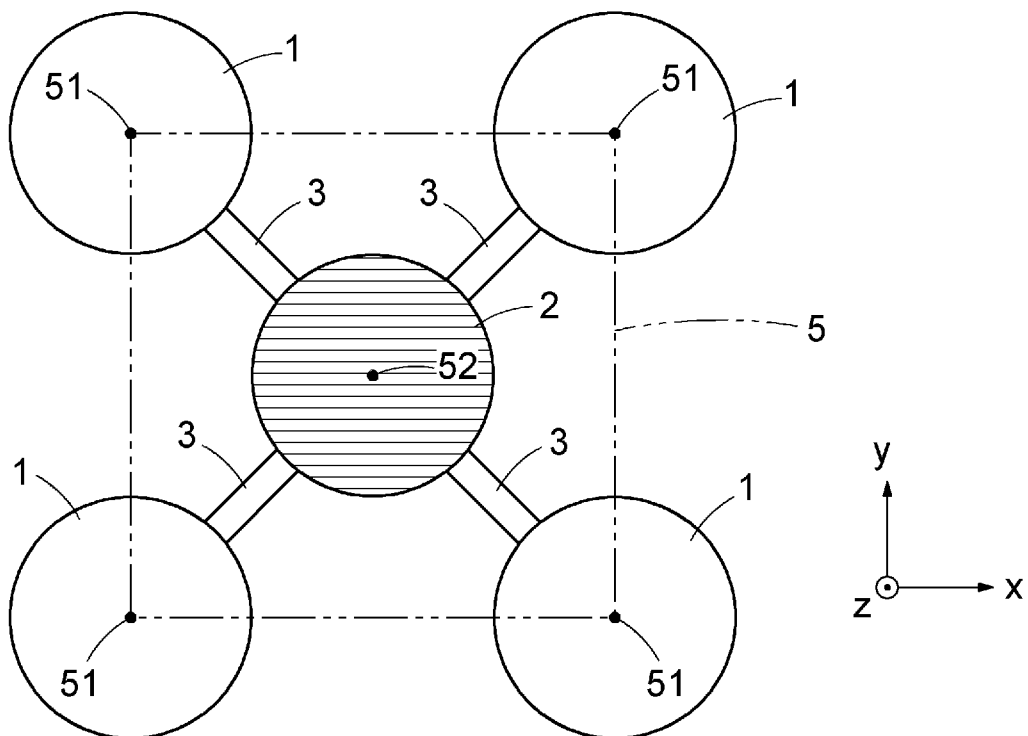
[図3]



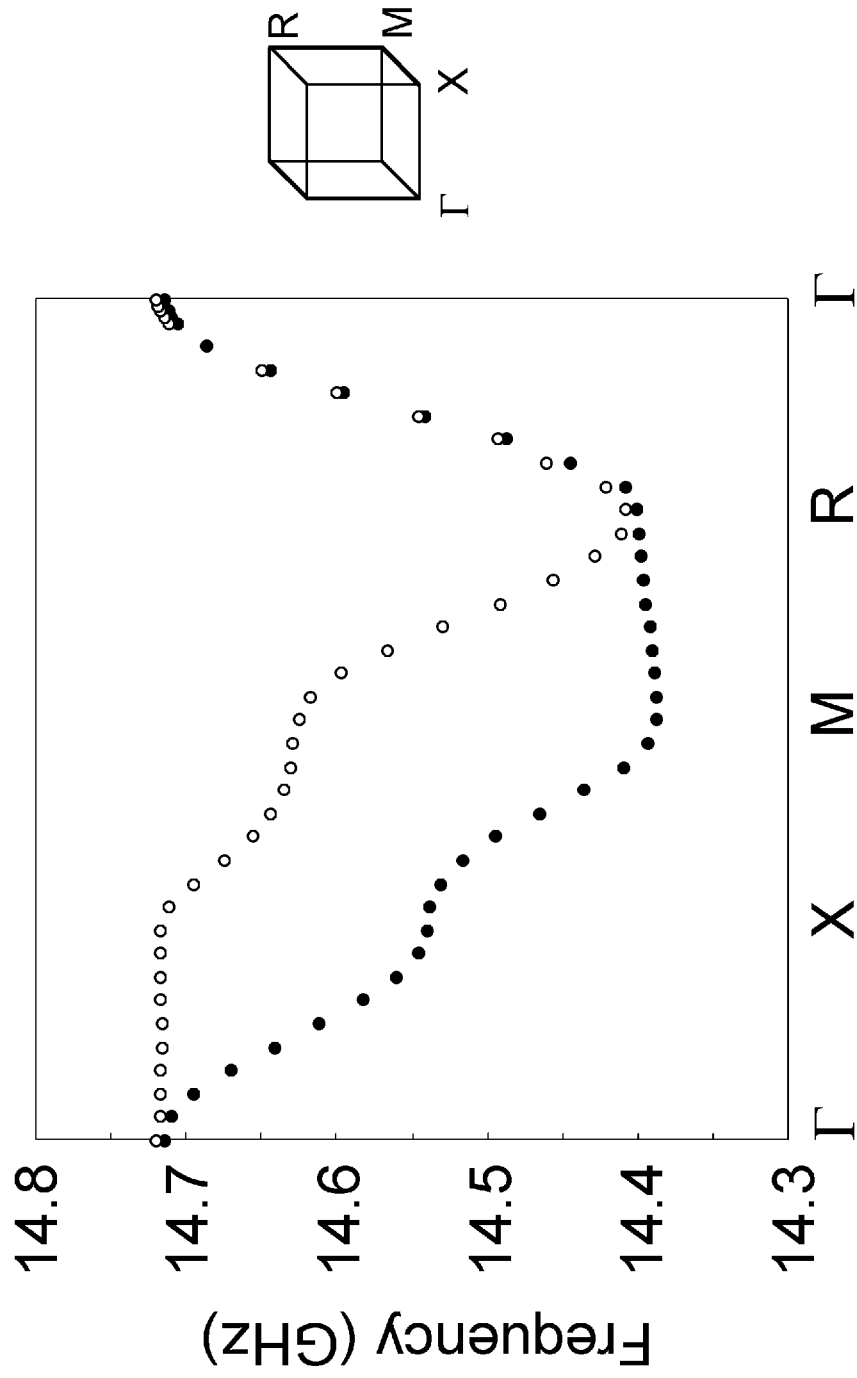
[図4]



[図5]



[図6]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. PCT/JP2008/054729
--

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01P1/00(2006.01) i, H01Q15/02(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H01P1/00-11/00, H01Q15/02, G02B1/00-27/64

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2008</i>
<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2008</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2008</i>

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
WPI, IEEE, JSTPlus(JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<i>V.Yannopapas, "Negative index of refraction in artificial chiral materials", Journal of Physics, 2006.07.26, Vol.18, No.29, pp.6883-6890</i>	1-5
A	<i>M.S.Silveirinha, et.al., "Homogenization of 3-D-Connected and Nonconnected Wire Metamaterials", IEEE Trans.Microwave Theory and Techniques, 2005.04, Vol.53, No.4, pp.1418-1430</i>	1-5
A	<i>US 2006/0028385 A1 (Mark R Davis, et.al.), 09 February, 2006 (09.02.06), Fig. 2-4B; Par. Nos. [0020] to [0022] (Family: none)</i>	5

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 07 April, 2008 (07.04.08)	Date of mailing of the international search report 15 April, 2008 (15.04.08)
--	---

Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H01P1/00(2006.01)i, H01Q15/02(2006.01)i		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H01P1/00-11/00, H01Q15/02 G02B1/00-27/64		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2008年 日本国実用新案登録公報 1996-2008年 日本国登録実用新案公報 1994-2008年		
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) WPI, IEEE, JSTPlus(JDreamII)		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	V. Yannopoulos, "Negative index of refraction in artificial chiral materials", Journal of Physics, 2006.07.26, Vol.18, No.29, pp.6883-6890	1-5
A	M. S. Silveirinha, et. al., "Homogenization of 3-D-Connected and Nonconnected Wire Metamaterials", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2005.04, Vol.53, No.4, pp.1418-1430	1-5
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 07.04.2008	国際調査報告の発送日 15.04.2008	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 岸田 伸太郎 電話番号 03-3581-1101 内線 3568	5 T 9183

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	US 2006/0028385 A1 (Mark R Davis, et. al.) 2006. 02. 09, FIG. 2-4B, [0020]-[0022] (ファミリーなし)	5