

## 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25年 4月22日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560336

研究課題名（和文） メタ・マテリアルを利用した導波管に関する研究

研究課題名（英文） Metallic Waveguides with Metamaterials

研究代表者

小久保 吉裕 (KOKUBO YOSHIHIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80264836

研究成果の概要(和文):金属導波管の中の誘電体棒の列は電磁波の伝搬方向と群速度を変える。我々は、 $TE_{10}$ - $TE_{20}$  モード変換器に焦点を当て、周波数とともに変化する特性を調べた。本研究では、 $2f_c$  より低い周波数ではそのまま通過、 $2f_c$  より高い周波数では  $TE_{10}$  モードを  $TE_{40}$  モードに変化させるモード変換器を提案した。また、 $2f_c$  より低い周波数ではそのまま通過、 $3f_c$  より高い周波数では  $TE_{30}$  モードを  $TE_{10}$  モードに変化させるモード変換器も提案した。

磁性体は通常、特殊なデバイスに用いられるので、磁性体の特性を計算するソフトウェアは使用範囲が限られていた。近年、人工の誘電率や透磁率を並べた誘電・磁性材料が発明された。従って、計算ソフトの要望も増えてくると思われる。ここでは .NET Framework 上で動作する、誘電体と磁性体の材料の特性を計算する、学生の論理的思考を助けるような、教育用ソフトを作成した。

ショート・ワイヤー・ペアは、とてもシンプルなメタ・マテリアルである。この構造は、誘電体基板の両側に金属の細い線を造りつけたもので、共振周波数はこの長さを変えることで調節できる。しかしながら、磁氣的共振周波数を変えるために長さを変えるには、別のパターンのフォトマスクが必要になる。本研究では、1つのパターンのフォトマスクのみが必要で、金属の細い線の位置を変えることで磁氣的共振周波数を変える方法を紹介する。

研究成果の概要（英文）: Dielectric rod arrays in a metallic waveguide alter the propagation modes and group velocities of electromagnetic waves. We focus on  $TE_{10}$ -to- $TE_{20}$  mode converters and investigate the variation in their behavior with frequency. In this investigation, a mode converter is proposed that passes the  $TE_{10}$  mode at frequencies lower than  $2f_c$ , and converts the  $TE_{10}$  mode into the  $TE_{40}$  mode for frequencies higher than  $2f_c$ , which is achieved by a combination of  $TE_{10}$ - $TE_{20}$  mode converters. A mode converter is also proposed that passes the  $TE_{10}$  mode at frequencies lower than  $2f_c$ , and converts the  $TE_{30}$  mode into the  $TE_{10}$  mode for frequencies higher than  $3f_c$ .

As magnetic materials are usually used for special elements, there is only limited use of software for calculating the characteristics of the magnetic materials. In recent years, an electromagnetic metamaterial which is an artificial crystal is investigated for a range of magnetic and dielectric constants. It may increase supply and demand of calculation software. In this study, we developed educational software working on .NET Framework for calculating reflection, transmission and absorption rates for dielectric and magnetic materials and help our students to understand the results in a logical way.

Short wire pairs are simple metamaterial structures. This structure includes a dielectric substrate with metal strips on both sides, of which the electric and magnetic resonant frequencies can be controlled by adjusting the length of the metallic wires. However, to vary the magnetic resonant frequency requires a change in the length of the strip and another patterned photomask. In this investigation, a simple method is introduced that requires only one patterned photomask by shifting the position of faced wire pairs up and down.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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・ミリ波帯におけるフォトニック結晶(PC)は、従来、主にアンテナの放射パターン改善や高調波の抑制、あるいは導波路としての報告が多かったように思われる。導波路に関する今までの研究では、導波路を金属円柱のPCで構成すると、金属材料が節約できるが、伝搬損失が導波管とほぼ同等か悪くなるため、使い勝手の良いフレキシブル導波管に取って代わることはなかった。また、導波路を誘電体PCで構成すると従来のNRDガイドより伝搬損失が少なくなるなどの報告があるが、これら導波路の研究は一段落した感がある。

我々は、マイクロ波・ミリ波帯におけるPCに関する研究を行ってきたが、メタ・マテリアル(MM)を用いることで、PCとしての特性が改善できるのではないかと考えた。MMは金属で、通常物質ではありえない透磁率が実現できることから、主にマイクロ波帯で研究が進んでいる。PCもMMも従来と違って負の屈折率など「奇妙な」特性を示すが、PCが波長と同程度の周期を持つのに対し、MMはセルの周期がその使用される波長に比べて非常に短く、普通は一様な物質とみなして使用されると言われている。しかし実際の報告を見ると、共振型MMの場合多くが波長と同程度の寸法であり、これはスケール側のため単純に小さく出来ないからであるが、これでは一様と見なせない。しかし、逆に波長と周期が同程度のPCに適用しやすい。なお、MMは、負の屈折率の報告が多いが、MMはそれだけが特徴ではない。屈折率nの絶対値が1より小さい場合には、位相速度が真空中の光速より速くなるため、長いデバイスを短くできることがあり、誘電率 $\epsilon$ 、透磁率 $\mu$ の(両方が負ではなく)どちらかが負であれば、電磁波が伝搬不能となるため、それはバンドギャップとなる。我々はそれらの方面で新しい提案を行うつもりである。

2. 研究の目的

フォトニック結晶と組み合わせた特殊なモード変換器およびメタ・マテリアルの簡単な作製法の確立

導波管内に1列の誘電体棒( $\text{LaAlO}_3$ ,  $\epsilon_r=24$ )が準周期的に並べられた構造に於いて、WRJ-10 ( $f_c=6.55\text{GHz}$ )の場合、13.1GHz以上でTE<sub>20</sub>モードが伝搬可能になるので、この周波数帯でモード変換が起こる。従来のモード変換器に比べて帯域が広いが、これだけではそれほど驚くべき特徴ではない。このモード変換器の特徴は、TE<sub>20</sub>モードが伝搬しない低い帯域ではTE<sub>10</sub>モードがそのまま通過するところにある。これは従来の金属だけで構成されていたモード変換器では考えられないことである。TE<sub>10</sub>-TE<sub>30</sub>などでこのような従来のモード変換器で不可能な特性を実現したい

また、共振型のメタ・マテリアルに於いて、共振周波数を変化させることは、構造の寸法を変えなければならないが、フォトマスクを含めてコスト的に問題がある。これを簡便な方法で共振周波数を変化させたい。

3. 研究の方法

大きく分けて、フォトニック結晶とメタ・マテリアルの設計・作製になる。

まず、

- (1) 昨年までの成果の周波数依存型TE<sub>10</sub>-TE<sub>20</sub>モード変換器を組み合わせ、TE<sub>10</sub>-TE<sub>40</sub>モード変換器を作製する。
- (2) メタ・マテリアルで実現できる、今までにない誘電率や透磁率の材料を組み合わせ、その材料の電磁波の反射率や透過率を計算するような簡単なソフトウェアが今まで無かった。そこで、Windows用にソフトを作成し、学生の教育にも役立つようにする。
- (3) TE<sub>10</sub>-TE<sub>20</sub>、TE<sub>10</sub>-TE<sub>40</sub>モード変換器の他に周波数依存型のモード変換器が作製できないかを模索する。

(4) 通常、誘電率に影響を与える電氣的共振と透磁率に影響を与える磁氣的共振は別々の構造のメタ・マテリアルで構成する。今回は磁氣的共振周波数を連続的に変化させるにあたり、フォトマスクを何種類も作製する必要が無く、また、基板も変えることなく、メタ・マテリアルの1種である Sort wire pair 構造の磁氣的共振周波数を変化させる方法を模索する。

#### 4. 研究成果

(1)  $TE_{10}$  -  $TE_{20}$  モード変換器を2段に組み合わせて、 $TE_{10}$  -  $TE_{40}$  モード変換器を作製した。 $TE_{10}$  -  $TE_{20}$  モード変換器は、通常金属導波管の中に誘電体棒 ( $LaAlO_3$ ,  $\epsilon_r = 24$ ) 10本を上から差し込んだ構造である。しかし、 $TE_{10}$  -  $TE_{40}$  モード変換器の構成をどうするか、また単純に組み合わせただけで動作するとは限らないため、簡単ではない。最初に、 $TE_{10}$  -  $TE_{20}$  モード変換器の先に同じく  $TE_{10}$  -  $TE_{20}$  モード変換器を2個接続しようとしたが幅が異なるため、一部を金属で塞がなくてはならない。単純に塞いだところ電磁波の反射が大きく、使い物にならなかった。そこで幅の異なる部分での反射を低減するため、また、誘電体棒を少なくするため、最適化を図り、最終的に図1のような構造になった。接続部は金属壁を2段にし、また誘電体棒は  $10 \times 3 = 30$  となるところを24本に減らすことが出来た。この周波数依存型  $TE_{10}$  -  $TE_{40}$  モード変換器の透過特性を図2に示す。6.6 GHz - 8.9 GHz までは、 $TE_{10}$  が90%以上の透過率で、14.1 GHz - 16.3 GHz までは  $TE_{10}$  が90%以上の効率で  $TE_{40}$  モードに変換されることが分かった。

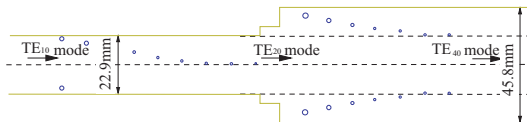


図1 周波数依存型  $TE_{10}$  -  $TE_{40}$  モード変換器

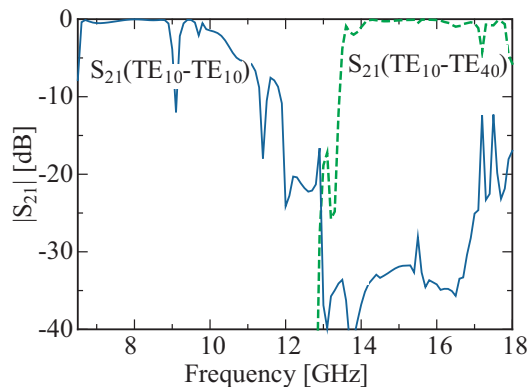


図2 モード変換器の透過特性

(2) メタ・マテリアルで実現できる、今までにない誘電率や透磁率の材料を組み合わせた場合、その材料の電磁波の反射率や透過率を計算するような簡単なソフトウェアが今まで無かった。そこで、Windows用にソフトを作成し、学生の教育にも役立つようにした。もちろん今までにも誘電率や透磁率を色々設定し組み合わせた材料の電磁波に対する反射率や透過率を計算するソフトウェアは存在した。しかし、透磁率に関してはフェライトに見られるように、適用する周波数がかかなり限られていたり、負の透磁率に対応したものはおそらく今まで無かった。メタ・マテリアルでは、負の誘電率や負の透磁率は当たり前のように実現できるため、任意の数値の誘電率や透磁率についての多層薄膜の電磁波に対する反射率や透過率を計算するソフトウェアを作成し、教育にも生かせるようにした。

(3)  $TE_{10}$  -  $TE_{20}$ ,  $TE_{10}$  -  $TE_{40}$  モード変換器の周波数依存型のモード変換器として、当然  $TE_{10}$  -  $TE_{30}$  モード変換器の可能性が考えられる。基本的な構造は図3のようであり、20本の  $LaAlO_3$  誘電体棒を金属導波管の上部から穴を開けて内部に挿し込んだ構造である。

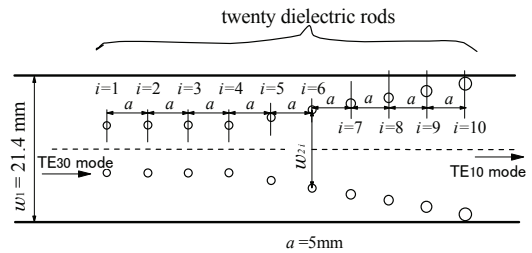


図3 周波数依存型  $TE_{30}$  -  $TE_{10}$  モード変換器

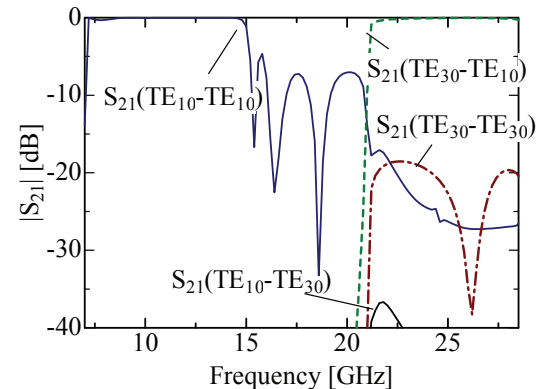


図4 モード変換器の透過特性

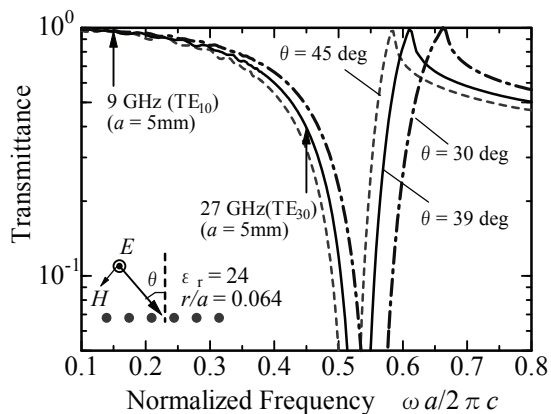


図5 1列の周期的誘電体棒の周波数に対する透過率 (誘電体棒の半径  $r$ ,  $\epsilon_r = 24$ , 周期  $a$ )

この構造におけるモード変換器の透過特性を図4に示す。8.2–14.8 GHzでは、 $TE_{10}$ モードが95%以上の効率でそのまま通過、22.2–28.4 GHzでは $TE_{30}$ モードが $TE_{10}$ モードにやはり95%以上の効率で変換される。ここで疑問に思うことは、誘電率が高い誘電体棒を導波管の中に入れていても拘らず、低い周波数では $TE_{10}$ モードがそのまま通過するのはなぜかと言うことである。そこで、誘電体棒を周期的に1列並べたときの電磁波の透過率を、円筒波展開法を用いて計算した。誘電体棒の太さはモード変換器の中央に置いた誘電体棒と同じで最も電磁波の影響を受ける場所のものである。図5によれば、9 GHzのときに透過率は0.97で非常に大きく誘電体棒の影響はほとんど受けていないことを示していることが分かった。逆に、モード変換の起こる27 GHzでは0.40と比較的大きな影響を受けていることが分かった。

(4) 一般に、導波管内にメタ・マテリアルなどの電氣的、磁氣的材料を挿入することで、導波管の特性を変化させることができる。このうち例えば、共振型のメタ・マテリアルは、共振周波数の近傍でしか特徴的な特性が得られない、すなわち周波数特性は狭いが、大きな透磁率あるいは負の透磁率が得られる。本研究では、メタ・マテリアルの構造の1つであるSort wire pairに焦点を当て、その作製の簡略化を図る。Sort wire pairの場合、共振周波数を変化させるには、wireの長さを変える、wireの太さを変える、pair間の距離を変える、などの方法がある。そのため通常の方法でわずかに共振周波数を変化させようと思っても、新たなフォトマスクが必要になったり、あるいは厚さの異なる誘電体基板を用意しなければならない。通常、誘電率に影響を与える電氣的共振と透磁率に影響を与える磁氣的共振は別々の構造のメタ・マテリアルで構成する。

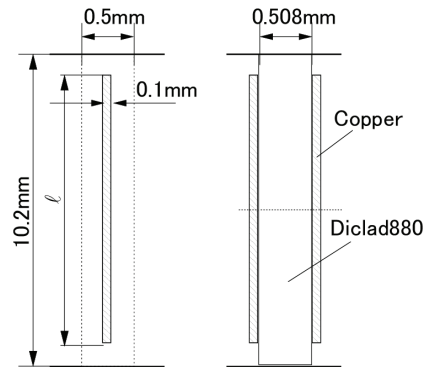


図6 メタ・マテリアルの構造 (Diclad880は誘電体で、( $\epsilon_r = 2.17, \tan \delta = 0.0009, 0.508$  mm厚)。ワイヤーは、0.1mm幅で0.5mmピッチで並んでいる。

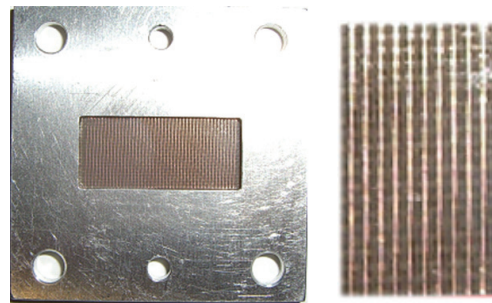


図7 45本のワイヤーを並べたSort wire pairのサンプル

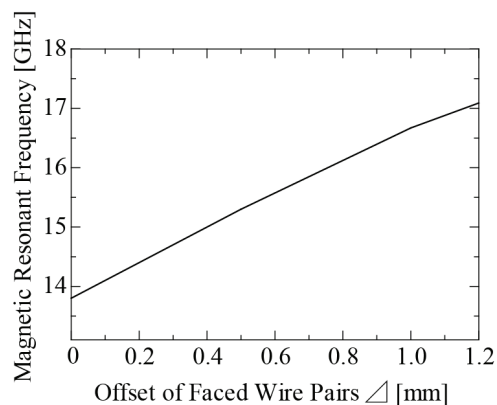


図8 両側に配置したワイヤーの位置を上下にずらした時の磁氣的共振周波数の変化 (図6における $l = 7$  mmの場合)

今回は磁氣的共振周波数を連続的に変化させるにあたり、フォトマスクを何種類も作製する必要が無く、また、基板も変えることなく、Sort wire pairの磁氣的共振周波数を変化させる方法を紹介します。図6のように誘電体基板Arlon社Diclad880 ( $\epsilon_r = 2.17, \tan \delta = 0.0009, 0.508$  mm厚)の両側に、幅0.1mm長さ7mm周期0.5mmで周期的に

銅を貼付け（図 7）WRI-100（22.4mm × 10.2mm）の導波管に入れると、磁氣的共振周波数は約 14GHz になる。次に同じフォトマスクを使用し、誘電体基板の両面に wire のパターンを合わせるときに、上下にずらすことで磁氣的共振周波数を変えることができる。結果を図 8 に示す。この場合、1.2mm ずらせると約 17GHz になり、およそ 3GHz 磁氣的共振周波数を高くすることができた。

#### 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 4 件）

- ① Y. Kokubo, “Frequency Range Dependent TE<sub>10</sub> to TE<sub>40</sub> Metallic Waveguide Mode Converter”, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, Vol.3, No. 7, pp. 287-290, Jul. 2011.
- ② 小久保 吉裕, “誘電体および磁性体薄膜の電磁波透過率の計算ソフト”, 応用物理教育（応用物理学会 応用物理教育分科会）, Vol. 35, No.1, pp. 29-34, 2011 年 7 月.
- ③ Y.Kokubo, ”Frequency-Dependent Rectangular TE<sub>30</sub>-to-TE<sub>10</sub> Mode Converter”, IEICE Transactions on Electronics, Vol.E94-C, No.11, pp. 1794-1797, Nov. 2011.
- ④ Y.Kokubo, ”Simple Method to Change the Magnetic Resonant Frequencies of Short Wire Pairs”, Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, Vol.5, No. 4, pp. 162 - 165, Apr. 2013.

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① 宮崎寛之, 小久保吉裕, “周波数依存型 TE<sub>10</sub>-TE<sub>20</sub> 導波管モード変換器”, 電子情報通信学会技術研究報告 MW2011-136, pp.59-64, 2011 年 12 月 山口大学.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：

権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小久保 吉裕 (KOKUBO YOSHIHIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80264836