

平成 21 年 5 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560336
 研究課題名（和文） 誘電率あるいは透磁率が負から正の値まで電氣的に可変なメタマテリアルの研究
 研究課題名（英文） Study of a meta-material whose permittivity or permeability can be changed from a negative value to a positive value
 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：導波管型左手系線路および多層格子状金属パターンで構成される媒質を提案し、外部より電圧を加える等の方法でその誘電的あるいは磁気的特性を示す定数が符号も含めて変化するような線路や媒質を実現あるいは数値的に確認した。これにより波のエネルギーとは逆方向への伝搬や減衰という性質を切り替える媒質の構造が示された。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2006年度 | 1,700,000 | 0 | 1,700,000 |
| 2007年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2008年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 480,000 | 3,780,000 |

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

近年マイクロ波帯においてメタマテリアルの研究が注目されている。メタマテリアルに関する研究は2000年以降に盛んになった新しい分野で、誘電体としては等価的に数百～千以上の巨大な比誘電率の実現やその異方性制御、負屈折率媒質として媒質中の位相速度と群速度の符号が逆転する後退波を利用した後方漏波現象や負屈折率等の従来にはなかった現象の予想、また実験的確認がされており、新たな電波応用が期待されている。この中で負屈折率媒質は屈折率が負になるという物理的にエキゾチックな特性を持つため興味を集めているが、負の誘電率と負の透磁率という概念を知らしめたと

いうことでも大きな意味がある。

これまでの主な研究として、まず米国の D. Smith が小さなワイヤとスプリットリングレゾネーターの粒子で負屈折率媒質の特性を実際に示して以来媒質製作の研究が注目を浴び、同じく米国の T. Itoh のグループにより応用に向けた取り組みが発表されている。またスペインの R. Maques は遮断領域の導波管が等価的に負誘電率を示すことを示している。

2. 研究の目的

人工媒質中において負の誘電率と負の透磁率は金属粒子によって実現されているが、負屈折率媒質を遮断領域の導波管で実現す

る提案があり、これは導波管構造が遮断領域周波数で負の誘電率と等価な働きをしていると考えられる。つまり電磁波を遮断する構造は観点を変えると負の誘電率や負の透磁率を持つものとして利用できる可能性がある。結局、片方が負、あるいは両方が負の媒質を実現するにおいて粒子と遮断構造による組み合わせがあり、特性や構造の得失から選択するのが望ましい。また誘電率や透磁率の可変性は機能デバイスを実現するための有効な手段であり、特にこれらの定数を負から正の値まで調節可能な媒質が得られれば、機能の高度化を図ることが出来る。

本研究では等価的に負の誘電率や負の透磁率の媒質と同様な働きをする構造と粒子を組み合わせた人工媒質を検討する。また電氣的に特性を変化させ、等価誘電率あるいは透磁率を正から負の値まで変化させる媒質を提案する。さらにこれらを機能デバイスへ応用することを考える。

3. 研究の方法

(1) 遮断領域導波管とマイクロストリップ型共振器による左手系線路

導波管が遮断領域で等価的に負の誘電率を示すことと、マイクロストリップ共振器が磁性体粒子として働くことを利用して左手系線路を構成し、その等価透磁率を電氣的に可変することを検討する。図1はその構造を表している。マイクロストリップ共振器に y 方向から磁界が鎖交したとき、図2に示すようにL-Cの直列回路と見なせるので、共振器を周回する電流は共振周波数を境にして磁界と同相から反対位相に変わり、等価透磁率も正から負に変化する。この透磁率が負となる周波数が導波管の遮断周波数領域にできれば、左手系線路として動作する。

次に共振器の共振周波数を変化させるために可変容量ダイオードを図3に示すように取り付ける。Ground Pattern と Small Pattern 間の容量を変えることで共振周波数が変化し、透磁率の周波数性が周波数軸方向に移動することが予想される。これを特定の周波数で見ると、透磁率が変化し、また線路の位相定数が変わることになる。

(2) 遮断領域導波管とスタブを組み合わせた左手系線路

電磁波が伝搬する媒質は分布定数線路により等価回路表示される。その直列、並列リアクタンスの符号と誘電率、透磁率の符号は密接に関係しており、直列リアクタンスの正と負はそれぞれ透磁率の正と負、並列リアクタンスの正負はそれぞれ誘電率の負と正に対応する。ここでは図4のように導波管にスタブ構造を組み合わせることで、直列の負のリアクタンス成分を追加することを検討す

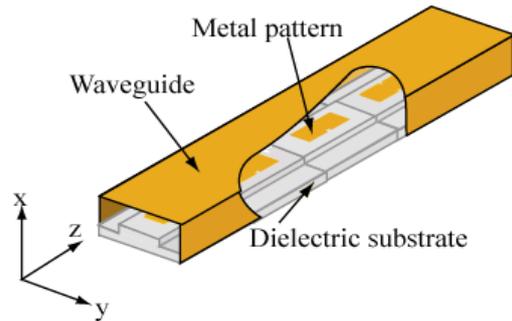


図1 マイクロストリップ共振器を含む遮断領域導波管の構造

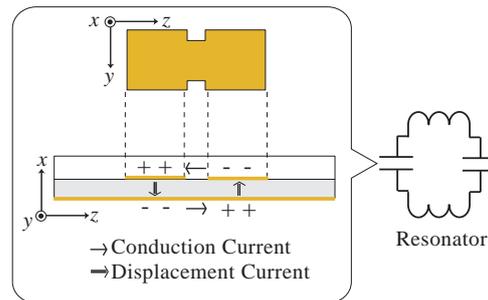


図2 マイクロストリップ共振器の等価回路と周回電流

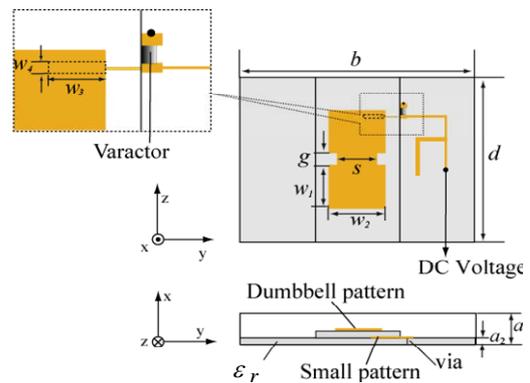


図3 可変容量ダイオードを取り付けたマイクロストリップ共振器

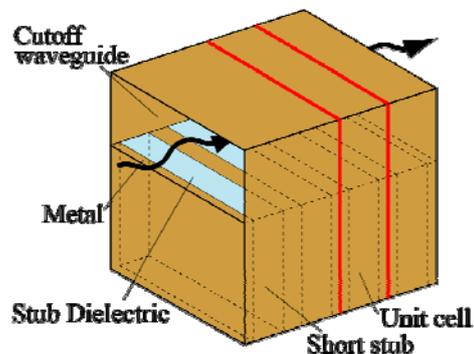


図4 導波管型右手/左手系複合線路

る。導波管は周波数増加に対して遮断から導波へと伝搬特性が変わり、先端短絡スタブは誘導性から容量性へ変わる。このためその等価回路は図5のように表される。よって直並列のリアクタンスの変化は図6のようにまとめられ、等価透磁率と誘電率も周波数により変化することになり、 f_p を境に透磁率は負から正に、 f_c を境に誘電率は負から正に変わる。

次に等価透磁率や誘電率の特性を周波数軸上で移動することで、ある特定の周波数における透磁率や誘電率を変化させることを考える。図7に示す構造で upper dielectric は調整用の誘電体で、電気的にアクチュエーターを動作させて外部よりこの誘電体を移動させる。導波管およびスタブ内の電界は中央部が強いため、誘電体を端から中央へ移動すると f_p と f_c が下がり、透磁率と誘電率が負から正に変わることになる。

(3) 多層格子状金属パターンで構成される左手系媒質

(2)で検討した構造において負の誘電率が実現されるのは導波管側面を流れる電流によるものと考えられる。線路ではなく空間的に広がった左手系媒質を構成するために、金属側面の変わりに電流を流す金属パターンを、また負の透磁率を実現するためにスタブ状の平行導体パターンを設ける。図8に媒質の構造を示す。矢印で示す赤い領域が金属パターンで、これが多層、z方向に並んでいる。薄い青で示した部分が単位セルを表し、これがx、y方向に周期的に並んでいる。x方向に偏波した電磁波がz方向に入射したとき格子状パターンのx方向の部分に電流が流れ、媒質の誘電率に影響する。またパターンのx方向の部分には電荷が貯まり、媒質の透磁率に影響する。

格子状パターンのx方向の部分に並列に可変容量ダイオードを接続しリアクタンスを変化させる。電気的にダイオードの容量値を変えることで、媒質の誘電率が変化することが予想される。

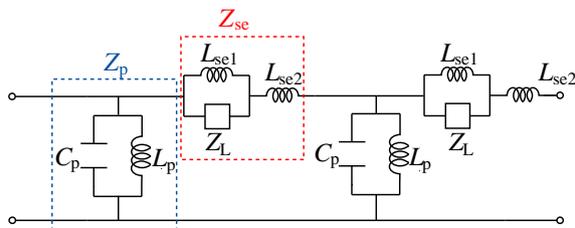
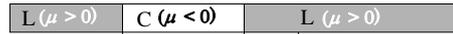


図5 導波管型右手/左手系複合線路(図4)の等価回路

Series Impedance Z_{se} (Permeability)



Shunt Impedance Z_p (Permittivity)

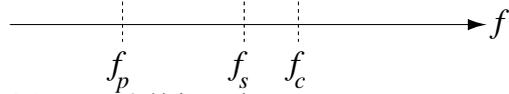


図6 図5に示す等価回路のリアクタンスの周波数特性

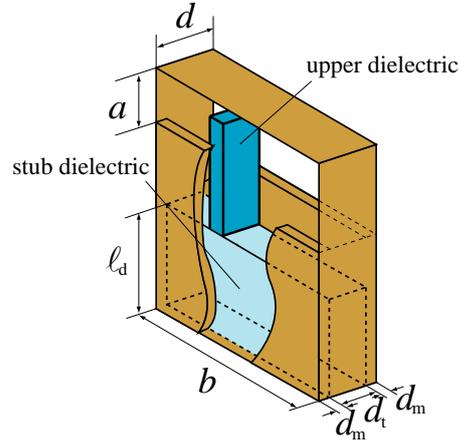


図7 調整用誘電体を入れた導波管型右手/左手系複合線路の1セル

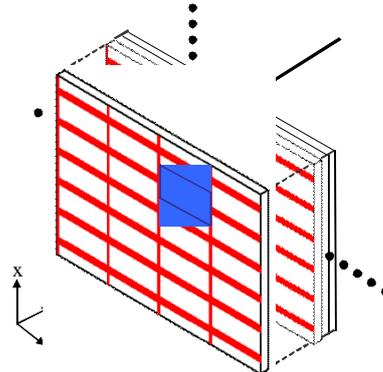


図8 多層格子状パターン左手系媒質

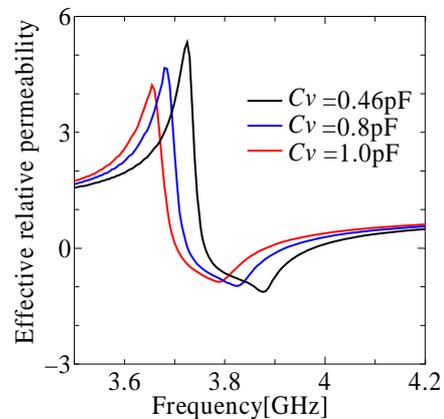


図9 マイクロストリップ共振器を含む遮断領域導波管の等価透磁率

4. 研究成果

(1) 遮断域導波管とマイクロストリップ型共振器による左手系線路

シミュレーションによりこの線路に関する透過係数と反射係数を求め、等価透磁率を計算した。図9では可変容量ダイオードの容量値を0.46pFから1.0pFまで変化させている。マイクロストリップ共振器の共振が起こり、その前後で等価透磁率が正から負へと変化している。3.7GHzで透磁率の変化を見ると、0.46pFでは正の値で1.0pFでは負の値となっている。

図10に試作した遮断領域導波管を用いた左手系線路の上蓋を開けた状態の写真を示す。2個の共振器で構成されており、下方向に伸びた細い線はダイオードのバイアス回路に電圧を加える銅線である。銅線に電圧を加えたときの線路の透過波の位相を図11に示す。例えば図9に示すように $C_v = 1.0\text{pF}$ では3.7GHz以下で等価透磁率が正であるため電磁波は殆ど伝搬しない。測定されているのは減衰した小さな透過波の位相である。3.7GHz以上では等価透磁率が負になり左手系モードの電磁波が伝搬し、その位相が測定されている。等価的透磁率の変化により位相が変化し、可変位相器として働いている。

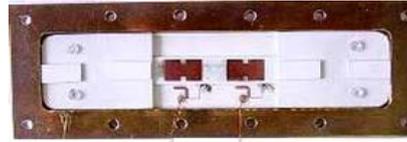


図10 試作した左手系線路

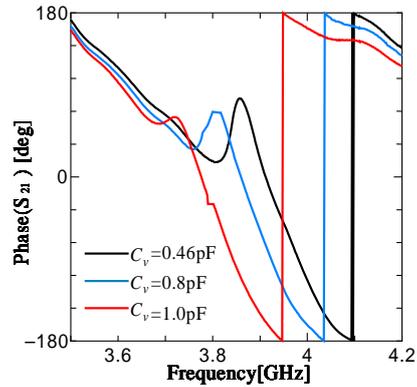


図11 左手系線路の位相特性

(2) 遮断域導波管とスタブを組み合わせた左手系線路

調整用の誘電体の位置を変えると線路の分散特性は図12のように周波数軸上を移動する。誘電体の導波管側面からの距離を b_m で示している。 b_m の各値において最低次モードは左手系でありその伝搬範囲で透磁率と誘電率は負、2番目のモードは右手系でありその伝搬範囲で透磁率と誘電率は正になっている。例えば4.8GHzにおいて $b_m=0\text{mm}$ では透磁率、誘電率ともに負で、 $b_m=14.2\text{mm}$ にすると透磁率、誘電率ともに正となる。

図13は4セルで構成される線路の透過係数の位相を示している。4.8GHzで見ると $b_m=4\text{mm}$ では位相変化が-5度、 $b_m=0\text{mm}$ では位相変化が143度、 $b_m=14.2\text{mm}$ では位相変化が178度となっており位相可変機能を備えていることが分かる。

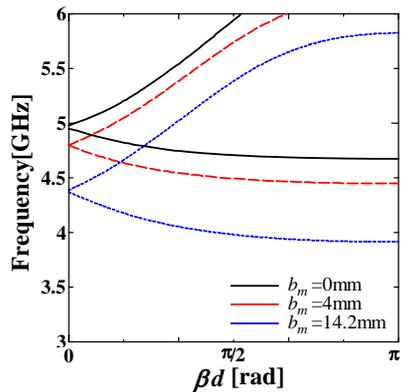


図12 遮断域導波管とスタブを組み合わせた左手系線路の分散特性

(3) 多層格子状金属パターンで構成される左手系媒質

図14に示すような8セルからなる媒質を作成し、伝搬特性を評価した。図15はその透過・反射特性を示している。シミュレーションに依れば4GHzから4.7GHzの間で等価透磁率と誘電率が負となる左手系媒質になっており、測定結果もこの範囲で電磁波の伝搬が確認できる。なお測定系に4dBの損失があるため、媒質自体の損失はグラフの値より小さい。

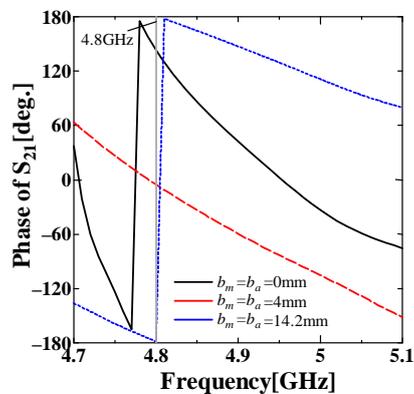


図13 遮断域導波管とスタブを組み合わせた左手系線路の位相特性

媒質の縦方向金属パターンに可変容量ダイオードを取り付けて容量を変化させたときの等価誘電率，透磁率の周波数特性を図16に示す。容量値を変えたとき，透磁率は一定で誘電率が変化している。

(4)まとめ

導波管構造を利用してマイクロストリップ共振器やスタブ構造と組み合わせることにより左手系線路を実現した。この構造において等価透磁率や誘電率を可変する構造を示し，その変化を位相から確認した。これらの構造，動作原理を基にして多層金属パターンからなる左手系媒質を提案し作成し，その誘電率が可変容量ダイオードを利用して電氣的に変わることを数値的に確認した。

本研究で示したものは，可変位相器，ビームスキャンアンテナ及び電磁波の伝搬特性を制御するような媒質へ応用することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

- ① 久保洋，笹井雅彦，真田篤志，遮断領域導波管に誘電体充填スタブを取り付けた左手系線路，電子情報通信学会論文誌，J-91-C，743-752，2008，査読有り
- ② H. Kubo, H. Kuwahara, and A. Sanada, A Left-Handed Transmission Line Composed of Two Waveguides with Stubs, IEICE TRANSACTIONS on Electronics, E91-C, 1765-1771, 2008, 査読有り
- ③ H. Kubo, H. Kuwahara, and A. Sanada, Left-Handed Waveguide with Variable Phase Constant Composed of Planar Resonator Patterns, 2006 International Symposium on Antennas and Propagation Proceedings, CD-ROM, 2006, 査読有り

〔学会発表〕(計 8件)

- ① 久保洋，多層格子状金属パターンで構成される左手系媒質とその伝搬特性，2009 電子情報通信学会総合大会，2009年3月18日，松山
- ② 久保洋，多層の格子状金属パターンで構成される左手系媒質，平成20年電気・情報関連学会中国支部連合大会，2008年10月25日，鳥取
- ③ 久保洋，遮断領域導波管と誘電体充填スタブで構成される位相定数可変な右手・左手系線路，平成20年電気・情報関連学会中国支部連合大会，2008年10月25日，鳥取

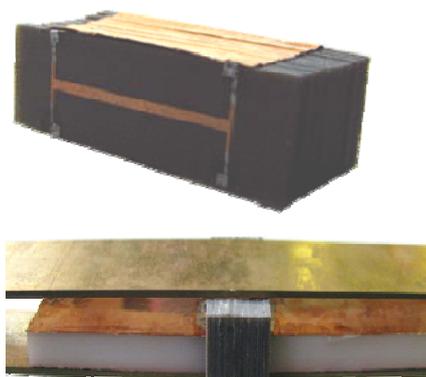


図14 作成した媒質と測定系

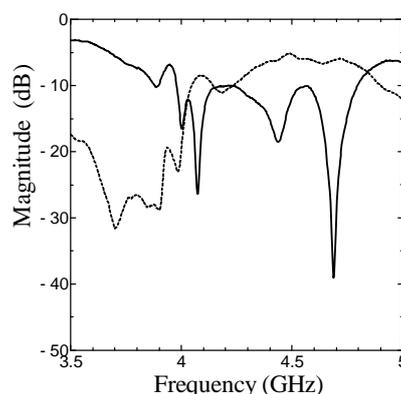


図15 透過・反射特性

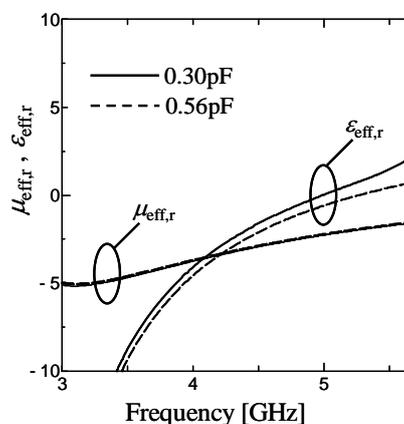


図16 可変容量ダイオードによる媒質等価誘電率の変化

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕
無し

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 なし

(3) 連携研究者 なし