

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889028

研究課題名(和文) 間接結合型共振器で構成されるメタマテリアルにおける電磁波の極低群速度伝搬

研究課題名(英文) Very slow group velocity propagation of electromagnetic waves in metamaterials composed of coupled resonators with indirect coupling

研究代表者

玉山 泰宏 (TAMAYAMA, Yasuhiro)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50707312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：量子光学における電磁誘起透明化を模擬するメタマテリアルを作製し、電磁波の極低群速度伝搬の実現、および、それを利用した非線形現象発生の高効率化に取り組んだ。間接結合型の共振器で構成されるメタマテリアルを用いると、群速度を真空中の光速の1/27000まで低減できることを示した。低群速度伝搬に伴う局所電場増強効果を利用して空気の絶縁破壊を局所的に発生させることにより、メタマテリアルの特性を、EIT型とローレンツ型との間で動的に制御することに成功した。これらの成果は、電磁波に対するリミッタやスイッチとしての応用につながるものである。

研究成果の概要(英文)：We have investigated slow group velocity propagation of electromagnetic waves and enhanced nonlinear phenomena associated with the slow group velocity propagation in metamaterials that mimics electromagnetically induced transparency (EIT) in quantum optics. The group index of 27000 was achieved in an EIT-like metamaterial composed of coupled resonators with indirect coupling. The characteristic of the EIT-like metamaterial was dynamically changed to two kinds of Lorentz type metamaterials using an air discharge plasma caused by a highly enhanced local electric field associated with the slow group velocity propagation. The metamaterial can be applied, for example, to limiters and switches for electromagnetic waves.

研究分野：電磁光学

キーワード：応用光学・量子光工学 メタマテリアル 群速度 電磁誘起透明化 非線形現象

1. 研究開始当初の背景

光情報処理における光メモリや、非線形現象の高効率発生などに応用できる技術として電磁波の低群速度伝搬について研究されている。低群速度伝搬を実現する手法の1つとして、量子光学における電磁誘起透明化 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 現象を古典系で模擬するという研究がなされている。その中で、研究代表者は EIT 現象と同様のふるまいを示すメタマテリアル、すなわち EIT メタマテリアルの実現について研究してきた。メタマテリアルとは電磁波の波長に比べて十分小さい構造の集合体であり、電磁波に対して一般的な連続媒質としてふるまう人工媒質である。メタマテリアルは波長に対するスケールビリティをもつため、マイクロ波やテラヘルツ波、光領域などの広い周波数領域にわたって、同様の考え方でメタマテリアルを設計することができるという大きなメリットをもつ。これまで EIT メタマテリアルを構成するためには直接結合 (近接場結合) 型の共振器が用いられてきた。ところが、研究代表者は、直接結合ではなく間接結合 (放射結合) を導入すれば従来の EIT メタマテリアルよりも群速度を大幅に遅くできることを理論的に見出した。この理論を実証するために、間接結合型の共振器で構成されたメタマテリアルを考案し、FDTD 法を用いて数値解析を行った。その結果、従来の EIT メタマテリアルに比べて少なくとも1桁遅い群速度が実現できることがわかった。しかしながら、FDTD シミュレーションでは計算時間の制約や離散化誤差の影響で群速度の最小値を見積もるには至らなかった。そこで、研究代表者が考案した理論による EIT メタマテリアルを実際に作製し、実現できる群速度の最小値について実験的に探求しようという着想に至った。

2. 研究の目的

研究代表者が考案した理論に基づく EIT メタマテリアルにおいて実現可能な群速度の最小値を実験的に探究するとともに、その応用についても検討する。そのために、以下の課題に取り組む。

(1) 極低群速度を得るために適した EIT メタマテリアルの設計を行う。得られる群速度をより遅くするためには、メタマテリアル中の基板における誘電損失をなくす必要があることを既に見出している。そのため、FDTD 法を用いて、間接結合を導入した EIT メタマテリアルを、誘電基板を用いず金属のみで設計する。

(2) 実験的に EIT メタマテリアルにおける最小群速度を探求する。FDTD シミュレーションの結果をふまえて作製したメタマテリアルに対して透過特性の測定を行い、群速度

の評価をする。構造パラメータが異なる複数のメタマテリアルについて測定を行い、群速度が最も小さくなる条件、および、そのときの群速度を実験的に見出す。

(3) 低群速度伝搬に伴う局所電場増強効果を利用した非線形現象の高効率発生に取り組む。電磁波の群速度を低減させると、メタマテリアル中のある部分に大きな局所電場が発生する。この効果により、数 W 程度の入射パワーで空気の絶縁破壊を起こせることが FDTD シミュレーションの結果として得られている。この絶縁破壊を利用することにより非線形メタマテリアルが実現できる。低群速度伝搬の応用例として、“空気の非線形性”を利用した非線形メタマテリアルを実現し、その性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) 極低群速度を得るために適した EIT メタマテリアルを、FDTD 法を用いて設計した。より遅い群速度を得るためには、メタマテリアル中の基板における誘電損失をなくさなければならない。また、メタマテリアルのユニットセル間の構造パラメータのパラツキを小さくすることも必要である。誘電損失と構造パラメータのパラツキが無い場合の理論値に限りなく近い極低群速度を得るために、図1のような、金属のみで構成された、メタマテリアルと方形導波管のフランジが一体化したような構造を考案した。この構造を方形導波管に挿入した測定系は、方形導波管内の電磁場分布の性質から、フランジの内側の構造が周期的に配置されたメタマテリアルの、垂直入射平面波に対する応答を測定するのとはほぼ等価な系になる。構造の機械的強度を保ちつつ、3 GHz 付近に共振周波数をもつようなメタマテリアルを FDTD シミュレーションにより設計した。

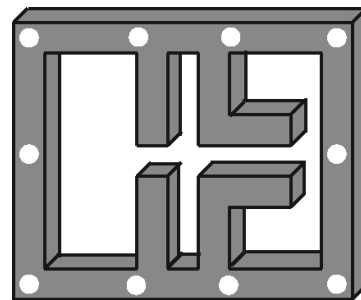


図1: 方形導波管のフランジと一体化したメタマテリアル。

(2) 設計したメタマテリアルを作製し、方形導波管に挿入したときの透過率および群遅延の周波数依存性を、ネットワークアナライザを用いて測定した。構造パラメータを少しずつ変化させたメタマテリアルを複数作製し、これらの特性を測定することにより、実験的に最適な構造パラメータの条

件を調べた。

(3) 低群速度伝搬の応用例として、メタマテリアル中の局所電場増強により引き起こされる空気の絶縁破壊を利用した、非線形メタマテリアルの実現について実験を行った。メタマテリアルを挿入した方形導波管を、1.0 kPa まで減圧した真空チャンバー内に配置し、透過特性の測定を行った。まず、メタマテリアルに連続波を入射した場合の透過スペクトルを測定した。ここでは、入射周波数を低周波数から高周波数へ変化させた場合と、高周波数から低周波数へ変化させた場合の 2 通りについて実験を行った。その結果を基にして、メタマテリアルに放電制御用のマイクロ波（ポンプ波）を入射した状態で、応答診断用のマイクロ波（プローブ波）に対する透過スペクトルの測定を行った。

(4)(1) - (3) と並行して、EITメタマテリアルと同様の構造をもつ結合共振メタマテリアルのふるまいについて、電気回路モデルや電磁界シミュレーションを利用して解析することにより、新奇な現象の探索を行った。

4. 研究成果

(1) 3 GHz 付近に共振周波数をもつような EITメタマテリアルを設計した結果、図 2 のような構造パラメータを用いれば良いことがわかった。最小群速度の実験的な探求の際には、図中の w を変化させて最適値を見出せば良いことも確認した。

(2) 図 2 のメタマテリアル ($w = 5.7$ mm) をワイヤー放電加工により作製し、線形透過スペクトルを測定した結果を図 3 に示す。中心周波数が 3.036 GHz で透過帯域幅が 4 MHz という、これまでの EITメタマテリアルに比べて非常に狭帯域の透明化現象を実現することに成功した。

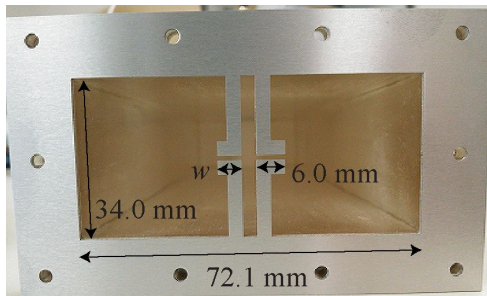


図 2: 設計したメタマテリアルの構造パラメータ。

続いて、 $w = 5.0$ mm, 5.5 mm, 5.6 mm, 5.7 mm, 5.8 mm としたメタマテリアルに対して、透明化周波数における群遅延を測定した結果

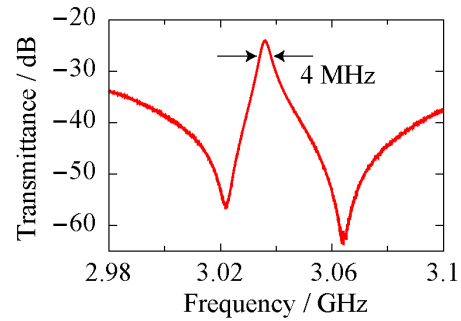


図 3: 線形透過スペクトル。

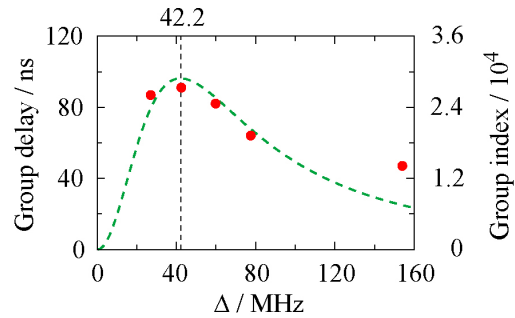


図 4: 作製したメタマテリアルの群遅延。丸印は測定値で、左から、 $w = 5.8$ mm, 5.7 mm, 5.6 mm, 5.5 mm, 5.0 mm のメタマテリアルに対するもの。 Δ は透過スペクトルのディップ周波数の差である。また、破線は理論曲線を表す。

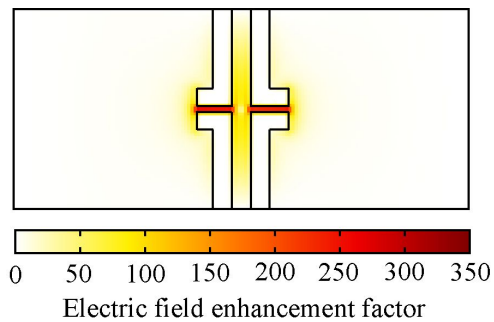


図 5: 電場増強率。

を図 4 に示す。 $w = 5.7$ mm のときに群遅延が最大値 (91 ns) になっている。この遅延時間より、本研究における EITメタマテリアルを用いれば、群速度を真空中の光速の $1/27000$ まで低減できることがわかった。また、得られた測定値に理論式をフィッティングしたところ、両者はよく合うという結果も得られた。

得られた測定値を基にして、FDTD法を用いて、メタマテリアル中における損失を見積もり、電場増強率を解析した結果を図 5 に示す。カットワイヤ共振器のギャップ部分におおよそ 300 倍もの電場増強が実現できることが明らかになった。

(3) メタマテリアルの非線形応答特性を評

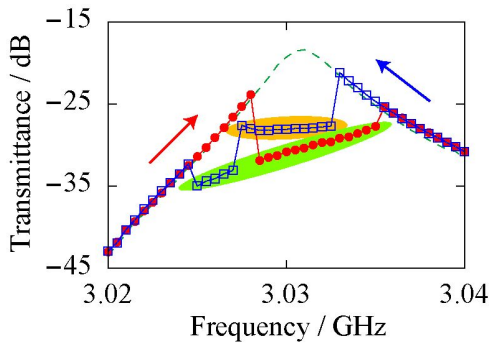


図 6: 非線形透過スペクトル. 赤色丸印と青色四角印はそれぞれ, 入射周波数を低周波数から高周波数および高周波数から低周波数に掃引したときのものである. 図の見やすさのため, データ間を直線で結んでいる. 緑色の破線は線形透過スペクトルを表す.

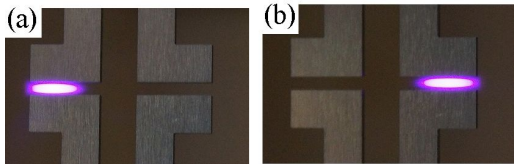


図 7: 放電発生時のメタマテリアルの写真. (a)と(b)はそれぞれ図 6 の黄色と緑色の領域の透過率が得られている時のもの.

価するために, 数 μm 程度のマイクロ波をメタマテリアルに入射させたときの透過スペクトルを測定した. その結果の一例を図 6 に示す. 入射周波数が 3.03 GHz 付近の時に, 線形透過率とは異なる透過率が得られていることがわかる. また, 周波数の掃引方向に応じて, 2 つの異なる透過状態が存在することがわかる.

黄色領域にある透過率が得られている時と, 緑色領域にある透過率が得られている時のメタマテリアルを撮影した写真を図 7 に示す. 写真より, それぞれの透過状態は一方のカットワイヤ共振器のギャップ部分で空気の絶縁破壊が生じた状態に対応することが確認できる. これら結果から, 入射マイクロ波のパワーや周波数を制御することにより, 2 つの異なる放電状態の制御ができることが明らかになった.

最後に, メタマテリアルにポンプ波を入射した状態で, プローブ波に対する透過スペクトルを測定した結果の一例を図 8 に示す. 放電が生じているカットワイヤ共振器に対応する透過ディップが消失し, それに伴い透過ピークも消失していることがわかる. この結果は, ポンプ波のパワーや周波数を制御することにより, メタマテリアルの応答を EIT 型と 2 種のローレンツ型との間で動的に制御できることを表している.

以上で得られた結果は, 本研究で考案, 作製したメタマテリアルは, 電磁波に対する

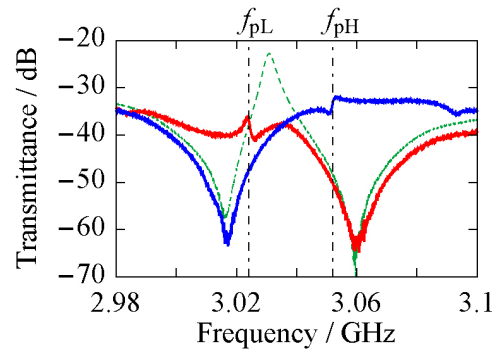


図 8: ポンプ波入射時のプローブ波に対する透過スペクトル. 赤色と青色の曲線はそれぞれポンプ波の周波数が $f_{pL} = 3.024$ GHz, $f_{pH} = 3.052$ GHz の時の測定値. 緑色の破線はポンプ波を入射させない場合の透過スペクトル.

リミッタやスイッチとして応用できることを示している.

(4) 2 つの同じ共振器が結合した構造で構成されるメタマテリアルにおいて, 共振器間の結合強度がある特定の値になった時, 反射率と透過率が共に $1/2$ であるような $1/4$ 波長板が実現できることを発見した. この成果は円偏光ビームスプリッタへの応用可能性を示唆するものである.

(1) - (4) をまとめると, 本研究は, 結合共振メタマテリアルを利用した新奇な電磁波制御手法を提案, 実証するものであり, 将来の光情報処理技術の発展に貢献するものであるといえる.

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 2 件)

Y. Tamayama, K. Yasui, T. Nakanishi, and M. Kitano, "A linear-to-circular polarization converter with half transmission and half reflection using a single-layered metamaterial," Applied Physics Letters, 査読有, vol. 105, 2014 pp. 021110-1-4, DOI: 10.1063/1.4890623

Y. Tamayama, K. Yasui, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Electromagnetically induced transparency like transmission in a metamaterial composed of cut-wire pairs with indirect coupling," Physical Review B, 査読有, vol. 89, 2014, pp. 075120-1-7, DOI: 10.1103/PhysRevB.89.075120

[学会発表](計 5 件)

玉山 泰宏, 安井 寛治, 中西 俊博, 北野正雄, 「間接結合を導入した電磁誘起透明化メタマテリアルにおける最大群遅延」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7 日, 中部大学 (愛知県・春日井市)

玉山 泰宏, 安井 寛治, 中西 俊博, 北野正雄, 「メタマテリアルによる電磁波の低群速度伝搬の実現」, 産学連携環境エネルギーシンポジウム 2014, 2014 年 1 月 25 日, 小山工業高等専門学校 (栃木県・小山市)

Y. Tamayama, K. Yasui, T. Nakanishi, and M. Kitano, "Slow and Variable Group Velocity in a Metamaterial Mimicking Electromagnetically Induced Transparency," MJIIT-JUC Joint International Symposium 2013, 6 November, 2013, Tokai University (Kanagawa, Hiratsuka)

玉山 泰宏, 安井 寛治, 中西 俊博, 北野正雄, 「電磁誘起透明化現象を模擬するメタマテリアルにおける電磁波の群速度制御」, 電子部品・材料研究会 (CPM), 2013 年 10 月 24 日, 新潟大学 駅南キャンパス「ときめいと」(新潟県・新潟市)

玉山 泰宏, 安井 寛治, 中西 俊博, 北野正雄, 「間接結合を導入した結合共振メタマテリアルにおける狭帯域透明化現象」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

〔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 :
出願年月日 :
取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等
<http://kyasuiweb.nagaokaut.ac.jp/tamayama/index.html>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者
玉山 泰宏 (TAMAYAMA, Yasuhiro)
長岡技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 5 0 7 0 7 3 2 1

(2) 研究分担者
()

研究者番号 :

(3) 連携研究者
()

研究者番号 :