

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6月6日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010年～2012年

課題番号：22560041

研究課題名（和文） **メタマテリアルを利用した電磁波の速度制御とその応用**

研究課題名（英文） Velocity control of electromagnetic waves using metamaterials and its applications

研究代表者

北野 正雄 (KITANO MASAO)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70115830

研究成果の概要（和文）：

メタマテリアルという人工的な原子の集合体を用いて、電磁誘起透明化現象(EIT 現象)と呼ばれる現象を実現し、その特性を制御する方法について研究を行った。マイクロ波を用いた実験において、入射角度に応じてパルスの伝搬遅延を制御する方法と、印加電圧を変化させることで特性を制御する方法を実証した。後者の応用として電磁波の保存/再生実験を行った。また、非線形素子を導入した EIT メタマテリアルを用いた高効率周波数混合の実証も行った。

研究成果の概要（英文）：

We realized electromagnetically induced transparency (EIT) using metamaterial, which is an assembly of subwavelength artificial atoms, and investigated methods to control EIT properties. In microwave regions, we realized a method to control the propagation delay by the incident angle and a method to control the EIT properties by applied voltages. As an application of the latter method, we demonstrated storage and retrieval of a pulse in the metamaterial. We also achieved efficient frequency mixing using EIT metamaterial with nonlinear elements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：量子エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

電磁誘起透明化現象(EIT 現象)は原子系で研究されてきた現象で、光を含む電磁波の速度を著しく遅くするだけでなく、EIT 現象を動的に制御することで光を媒質中に保存することを可能にし、光メモリ、量子メモリといった応用に発展している。しかし、原子を用いた場合、対象となる光（電磁波）の種類

は、原子種によって決まるため、極限られた周波数に対してのみ実現が可能である。これに対して、メタマテリアルを用いて EIT 現象を模擬する研究が盛んに行なわれている。メタマテリアルとは、波長より小さい金属や誘電体の構造物を人工的なある種の原子（メタ原子）として用いることで、特異な電磁応答を実現するものである。このメタ原子を設計

することにより、あらゆる波長でEIT現象を実現することができる。これをEITメタマテリアルと呼ぶ。しかし、これまでの研究では、EIT現象を制御するにはメタ原子の構造を変える必要があった。そのため、EIT現象の動的制御が必要となる電磁波の保存に関する実証は行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、メタマテリアル中の電磁波の群速度を制御する方法を提案し、マイクロ波領域において提案法を実験的に検証することを主要な目的とする。また、低群速度伝搬の応用として非線形相互作用の増大に関しても研究を行なう。以下に、主な研究テーマを3つ挙げる。

(1) EIT現象の外部パラメータ制御

EITメタマテリアルの特性を入射電磁場のパラメータで制御する方法について研究を行なう。特に、入射電磁界の電場勾配により制御可能なEITメタマテリアルについて研究を行なう。

(2) EIT現象の動的制御と電磁波の保存再生
電磁波の伝搬を停止したり、再開したりするには、EIT現象を動的に制御できるようなEITメタマテリアルの実現が不可欠となる。本研究では、可変容量ダイオードを用いてメタ原子の対称性を制御することでEIT現象を動的に制御する方法を研究する。そして、その応用として、電磁波の保存と再生の実験的実証に取り組む。

(3) EITメタマテリアルを用いた非線形現象の高効率化

電磁波パルスがEITメタマテリアル中で低群速度で伝搬する際、電磁波パルスのエネルギーは空間的に圧縮され伝搬する。このとき、圧縮された電磁波パルスのエネルギーはメタマテリアルを構成する高Q値共振器に蓄えられるが、この高Q値共振器に非線形素子を導入することで、高い変換効率で高調波が発生することが予想される。本研究では、特に四光波混合過程の増強について研究を行なう。

3. 研究の方法

(1) EIT現象の外部パラメータ制御

入射電磁場の電場の勾配によってEIT現象の特性を制御するために、図1のような金属構造をもつメタマテリアルを考案した。電場勾配があるときに透明化現象が起こることから、電場勾配誘起透明化(Field Gradient Induced Transparency, FGIT)と呼んでいる。

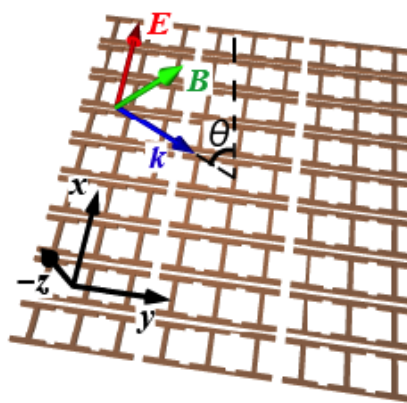


図1 電場勾配によるEIT現象の制御で用いるメタマテリアルの構造

実験的にこの効果を実証するために、この構造をプリント基板上に作成し、ホーンアンテナから出射されるマイクロ波の透過波を測定した。電場勾配は入射角度を変えることで実現される。ネットワークアナライザを用いることで透過スペクトルを測定し、透明化現象を評価することができる。そして、電磁波パルスの進行速度を評価するために、透明化帯域に中心スペクトルをもつマイクロ波パルスをメタマテリアルに入射し、透過波の波形を包絡線検波によって取得した。これにより、メタマテリアルを透過するとき付与する電磁波の遅延時間を見積もることができる。入射角度ごとにこの測定を行ない、入射角度とパルスの伝搬速度の関係を導く。

(2) EIT現象の動的制御と電磁波の保存再生

EIT現象の動的制御を目標として、メタマテリアルに可変容量素子としてバラクタダイオードを導入した図2のような構造を利用した。バイアス回路からバラクタダイオードに電圧を印加することで容量値を制御することができる。バラクタダイオードの容量が1.2pFであるときには、構造は左右対称になるが、そうでないときには構造に非対称性が現れる。前者のときEIT現象は現れず、後者のときにはEIT現象が現れる。

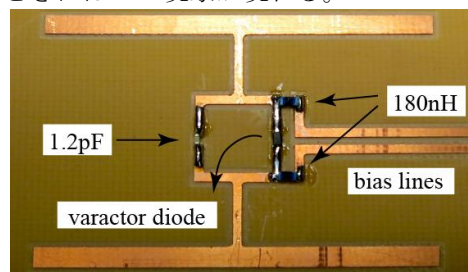


図2 電圧制御型EITメタマテリアルの単位構造

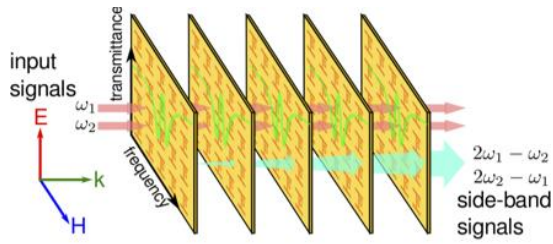


図 3 非線形 EIT メタマテリアルを用いた四光波混合

実験においては、まず EIT 現象の準静的特性を評価した。メタマテリアルを 3 層用意し、マイクロストリップ線路型の解放型導波路に挿入した。始めに、メタマテリアルの透過スペクトルをネットワークアナライザを用いて印加電圧を変えながら測定した。そして、透明化が起こっている場合に、透明化帯域にスペクトルをもつマイクロ波パルスの伝搬遅延を時間領域で測定した。

次に、EIT 特性の動的制御の実証として、まず連続信号の振幅変調をメタマテリアルに印加するバイアス電圧の変調で実現する。そして、電磁波の保存再生実験を行なった。入射マイクロ波がメタマテリアル中を伝搬しているときに、EIT 現象を消失させることで、電磁波の保存が実現される。そして、EIT 現象を再び回復させることで、保存されていた電磁波が進行を再開する。

(3) EIT メタマテリアルを用いた非線形現象の高効率化

電気ダイポール共鳴構造とスプリットリング共振器を磁氣的に結合させることで、EIT メタマテリアルを実現できる。スプリットリング共振器に非線形素子として可変容量ダイオードを導入する。共鳴的な非線形効果の増強を実証するために、図 3 に示すように、2つの周波数のマイクロ波から生成されるサイドバンド信号強度を測定する。

4. 研究成果

(1) EIT 現象の外部パラメータ制御

図 4 (a) に測定した透過スペクトルの例を示す。狭帯域で透過率が增加する EIT 現象がいずれの場合も確認できる。入射角が 35 度のときと 60 度のときで比較すると、後者の方が透明化帯域が大きくなっている。そして、パルスの伝搬速度から透明化帯域でのパルスの遅延時間を測定した結果を図 4 (b) に示した。また、遅延時間 (group delay) を群屈折率 (group index) に変換した結果も同図に示している。群屈折率は、メタマテリアル中のパルスの伝搬遅延が真空中の伝搬遅延の何倍になるかを示している。実験結果より、利用したメタマテリアル中でのパルスの伝

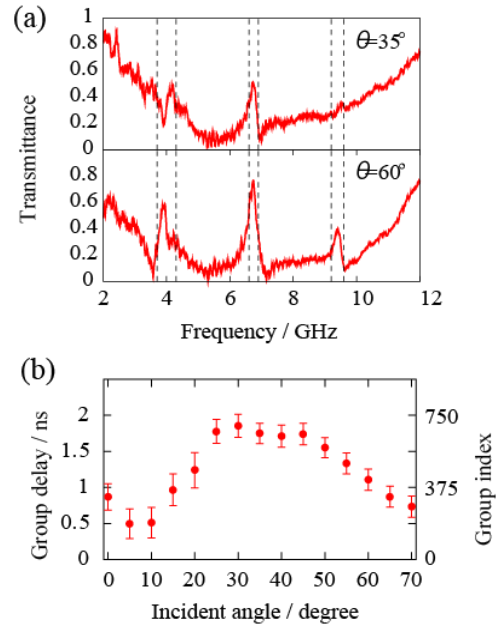


図 4 (a)透過スペクトルの角度依存性

(b)群遅延、群屈折率の角度依存性

搬速度が、真空中の光速の $1/188$ から $1/694$ の範囲で制御できることが分かった。従来の EIT メタマテリアルの研究では、特性を変化させるには構造を変えるしかなかったが、この研究では、入射角度(より正確には電場勾配)という外部パラメータで EIT 特性を制御することが可能であることを実証した。

(2) EIT 現象の動的制御と電磁波の保存再生

メタマテリアルに印加するバイアス電圧を変化させながら透過スペクトルを測定した。図 5 (a) にバイアス電圧が -3.6V のときと -0.4V のときの透過スペクトルを示す。前者の場合には EIT 現象が観測されないが、後者のときには EIT 現象が観測されている。このように、印加電圧によって EIT 現象の切り替えが可能であることを実証した。これにより、これまで実証されていなかった、電磁波の保存再生が可能になる。

入射マイクロ波がメタマテリアル中を伝搬しているときに、EIT 現象を消失させることで、電磁波が保存される。そして、一定時間後、EIT 現象を再開させることで保存されていた電磁波が再放射される。図 5 (b) に保存時間が 10ns の場合の電磁波の保存/再生実験の結果を示す。同図の下部に EIT 現象が有効 (ON) であるか、無効 (OFF) であるかを記している。EIT が無効から有効に変わってから電磁波が再放射されている様子が見て取れる。この研究がメタマテリアルを用いた電磁波の保存再生の初めての实証となった。現在のところ、保存時間は短い、構造を工夫することや増幅効果を入れることで保存時間の延長は可能であると考えている。また、高

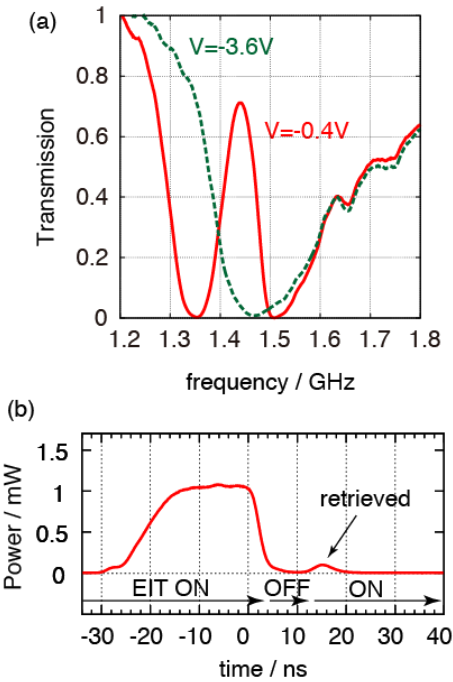


図5 (a)印加電圧と透過スペクトルの関係 (b)電磁波の保存再生の実証実験

周波化も原理的に可能であり、本研究は光メモリといった重要な応用へ向けた重要な一歩であると考えている。

(3) EIT メタマテリアルを用いた非線形現象の高効率化

対象となるメタマテリアルをプリント基板状に1層あたり2個作成し、開放型の同派路の中に設置して、2周波からのサイドバンド生成効率を層数を1層から5層まで変えて測定した(図6)。層数を変えることで、サイドバンド強度は線形以上に増加し、対象となるメタマテリアルが効率よく4光波混合を起こしていることが分かった。理想的には、層数の2乗に比例するはずであるので、さらにEITの透過率を上げることでさらなる高効率化が実現できるのではないかと考えている。また、透過波と反射波を比べることで、

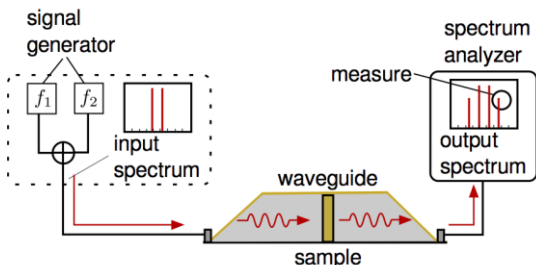


図6 非線形 EIT メタマテリアルから発生するサイドバンド強度の測定

位相整合条件が満たされているかを確認す

ることができる。本研究は、非線形 EIT メタマテリアルの周波数混合への応用の初めての実証例となった。

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9件)

① T. Nakanishi, T. Otani, Y. Tamayama, and M. Kitano, “Storage of electromagnetic waves in a metamaterial that mimics electromagnetically induced transparency,” Phys. Rev. B, **87**, 161110 (2013) DOI: 10.1103/PhysRevB.87.161110, 査読有。

② Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Variable group delay in a metamaterial with field-gradient-induced transparency,” Phys. Rev. B, **85**, 073102 (2012) DOI: 10.1103/PhysRevB.85.073102, 査読有。

③ M. Kitano, Y. Tamayama, and T. Nakanishi, “Coupled-resonator-based metamaterials,” IEICE Electronics Express, **9**, 51–64 (2012) DOI: 10.1587/elex.9.51, 査読有。

④ Y. Tamayama, T. Nakanishi, Y. Wakasa, T. Kanazawa, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Electromagnetic response of a metamaterial with field-gradient-induced transparency,” Phys. Rev. B, **82**, 165130 (2010) DOI: 10.1103/PhysRevB.82.165130, 査読有。

[学会発表] (計32件)

① Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Variable control of group velocity in a metamaterial with field-gradient-induced transparency,” 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 20 April 2012, Paris, France.

② T. Nakanishi, Y. Nakata, Y. Tamayama, and M. Kitano, “Progress in coupled-resonator-based metamaterial,” International Symposium on Frontiers in THz Technology, 20 Nov. 2012, Nara, Japan.

③ Y. Tamayama, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Slow group velocity in a metamaterial with field-gradient-induced transparency,” 1st Korea-Japan Metamaterials Forum, 7 July 2011, Seoul, Korea

[その他]
ホームページ等
<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 正雄 (MASAO KITANO)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：70115830

(2) 研究分担者

中西 俊博 (NAKANISHI TOSHIHIRO)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：30362461