

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05075

研究課題名(和文) 真の電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアルによる電磁波の保存と再生

研究課題名(英文) Storage and retrieval of electromagnetic waves with metamaterials exhibiting true electromagnetically induced transparency effect

研究代表者

中西 俊博 (Nakanishi, Toshihiro)

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：30362461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアルと呼ばれる人工原子系を用いて、伝搬する電磁波を空間中に保存し、任意のタイミングで再伝搬させる方法を研究した。特に、原子系で研究されてきた電磁誘起透明化現象をメタマテリアルで正確に再現することで、電磁波の保存と再生を実現することを最終目標とした。非線形容量素子を導入したメタマテリアルを用いることで、マイクロ波の保存と再生の実験実証に成功した。加えて、電磁誘起透明化現象を光領域で実現する非線形誘電体メタマテリアルを考案し、その動作を電磁界シミュレーションで実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電磁波はこの世で最も速く伝搬するものであり、その特性は情報通信に欠かせないものであるが、電磁波を特定の場所に留めておくことは簡単ではない。電磁誘起透明化現象という物理効果を用いることで、媒質中に電磁波を保存する方法が研究されてきたが、本研究では、メタマテリアルと呼ばれる人工的な媒質を用いて同現象を実現することに初めて成功した。通常の媒質と異なり、メタマテリアルは動作する波長を人工構造の設計によって自在にコントロールすることができるために、電磁波の保存と再生をマイクロ波領域から光領域までの広い領域で実現することが可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：We investigate a method to store propagating electromagnetic waves in an artificial medium called metamaterial and retrieve the stored waves at arbitrary timing. The final goal of this research is to realize storage and retrieval of electromagnetic waves with metamaterials implementing electromagnetically induced transparency, which has been extensively investigated in atomic systems. We experimentally demonstrate the storage and retrieval of microwaves using a metamaterial loaded with nonlinear capacitances. In addition, we propose a nonlinear dielectric metamaterial that implements electromagnetically induced transparency in optical regions and demonstrate the performance in computer simulations.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル 電磁誘起透明化 電磁波の保存と再生 非線形光学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光などの電磁波を空間中に保存し、任意のタイミングで取り出す(再生する)手法として、これまで原子系における電磁誘起透明化現象(EIT 現象)が利用されている。電磁誘起透明化現象とは、非線形光学効果の一種で、図1(a)のように通常不透明な媒質が、同図(b)のようにコントロール光とよばれる制御用の光を入射することで透明化するという現象である。このとき、被測定光(プローブ光)の群速度が著しく低下することが知られている。そして、透明な状態(b)と不透明な状態(a)を切り替えることで、プローブ光を媒質中に保存することができる。

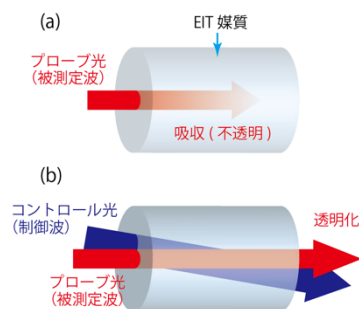


図1 電磁誘起透明化現象

近年メタマテリアル系でも電磁誘起透明化現象に関連した研究が注目されている。メタマテリアルとは、金属や誘電体などで構成される人工的な微小構造の集合体を指し、電磁波に対して媒質のように振る舞うことから、人工的な原子系(または人工媒質)ともよばれる。メタマテリアルには、スケラビリティという性質があり、人工構造の適切な設計によって、マイクロ波帯から光までの広い範囲で同種の現象が実現できる点が大きな特長である。電磁誘起透明化とのアナロジーを有するメタマテリアルはこれまで数多く報告されているが、図1(b)のような透明化後の状態に特徴的な狭帯域透明化現象と低群速度伝搬を実現しているものの、電磁波の入射によって透明化を誘起しているわけではなく本当の意味での電磁誘起透明化現象とはいえないものであった。また、透明化後の状態と不透明な状態と切り替えることができないことが原因で、最も重要な応用である電磁波の保存と再生を実現することができない。それに対して、我々の独自の研究で状態の切り替え可能なメタマテリアルを提案し、電磁波の保存/再生をマイクロ波領域で実証した[1]。しかし、状態の制御として直流電圧をメタマテリアルに印加する方法をとっており、やはり本来の電磁誘起透明化現象とはいえない。加えて、直流電圧を高速に変調することが困難なため、この手法を光領域へ展開することは事実上不可能であった。

以上の状況に対して、制御用の電磁波の入射で被測定波に対する透明化を誘起する本来の意味での電磁誘起透明化をメタマテリアルで実現する方法を提案し、マイクロ波領域での実証実験に成功していたが[2]、電磁波の保存と再生に関しての実証はまだ実現されていなかった。

2. 研究の目的

原子系で広く研究されている電磁誘起透明化現象を、人工原子系であるメタマテリアルを用いて忠実に実現し、電磁波の保存/再生などの応用を実現することを目的とする。マイクロ波帯での実験による検証だけでなく、光領域で電磁誘起透明化現象を実現する方法についても電磁界計算を通じて検討を行う。主な研究項目は次の2つである。

- (1) マイクロ波領域における真の電磁誘起透明化現象を用いた電磁波の保存/再生およびその応用の実験検証
- (2) 光領域において真の電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアルの提案と解析

3. 研究の方法

2で挙げた研究の目的に対して次のような方法で研究を進めた

(1) マイクロ波領域における真の電磁誘起透明化現象を用いた電磁波の保存/再生およびその応用の実験検証

対象とする周波数帯はマイクロ波帯とし、金属パターンと非線形回路素子(ダイオード)からなるメタマテリアルの設計を行う。設計したメタマテリアルを作成し、開放型の導波路内に設置することで、マイクロ波と効率よく相互作用させる。そして、原子系の電磁誘起透明化現象を用いた電磁波の保存/再生と全く同じ手順で、メタマテリアル系でも電磁波の保存/再生を実現できることを実証する。特に、電磁波の位相情報も含めて正確に保存/再生できていることを検証する。次に、非線形光学効果への応用を研究する。非線形光学効果の中でも特に4光波混合に着目し、保存した電磁波と異なる周波数の電磁波を再生波として取り出す方法を検証する。

(2) 光領域において真の電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアルの提案と解析

光領域で真の電磁誘起透明化現象を実現する方法として、非線形分極を有する誘電体ブロックを構成要素とするメタマテリアルを考え、その動作を計算機シミュレーションで検証する。研究は、非線形電磁界計算手法の開発から始める。そして、開発した電磁界計算手法を用いて設計したメタマテリアルの特性を解析する。この電磁界解析では、被測定波の透過率の計算し、電磁誘起透明化現象特有の狭帯域透明化現象が起きているかを検証し、理論モデルからの解析計算と比較を行う。

4. 研究成果

(1) マイクロ波領域における真の電磁誘起透明化現象を用いた電磁波の保存/再生およびその応用の実験検証[3]

本研究では、図 2(a) に示した構造のメタマテリアルを利用した。この構造には、3つの主要な共振モードが存在し、それぞれ異なる共振周波数を持っている。そして、構造内に導入されているダイオードの非線形相互作用により、3つの共振モードが結合するという特徴を持っている。

作成したメタマテリアルを図 2(b) のような実験系で特性を評価した。メタマテリアルは、開放型の導波路内に3つ配置されており、効率良くマイクロ波と相互作用することができる。ただし、メタマテリアル間の相互作用が無視できるだけ間隔を開けて配置している。信号発生器1からは、測定対象のマイクロ波(被測定波)が出力され、信号発生器2からは、電磁誘起透明化現象を誘起する制御用のマイクロ波(制御波)が出力される。これらを、合波し、開放型導波路に導入することで、メタマテリアルと相互作用させる。出力されたマイクロ波は、フィルタによって被測定波のみを選別し、透過波として測定される。

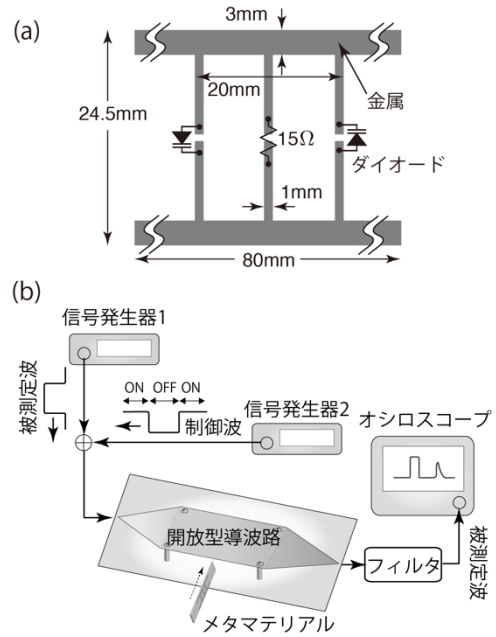


図 2 (a)メタマテリアルの構造 (b) 実験系

図 3(a) が実験で測定されたメタマテリアルの透過率であり、点線で制御波のない場合、実線で制御波が入射されている場合を示している。制御波がないときに 1.05GHz 付近で透過率が広帯域で低下している。そして、制御波の入力によって、狭帯域の透過帯が表れていることが分かる。ここでは一例を示したが、制御波の周波数を変えることで、透過帯の位置を変えることができ、パワーを変えることで透過帯域を広域化することができる。これらの特性は、原子系の電磁誘起透明化現象と全く同一であり、このメタマテリアルが原子系の電磁誘起透明化現象と物理的に等価な特性を持っていることを意味している。

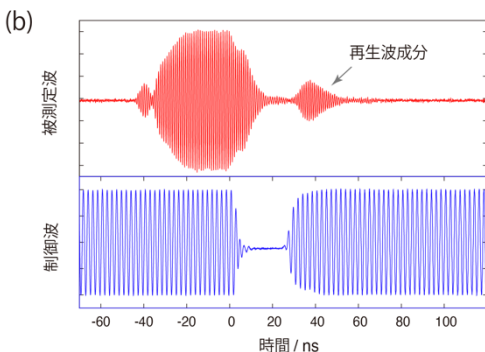
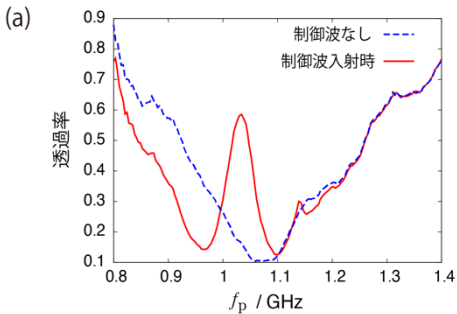


図 3 (a) 透過率 (b) 電磁波の保存/再生実験

していることを示している。そして、制御波が再入射される $t=30\text{ns}$ の瞬間から被測定波が再び出力されていることが分かる。これは、制御波の再入力による電磁誘起透明化現象により保存されていた被測定波が再生され、外部に出力されていることを意味している。ここでは示していないが、制御波の再入射のタイミングを変えることで、被測定波の再生のタイミングを任意に変えることができる。

この実験では、被測定波の一部の保存しか実現されていないが、メタマテリアルの長さ(単位構

このメタマテリアルを用いて、電磁波の保存/再生実験を行った。手順は、原子系の電磁誘起透明化現象を用いた光の保存/再生の手順と全く同じである。まず、制御波が導入されている状態で、被測定波を入射し、電磁誘起透明化現象により透明化した状態を用意する。そして、被測定波がメタマテリアル中を伝搬している最中に制御波を止めることで、被測定波がメタマテリアル中に保存される。そして、再び制御波を再入力することで、被測定波が再度メタマテリアル中を伝搬し、再生波として外部にとり出される。

以上の手順に従って電磁波の保存と再生を実証したときの測定波形を図 3(b) に示す。上部が、被測定波の出力信号で、下部が制御波の出力信号である。まず、制御波に着目すると、最初制御波が入射された状態から、時間 $t=0$ に一旦制御波がなくなり、一定時間後(ここでは $t=30\text{ns}$ あたり)に制御波が再入力されている。これは、上述した電磁波の保存/再生の手順そのものである。次に、被測定波の出力をみる。 $t<0$ の領域に観測される信号は、制御波の入力によって電磁誘起透明化現象が起こり、低群速度でメタマテリアル中を伝搬した電磁波が、メタマテリアルを通り抜け検出された成分であり、この部分は保存された成分ではない。次に、制御波の入射がなくなる $0<t<30\text{ns}$ の間は、被測定波がほとんど出力されていないことが分かる。これは、メタマテリアル中に被測定波が保存され

造の数)を増加することで原理的にパルス全体を保存することも可能である。また、再生波は前方に強く放射され、後方への伝搬は抑えられていることも確認している。これは、メタマテリアルが電磁波の位相情報も保存していることを意味している。さらに、電磁波の保存/再生の発展として、保存した電磁波の位相や、周波数を変化させる実験も行った。保存時と再生時で制御波の位相を変化させることで、再生波の位相を制御することや、保存と再生時で制御波の周波数を変化させることで、再生波の周波数を制御することにも成功した。

以上の成果は、人工原子系であるメタマテリアルを用いて、原子系の電磁誘起透明化現象の応用を正確に実現できたことになる。適用波長が原子種によって決まる原子系と異なり、本手法は適用波長に合わせてメタマテリアルを自在に設計できることが最大の特長である。

(2) 光領域において真の電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアルの提案と解析

メタマテリアルの構成要素として金属がしばしば使われるが、光領域では損失が多いという問題がある。そこで、光領域でも損失の少ない誘電体を用いたメタマテリアル(誘電体メタマテリアル)を用いて、電磁誘起透明化現象を実現する方法について研究を行った。

本研究では、誘電体ブロック内の電氣的ミラー共鳴を利用する。誘電体ブロックが図4のように周期的に並んでいると、共振器間の相互作用のために、電場の振動方向によってミラー共鳴の共振周波数が違う値を示す。このとき共振電場の振動方向によって共振のQ値は大きく異なり、図中のモード1では小さな値、モード2では大きな値を取る。この性質と、非線形効果による共振器間結合を利用することで電磁誘起透明化現象を実現できる。

この独自のアイデアに基づき、電磁界シミュレーションで動作検証を行った。解析ソフトには、COMSOL Multiphysicsを用い、時間領域でプローブ光とコントロール光からなる電磁界と誘電体の非線形相互作用を計算することで、コントロール光入射時の、プローブ光の振幅透過率を導出した。図5が解析によって得られたプローブ光の透過率である。凡例に、それぞれのコントロール光の電場振幅を表している。コントロール光の増大に従って、電磁誘起透明化由来の狭帯域透明化現象が顕著に表れてくることが分かる。

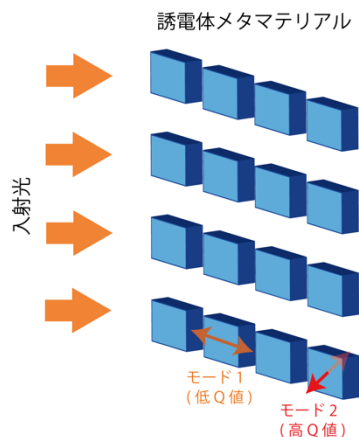


図4 電磁誘起透明化を実現する誘電体メタマテリアル

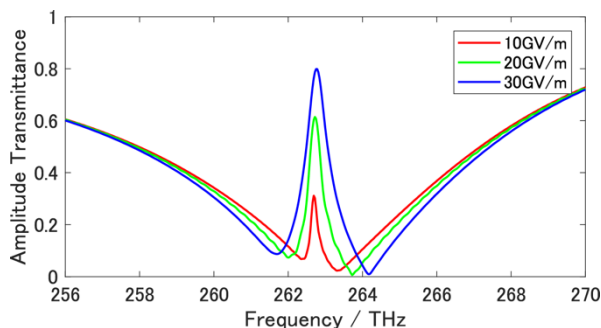


図5 プローブ光の振幅透過スペクトル

このような、光領域において真の電磁誘起透明化を実現するメタマテリアルの提案は、他に報告はなく本研究の大きな成果といえる。ただし、必要となるコントロール光強度は非常に大きく、実験的な実現は困難なものと思われる。しかし、非線形効果で共振器結合を利用するというアイデアは、他の共振構造においても適用可能であり、構造や共振モードの最適化によって、必要となるコントロール光強度は実現可能なレベルまで抑えることができると期待している。

引用文献

- [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).
- [2] T. Nakanishi and M. Kitano, "Implementation of Electromagnetically Induced Transparency in a Metamaterial Controlled with Auxiliary Waves," *Phys. Rev. Appl.* **4**, 024013 (2015).
- [3] T. Nakanishi and M. Kitano, "Storage and retrieval of electromagnetic waves using electromagnetically induced transparency in a nonlinear metamaterial," *Appl. Phys. Lett.* **112**, 201905 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 中西俊博	4. 巻 30
2. 論文標題 真の電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアルによる電磁波の保存と再生	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 14-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yosuke Nakata, Kai Fukawa, Toshihiro Nakanishi, Yoshiro Urade, Kunio Okimura, Fumiaki Miyamaru	4. 巻 11
2. 論文標題 Reconfigurable Terahertz Quarter-Wave Plate for Helicity Switching Based on Babinet Inversion of an Anisotropic Checkerboard Metasurface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 44008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.11.044008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yosuke Nakata, Yoshiro Urade, Toshihiro Nakanishi	4. 巻 11
2. 論文標題 Geometric Structure behind Duality and Manifestation of Self-Duality from Electrical Circuits to Metamaterials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 1336
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym11111336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuhisa Ogawa, Osamu Yasuhiko, Hirokazu Kobayashi, Toshihiro Nakanishi, Akihisa Tomita	4. 巻 21
2. 論文標題 A framework for measuring weak values without weak interactions and its diagrammatic representation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 043013 ~ 043013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab0773	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toshihiro Nakanishi and Masao Kitano	4. 巻 112
2. 論文標題 Storage and retrieval of electromagnetic waves using electromagnetically induced transparency in a nonlinear metamaterial	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 201905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5035442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中西 俊博	4. 巻 69
2. 論文標題 EITメタマテリアルを用いた電磁波の保存・再生	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 877-883
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Toshihiro Nakanishi, Yosuke Nakata, Yoshiro Urade, Kunio Okimura
2. 発表標題 Broadband Helicity Switching for Terahertz Waves Using Anisotropically Deformed Checkerboard Metasurface with Vanadium Dioxide
3. 学会等名 13th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Nakanishi
2. 発表標題 Electromagnetically Induced Transparency Using Nonlinear Metamaterials for Storage of Electromagnetic Waves
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Storage and Retrieval of Electromagnetic Waves with Metamaterial Analog of Electromagnetically Induced Transparency
2. 発表標題 Toshihiro Nakanishi
3. 学会等名 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 太田裕士, 中西俊博, 北野正雄
2. 発表標題 3光波混合を用いた非線形誘電体メタマテリアルにおける電磁誘起透明化現象
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshihiro Nakanishi, Shinji Tohi, and Masao Kitano
2. 発表標題 Control of electromagnetically-induced-transparency-like effect in metamaterials for coherent storage of electromagnetic waves
3. 学会等名 The 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西俊博
2. 発表標題 量子系と結合共振器系のアナロジー
3. 学会等名 NAIST異分野融合ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keisuke Hieda, Toshihiro Nakanishi, and Masao Kitano
2. 発表標題 Slow Propagation of Spoof Surface Plasmon Polariton Excited on Metallic Lieb Lattice
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西俊博, 北野正雄
2. 発表標題 動的変調メタマテリアルを用いた電磁波の保存と再生
3. 学会等名 輻射科学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Toshihiro Nakanishi, Masao Kitano (Editor: Kazuaki Sakoda)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 280 (169-185)
3. 書名 Electromagnetic Metamaterials	

1. 著者名 Toshihiro Nakanishi, Masao Kitano (Editors: Eugene Kamenetskii, Almas Sadreev, Andrey Miroschnichenko)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer Nature	5. 総ページ数 582 (137-156)
3. 書名 Fano Resonances in Optics and Microwaves	

〔産業財産権〕

〔その他〕

量子電磁工学研究室ホームページ/メタマテリアル
<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.php?id=25>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----