

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05360

研究課題名(和文) BIC状態の動的変調により電磁波保存を実現するメタマテリアル

研究課題名(英文) Electromagnetic-wave storage in a metamaterial by dynamic modulation of BIC states

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアルと呼ばれる人工媒質に電磁波を保存する方法として、BIC状態(Bound states In the Continuum状態)を動的に変調する手法を考案した。設計したメタマテリアルが、非BIC状態からBIC状態になることで電磁波を保存し、再び非BIC状態にすることで保存されていた電磁波が伝搬波として再生されることを電磁界解析を用いて示した。また、直流モードと呼ばれる予想していなかった保存形態でもエネルギーが保存されていることが明らかになった。加えて、二酸化バナジウムを導入したメタマテリアルのテラヘルツ応答を計測し、準動的にBIC状態を切り替えが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタマテリアルと呼ばれる人工媒質の研究は、設計の自由度を広げながら進展を遂げてきたが、時間変化の自由度を付与した時変メタマテリアルの研究は近年特に注目を集めている。本研究は静的な特性が研究されていたBIC状態に時変性を付与することで、電磁波の保存と再生という応用を実現するもので、時変メタマテリアルの新たな可能性を広げたといえる。更に研究の中で、予想していなかった直流モードと呼ばれるモードが保存に関係していることが分かった。これにより、直流モードは導電率を急変化させたときに普遍的に表れる物理現象であることが明らかになり、メタマテリアルだけではなく、電磁波制御の新たな可能性を示したといえる。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a method to store and retrieve electromagnetic waves in artificial media, called metamaterials, by dynamically modulating BIC (Bound states In the Continuum) states. In electromagnetic simulations, we have shown that the energy of propagating electromagnetic waves is captured in a metamaterial in the transition from a non-BIC state to a BIC state, and the stored energy is released into the free space when the state is turned back to the non-BIC state. We have also revealed that a part of the energy is stored in an unexpected mode, called DC mode. In addition, we have estimated terahertz response of a fabricated metamaterial integrated with vanadium dioxide and shown that the BIC states can be semi-dynamically controlled.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル BIC状態 電磁波の保存 時変メタマテリアル

### 1. 研究開始当初の背景

メタマテリアルと呼ばれる人工媒質の研究が設計の自由度を広げながら発展を遂げていたが、その中で、メタマテリアルに時間変化の特性を付与した時変メタマテリアルの研究が近年急速に進展している。研究代表者も、原子系の電磁誘起透明化と呼ばれる現象をメタマテリアルで実現し、その特性を時間変化させることで電磁波の保存と再生を実現していた。このメタマテリアルでは、2つの共振構造の結合を時間的に変化させることで電磁波の保存と再生を可能にしている。この動作原理を研究する中、電磁誘起透明化現象を用いる必然性はなく、より単純な構造をもつメタマテリアルでも電磁波の保存と再生が可能ではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

電磁波の保存と再生を電磁誘起透明化現象とは異なる原理で実現する方法として、BIC 状態 (Bound states In the Continuum 状態) を利用する方法を提案する。メタマテリアル構造中に時間的に導電率変調可能な要素を導入することで、伝搬電磁波と結合した非 BIC 状態と結合のない BIC 状態を切り替え、電磁波の保存と再生を実現することを目的とする。また、保存と再生の効率を最大化する条件を調べ、その物理的メカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、補対型のスプリットリング共振器をメタマテリアルの基本要素として用いる。スプリットリング共振器が対称性をもたない場合、非 BIC 状態と呼ばれる伝搬電磁波と結合した状態が実現される。そして、対称性をもつ場合は BIC 状態と呼ばれる伝搬電磁波と結合のない状態になる。したがって、初期状態として非 BIC 状態を実現し、あるタイミングで BIC 状態にすることで、メタマテリアル中に電磁波が保存される。保存した電磁波のエネルギーは再び非 BIC 状態にすることで、伝搬電磁波として再生される。以上の動作原理を、電磁界シミュレーションで検証し、実際に電磁波の保存と再生が可能であるかどうか、そしてどのような条件で保存/再生効率を最大化できるかを考察する。また、実験的な検証を想定し、同構造をテラヘルツ領域で実現するために、二酸化バナジウムを導入した動的メタマテリアルを作成し、テラヘルツ分光によってその特性を測定する。

### 4. 研究成果

#### (1) BIC 現象の動的変調による電磁波の保存と再生に関する電磁界解析

本研究では、BIC 変調を実現する方法として、図 1(a) のような補対型スプリットリング共振器と呼ばれる金属構造を周期的に配置した 2 次元のメタマテリアル(メタ表面)を考案した。設計パラメータは、 $p = 280\mu\text{m}$ 、 $q = 140\mu\text{m}$ 、 $a = 80\mu\text{m}$ 、 $b = 120\mu\text{m}$ 、 $c = 8\mu\text{m}$ 、 $g = 4\mu\text{m}$  とし、 $w$  は可変パラメータとした。入射偏光は水平偏光とし、理想状態を考えるため金属は厚さ 0 の完全金属を仮定した。

まず、3次元電磁界シミュレーションを用いて、そのパワー透過率を計算した。計算結果を図 2 に示す。 $w = 0$  の場合には、ほぼ透過率は 0 である。これは、メタマテリアル内の共振状態が電磁波と結合しないことを意味しており、BIC 状態の特徴を表している。一方、 $w \neq 0$  の場合には、透過率がある帯域で上昇する。これは、BIC 状態が崩れる(非 BIC 状態)ことによって伝搬電磁波との結合が生まれ、メタマテリアルの共振状態が誘起された結果、その再放射として透過率が上昇することを意味している。BIC 状態は構造が対称である場合に表れ、対称性を崩すほど電磁波との結合が強まることが知られている。提

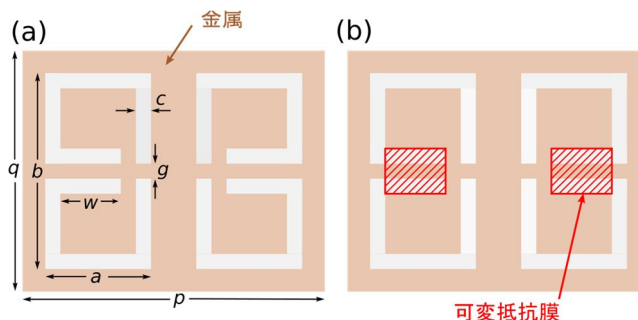


図 1 (a) 単位構造 (b) 可変抵抗膜を導入した単位構造

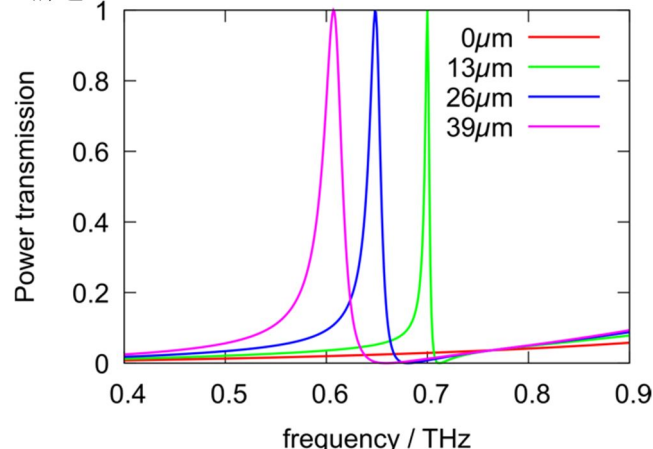


図 2 パワー透過率

案したメタマテリアルについても構造が対称な場合( $w = 0$ )に BIC 状態が実現されており、 $w$ を増やして対称性を崩すほど電磁波との結合が強くなり、共振線幅が広がっていることが確認できる。

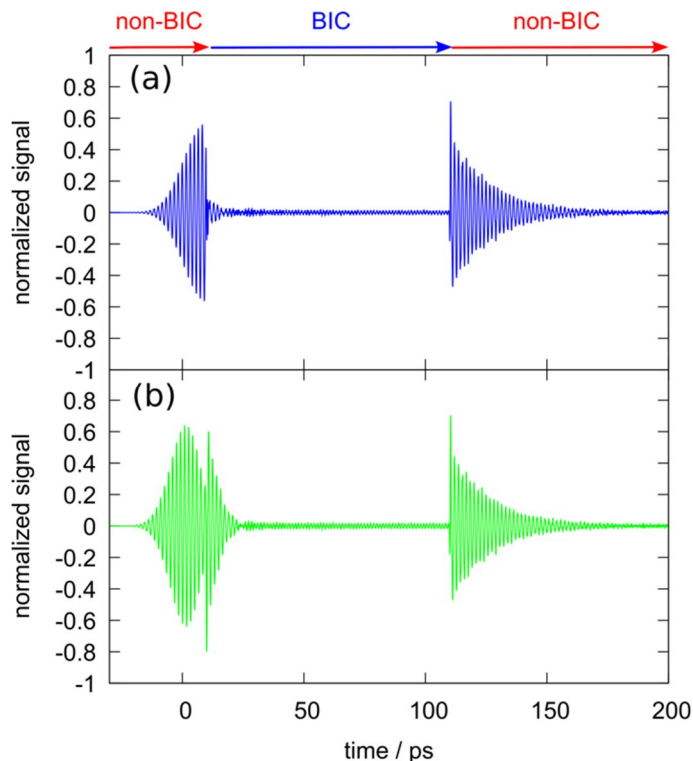


図 3 電磁波の保存と再生のデモンストレーション (a) 透過波 (b) 反射波

反射波形を表し、上部にメタマテリアルの状態(非 BIC 状態/BIC 状態)の遷移を記している。入力波は中心周波数 0.607THz、パルス幅 10ns のガウシアンパルスとした。メタマテリアルの状態が非 BIC 状態から BIC 状態に 0.01ps の遷移時間で遷移した後に、透過波、反射波共に信号が減少し、ほぼ 0 になることが確認できる。これは、電磁波がメタマテリアル中に保存され、蓄積された電磁エネルギーは外部に放出されなくなったことを意味する。そして、非 BIC 状態に戻すと、透過波と反射波としての信号が検出されることが分かる。これは、メタマテリアルと伝搬電磁波の結合が復活し、保存されていたエネルギーがメタマテリアルから再放射され、再生波として伝搬したということを示している。1 層のメタマテリアルを計算したため、再生波の放射は両面に発生し、透過波と反射波が全く同じ信号であることも確認できる。

以上のように電磁波の保存と再生は想定通り BIC 状態の変調によって可能であることが示された。一方、電磁波の保存効率に関して研究を深める中で、予想外の物理現象が保存と再生過程に深く関係していることが明らかになった。それは、メタマテリアル周辺の磁場を解析することで明らかになった。図 4 にメタマテリアル上のある点での磁場を示す。点線が、保存の開始、再生の開始時刻を表している。つまり、2 つの点線間ではメタマテリアルは BIC 状態にあり、電磁波は保存されていることになる。磁場は振動していることが分かるが、振動は

0 中心ではなく、直流成分があることが分かる。詳細は割愛するが、この直流モードを考慮することにより、電磁波の保存と再生に最適なタイミングを決定することができる。解析の結果、最適な条件は、保存時も再生時も磁場が最大になる瞬間に BIC 状態を変調することであることが分かった。これは、金属部に流れる電流と金属境界に蓄積される電荷による共振状態にエネルギー

以上の結果をもとに電磁波の保存と再生を数値計算で検証した。電磁波の保存と再生には、BIC 状態の切り替えが必要になる。 $w = 39\mu\text{m}$ の状態を非 BIC 状態として利用し、 $w = 0\mu\text{m}$ の状態を BIC 状態として利用した。計算では、図 1(b)のように可変抵抗膜を導入した。可変抵抗膜が絶縁体として振る舞うとき非 BIC 状態が実現され、可変抵抗膜が金属として振る舞うときに BIC 状態が実現される。

電磁波の保存と再生は 3 つの手順に分けられる。(i)初期状態を非 BIC 状態として、電磁波を入射すると、エネルギーは結合によってメタマテリアルへ蓄積される。蓄積されたエネルギーは時間を経て再度自由空間に放射される。(ii)状態を BIC 状態へ変化させることで、メタマテリアルと伝搬電磁波の結合がなくなり、蓄積された電磁エネルギーは放出されなくなる。(iii)再び非 BIC 状態に戻すことで、メタマテリアルと伝搬電磁波の結合が復活し、保存されていたエネルギーがメタマテリアルから再放射される。

電磁界シミュレーションで計算した結果を図 3 に示す。(a)が透過波形、(b)が

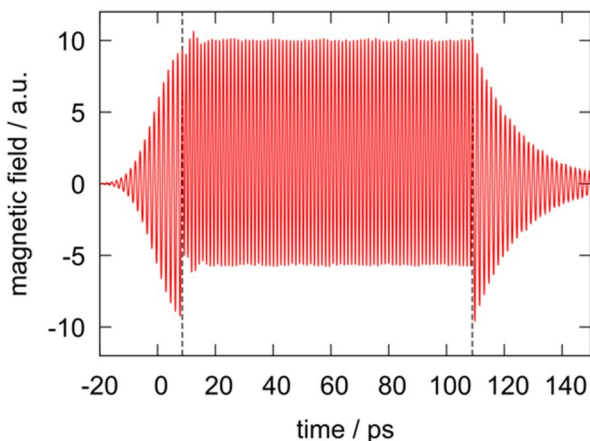


図 4 磁場の振動に表れる直流モード



ーが蓄積されており、磁場が最大になるときは、電流が最大で蓄積電荷は0に近いために、この瞬間に金属化することでエネルギーが失われることなく、新しい共振状態へ無駄なく移行するからである。この方針に基づき電磁波の保存と再生のタイミングをそれぞれ最適化した結果、1層のメタマテリアルにおいて約35%のエネルギーを保存/再生できることが分かった。このように、当初予期していなかった直流モードは、この研究の直前に別の物理系で発見している[1]。研究の目的としては大きく異なるが、どちらも導電率の時間変調によって直流モードが発生するという共通点があり、時変系で生じる普遍的な物理現象であることが本研究で明らかになった。

## (2) 二酸化バナジウムを導入したメタマテリアルによる BIC 現象の変調の実証

BIC 状態を変調できるメタマテリアルとして、図1(a)(b)とほぼ同じ構造をサファイア基板に作成した。可変抵抗膜としては、65度付近で絶縁金属間相転移を起こす二酸化バナジウムを利用した。二酸化バナジウムをメタマテリアルに導入することで動的にメタマテリアルの性質を変化させる研究に関しては、他の研究でも利用しており[2,3]、品質の良い二酸化バナジウム膜をc軸サファイア基板に作成できるようになっている。

作成の手順は以下の通りである。まず、サファイア基板にバナジウムをターゲットとした反応性スパッタリングで二酸化バナジウムを2時間かけて成膜した。そして、二酸化バナジウム膜に対して、酸によるエッチングで構造を作成した。その後、金200nm/チタン10nmからなる構造をリフトオフ手法で作成した。図5に作成したメタマテリアルの顕微鏡写真を示す。(設計パラメータは、(1)の場合と異なる。) サンプルの作成は、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点で行った。

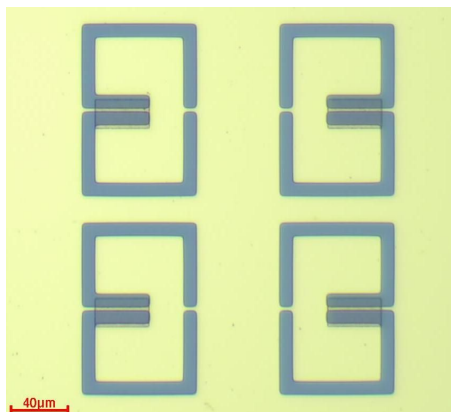


図5 作成した動的 BIC メタマテリアルの顕微鏡写真

測定にはテラヘルツ時間領域分光法を利用した。テラヘルツを通す穴の空いた金属板上にメタマテリアルを作成したサファイア基板をのせ、金属板の温度を変えながらテラヘルツ波の透過率の測定を行った。金属板の温度が21度のとくと105度のときの測定結果を図6に示す。低温のときには、0.52THz付近で透過率が上昇していることが確認できる。このときは、二酸化バナジウムが絶縁体であり、メタマテリアルの構造は非対称であるために非BIC状態となり、共振状態が誘起され狭帯域の透過を示している。

一方高温のときにはこのような共振は確認できない。これは、二酸化バナジウムが金属化することで構造が対称になった結果、BIC状態が実現され、共振状態が誘起できなくなったといえる。以上のことは、理論及び数値解析における予測通りの結果であり、実験においてBIC状態の動的変調を実証できたといえる。しかし、低温時の最大透過率は0.15以下と低い値を示しており、電磁波の保存と再生の実験検証においてはさらなる損失の低下を実現する必要があることも分かった。

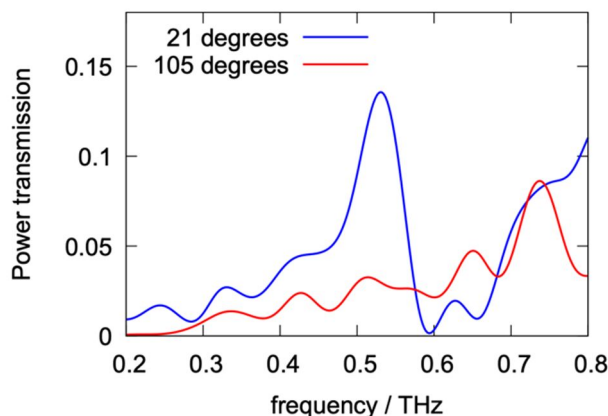


図6 透過率の測定結果

## 参考文献

- [1] F. Miyamaru, C. Mizuo, T. Nakanishi, Y. Nakata, K. Hasebe, S. Nagase, Y. Matsubara, Y. Goto, J. Pérez-Urquizo, J. Madéo, and K. M. Dani, Phys. Rev. Lett. **127**, (2021) 053902.
- [2] T. Nakanishi, Y. Nakata, Y. Urade, and K. Okimura, Appl. Phys. Lett. **117** (2020) 091102.
- [3] M. Kobachi, F. Miyamaru, T. Nakanishi, K. Okimura, A. Sanada, and Y. Nakata, Adv. Opt. Mater. (2021) 2101615.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Miyamaru Fumiaki, Mizuo Chihiro, Nakanishi Toshihiro, Nakata Yosuke, Hasebe Kakeru, Nagase Shintaro, Matsubara Yu, Goto Yusuke, Perez-Urquizo Joel, Mad'ou Julien, Dani Keshav M.	4. 巻 127
2. 論文標題 Ultrafast Frequency-Shift Dynamics at Temporal Boundary Induced by Structural-Dispersion Switching of Waveguides	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 53902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.127.053902	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 Kobachi Mitsuki, Miyamaru Fumiaki, Nakanishi Toshihiro, Okimura Kunio, Sanada Atsushi, Nakata Yosuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Dynamic Quarter Wave Metasurface for Efficient Helicity Inversion of Polarization Beyond the Single Layer Conversion Limit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2101615 ~ 2101615
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adom.202101615	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 Nakanishi Toshihiro, Nakata Yosuke, Urade Yoshiro, Okimura Kunio	4. 巻 117
2. 論文標題 Broadband operation of active terahertz quarter-wave plate achieved with vanadium-dioxide-based metasurface switchable by current injection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 091102 ~ 091102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0019265	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中西 俊博
2. 発表標題 BIC状態の動的変調によるメタマテリアルへの電磁波の保存と再生
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中西 俊博、中田 陽介、浦出 芳郎
2. 発表標題 二酸化バナジウムを用いた動的メタマテリアルのテラヘルツ領域での光学素子応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西 俊博
2. 発表標題 2次元メタマテリアルを用いたテラヘルツ波制御
3. 学会等名 第8回電子デバイスフォーラム京都（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshihiro Nakanishi、Yosuke Nakata、Yoshiro Urade、Kunio Okimura
2. 発表標題 Dynamic Control of Terahertz Polarization Based on Babinet Inversion of Anisotropic Metasurfaces with Vanadium Dioxide
3. 学会等名 The 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻量子電磁工学研究室ホームページ  
[http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/hp/?page\\_id=100](http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/hp/?page_id=100)

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------