

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790065

研究課題名(和文)メタマテリアル表面に励起されるプラズモンの速度制御

研究課題名(英文)Velocity control of surface plasmon excited on a two-dimensional metamaterial

## 研究代表者

中西 俊博(Toshihiro, Nakanishi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30362461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：平面金属構造を工夫することで、構造上を伝搬する表面プラズモンの速度を制御することができる。本研究では、特に全方向で表面プラズモンの伝搬が停止するフラットバンドというバンド構造に着目し、全波数領域でのフラットバンドを実現する金属構造を提案すると共に、テラヘルツ領域での実験検証を行った。平面波の透過測定による実験結果と、全反射減衰分光法を用いた実験の結果を総合することで、広い波数領域で表面プラズモンがフラットバンドを形成することを実証した。そして、電磁界シミュレーションによって、同構造上の表面プラズモンの伝搬の時間発展を計算することで、フラットバンド起因の超低速伝搬の様子を確認した。

研究成果の概要(英文)：It is possible to control the velocity of surface plasmon propagating on a structured metallic surface by designing the two-dimensional structure. In this project, we focused on a flat band, where the surface plasmon is completely localized. We proposed a metallic structure to realize the flat band for all wavevectors, and performed experimental demonstration in terahertz regions. The formation of the flat band was verified by the transmission measurement of the plane wave and an attenuated total reflection method. In addition, the extremely slow propagation of the surface plasmon unique to the flat band was demonstrated through electromagnetic simulation by computing the time evolution of the surface plasmon on the structured metallic surface.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル 表面プラズモン 群速度 フラットバンド テラヘルツ波

1. 研究開始当初の背景

固体中の電子のバンド構造に関して、周波数依存性がないバンド(フラットバンド)が物性物理の分野で注目されていた。この電磁アナロジーである、電磁波に対するフラットバンドもフォトニック結晶などで実現されており、我々も金属構造上に生じる擬似表面プラズモンにおいて、特定の対称性をもつ格子構造で、分散関係が周波数無依存になるフラットバンド現象が実現できることを平面波の透過測定で明らかにしていた。しかし、透過測定で得られる分散関係は光円錐の上部に限定されるために、全ての波数領域でフラットバンド現象を実証したとはいえない状況であった。また、フラットバンド上の励振波の最大の特徴である低群速度伝搬を時間領域で直接観察することもできていなかった。

2. 研究の目的

本研究の主要課題は、金属構造上の擬似表面プラズモンに対して、全ての波数領域でフラットバンドをテラヘルツ領域で実現することと、時間領域での表面プラズモン伝搬の低速度伝搬を解析することである。そのために、金属構造上の表面プラズモンの伝搬に関する回路モデルを構築する必要がある。また、測定に適した金属構造とその対称性に関して考察する。そして、光円錐下部の分散関係の取得のために必要なエバネッセント波を用いた分光法の開発を行う。加えて、時間領域解析結果と周波数領域からの結果を総合して、フラットバンド上の表面波伝搬に関する多方面からの解析を行う。

3. 研究の方法

はじめに、金属ディスクと金属線からなる格子構造に関して、電磁界シミュレーションで固有モードの分散関係を計算し、どのような対称性をもつ金属構造がフラットバンドの観測に適しているかを解析する。それと同時に、テラヘルツ波領域でフラットバンドが測定可能な金属構造の設計を行う。また、理論的な研究として、同構造の回路モデルを構築し、回路方程式からフラットバンドを導出する。

テラヘルツ領域での実験検証のために、時間領域分光法の開発を行う。実験において、光円錐より上部の低波数領域のバンド構造の励振には通常の平面波を利用し、光円錐より下部の高波数領域の励振にはエバネッセント波を利用する。特に後者においては、シリコンプリズムに全反射角以上の入射角をもってテラヘルツ波を入射したときに生じるエバネッセント波を利用し、反射波の測定によりバンド構造の取得を実現する。

金属表面上の表面波プラズモンに関する低速度伝搬の時間領域解析においては、CST Microwave Studio の時間領域解析を利用する。金属ディスク構造の上部に局所励振用のアンテナを配置し、インパルス的に電荷を誘起したときの電荷振動の時間発展を解析する。解

析では、格子の各点での電荷振動を取得することで、波数ごとの固有振動数を求めることができ、分散関係を導出することができる。これを、周波数領域での解析結果と比較し、両者の整合性を確認する。

4. 研究成果

(1) 金属リーブ格子上の擬似表面プラズモンにおけるフラットバンドの観測

固体物理の分野で、電子のバンド構造が平坦になったとき様々な特異な現象がおこることが注目されている。この平坦なバンドはフラットバンドと呼ばれている。我々は、この電磁アナロジーとして、金属構造上の擬似表面プラズモンに対して、フラットバンドが存在することを確認していた。そこでは、カゴメ格子と呼ばれる構造を利用し、平面波の透過測定によりバンド構造の解析を行っていた。しかし、この方法で得られるバンド構造は、平面波と直接結合できる光円錐より上部に限定されるために、全ての波数領域でフラットバンドを観察したわけではない。そこで、本研究ではリーブ格子を形成する金属構造に対する、全波数領域でのフラットバンドの実験的実証を目標とする。特に、光円錐の下部では、表面波は平面波と結合しないので、完全に表面に局在した本当の意味での表面波と考えることができる。

擬似表面プラズモンの分散関係は、金属構造の対称性によって特徴づけられる。我々は、固体物理のフラットバンドでも注目されているリーブ格子に着目し、図 1(a)のような金属ディスクと金属棒からなる 2 次元金属構造を解析した。金属ディスクをキャパシタンス、金属棒をインダクタンスとする回路モデルを用いて、構造上に励振される電荷振動の固有モードと固有周波数を解析的に計算した。これ

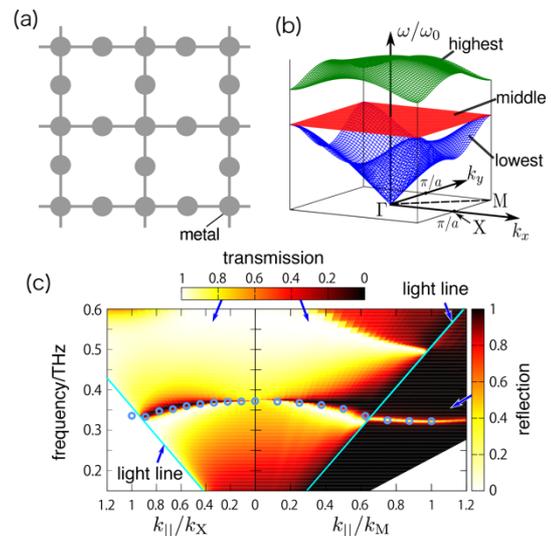


図 1 (a) リーブ格子型金属ディスク-金属棒構造 (b) 回路モデルから計算されるバンド構造 (c) シミュレーション結果

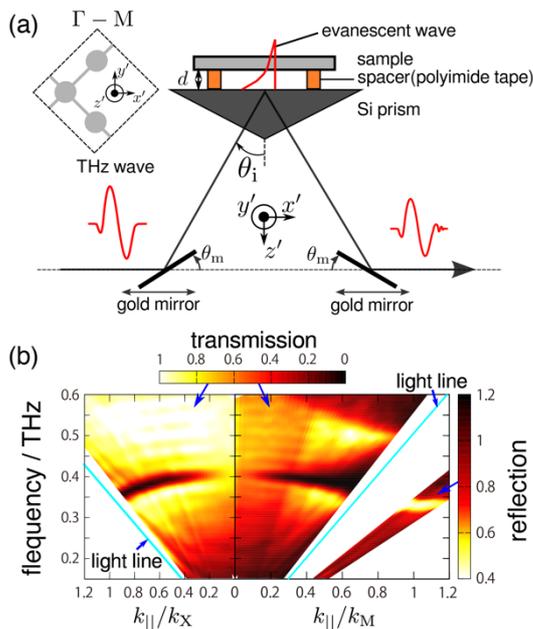


図2 (a) 全反射減衰分光系 (b) 実験結果により導出されるバンド構造を図1(b)に示す。3つバンドが形成されていることが分かるが、中央のバンドが波数によらないフラットバンドであることが分かる。

光円錐上部の低波数のフラットバンドは平面波を使って直接励振することが可能で、透過率を測定することでバンド構造を推定することができる。一方、光円錐下部のフラットバンドはエバネセント波で励振する必要がある。そのために、図2(a)のような全反射減衰分光系を利用した。シリコンプリズムに全反射角以上の入射角で平面波を入射し、プリズムで反射される成分を検出する。プリズムの極近傍には全反射によるエバネセント波が形成されており、ここに金属構造を設置することで、光円錐下部の高波数領域の表面プラズモンを励振することができる。

実験の前にまず、電磁界シミュレーションで通常の透過測定の透過率と、全反射減衰分光における反射率を計算した。結果は図1(c)の通りである。入射方向によって規定される波数は、 $\Gamma$ 点を起点に、M点方向とX点方向に変化させている。これに、固有モード解析から得られた固有振動数を丸で重ねてプロットしている。光円錐の上部では、透過測定の透過率の変化の境界に固有モードが位置していることが分かる。これは、今回の研究には直接は関係しない広い共振モードの中にフラットバンド起因の狭い共振モードが埋め込まれることでこのような振る舞いを示す。一方、光円錐の下部においては、全反射減衰分光における反射率が低下している部分で固有モードが励振されていることになる。これらの固有振動数に着目すると、広い範囲でおおむね平坦な特性を示しており、フラットバンドを形成していることが分かる。固有振動に対応する電磁場分布からもこれらのモードがフラットバンド特有の振動モードが形成されていること

を確認している。

実験は、テラヘルツ波時間領域分光法を用いて実施した。実験結果を、図2(b)に示す。実験の制約上入射角に限界があるので、取得できない範囲があるが、それを除くと電磁界シミュレーションの結果図1(c)と良い一致を示していることが分かる。

これらの研究成果に関しては、論文[Phys. Rev. B, 93, 075126 (2016)]に掲載されている。

## (2) 金属リブ格子の擬似表面プラズモン伝搬の時間領域解析

フラットバンドは分散関係が波数によらないために、全方向で群速度が0になるという特徴がある。つまり、局所励振した場合に波束は広がらずに励振点で留まるはずである。このフラットバンド最大の特徴を電磁界シミュレーションで実証した。

電磁界解析には、有限積分法をベースとした解析ソフト CST MW Studio の時間領域ソルバを利用した。図1(a)のようなリブ格子と呼ばれる金属構造のある一点の電荷を、ごく近傍に設置した小型双極子アンテナでインパルス励起する。このとき表面に形成される表面波プラズモンの伝搬を電荷振動の時間発展を計算することで可視化する。ここでは、解析が容易な1次元モデルを用いて計算した結果を図3に示す。この1次元モデルは、2次元格子のM点方向の伝搬を正確に記述する。赤色が正の電荷が蓄積している部分で、青色が負の電荷が蓄積している部分である。中央に励振点があり、時間発展と共に広がって行く様子が分かる。フラットバンドの固有モードは、副格子と呼ばれる2つの格子(金属ディスク)と結合している格子点で逆位相の電荷振動をすることが特徴である。このような、逆位相の振動は時間発展してもあまり広がらずに励振点近傍で局在していることが分かる。これは、フラットバンドの性質である群速度が低下している直接的な証拠となる。一方、副格子間で同相の電荷振動している成分は、時間発展と共に中央から広がって伝搬していることが分かる。これは、フラットバンド以外のバンドに属する表面波プラズモンの伝搬に対応する。

さらに、格子の各点での振動を解析するこ

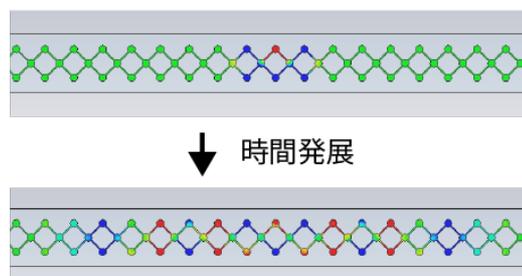


図3 表面波プラズモン伝搬の時間発展。青色、赤色はそれぞれ正電荷、負電荷を示す

とで、分散関係を導出することも可能で、その結果は、周波数領域での固有モード解析の解と良い一致を示すことも確認している。

### (3) その他の研究

フラットバンドとは直接は関係しないが、群速度の制御や周波数依存性などに関連して進展した研究を以下に挙げる。

#### ① 電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアル

フラットバンド以外に群速度を制御する方法として、メタマテリアルを用いた電磁誘起透明化現象(EIT現象)の模擬がある。EIT現象とは元々原子系で研究されてきた現象で、補助的な電磁波の入射により、本来不透明な媒質が狭帯域で透明化する現象である。透明化帯域では、電磁波の群速度が著しく遅くなる。近年、このメタマテリアルアナロジーの研究も盛んになり、我々も電圧制御型メタマテリアルで電磁誘起透明化現象を模擬し、電磁波のメタマテリアル中への保存・再生に始めて成功した[Phys. Rev. B, 87, 161110, (2013)]。

しかし、これらの研究において、透明化現象は電磁波の入射で起っているわけではなく、電磁誘起透明化現象とはいえないものであった。そこで、補助的な電磁波(コントロール波)により透明化現象を引き起こす、本来の意味での電磁誘起透明化現象を実現するメタマテリアルを考案した。図4(a)が設計したメタマテリアルである。動作周波数はマイクロ波を対象とした。構造に含まれるバラクタダイオードが非線形要素として働き、コントロール波による制御を可能にする。図4(b)にコントロール波の入射がないときとあるときの透過率の測定結果を示す。コントロール波が入射されていないときには、単峰の吸収特性を示すが、コントロール波が入射されると、吸収帯の中に鋭い透過窓が出現する。これが、電磁誘起透明化現象のメタマテリアルによる実現であり、この成果に関しては、論文[Phys. Rev. Appl. 4, 024013 (2015)]に掲載されている。論文では、回路モデルによる特性解析と、原子系との対応について詳細に議論している。また、コントロール波のパワー及び周波数依存性についても実験で検証している。

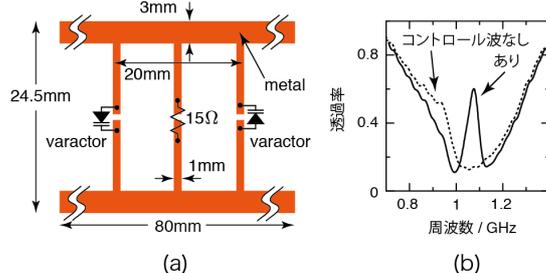


図4 (a) 電磁誘起透明化を実現するメタマテリアルの構造 (b) 透過率

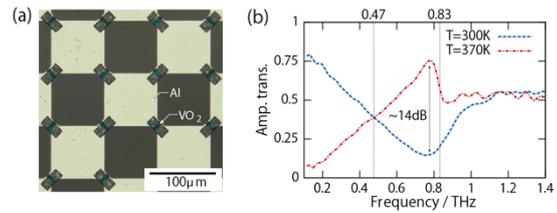


図5 (a) 補対構造を切り替え可能なメタ表面 (b) 振幅透過係数

#### ② 補対構造を利用した電磁波応答の制御

金属を用いた平面構造(メタ表面)はしばしば、電磁波の制御に用いられる。このような構造に関しては、金属部と空隙部を入れ替えた補対構造が存在する。補対構造間にはバビネの原理と呼ばれる関係があり、両者の反射と透過にはある関係がある。我々は、この関係を抵抗膜を含むメタ表面の電磁応答にまで拡張し、補対構造が元の構造と同一になる「自己補対構造」において、電磁波応答の周波数依存性がなくなることを示した。また、テラヘルツ領域での実験的検証をにも成功した[Phys. Rev. Lett. 114, 237401 (2015)]。

さらに、補対構造を切り替えることで、透過・反射特性を切り替える方法を提案した。図5(a)にその構造の顕微鏡写真を示す。構造には金属(アルミニウム)以外に、二酸化バナジウム( $\text{VO}_2$ )が利用されている。二酸化バナジウムは、ある転移温度を境に、絶縁体から伝導体へと変化する性質があり、これを補対構造の切り替えに利用している。図5(b)にテラヘルツ時間領域分光法により測定された、振幅透過率を示す。青色が低温時(300K)、赤色が高温時(370K)の振幅透過係数を表している。両者で透過特性が反転しており、補対構造の切り替えが実現されていることが分かる。この成果に関しては、論文[Opt. Express, 24, 4405-4410 (2016)]に掲載されている。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- [1] Y. Nakata, Y. Urade, T. Nakanishi, F. Miyamaru, M. W. Takeda, and M. Kitano, “Supersymmetric correspondence in spectra on a graph and its line graph: From circuit theory to spoof plasmons on metallic lattices,” Phys. Rev. A, 93, 043853 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevA.93.043853, 査読有。
- [2] Y. Urade, Y. Nakata, K. Okimura, T. Nakanishi, F. Miyamaru, M. W. Takeda, and M. Kitano, “Dynamically Babinet-invertible metasurface: a capacitive-inductive reconfigurable filter for terahertz waves using vanadium-dioxide metal-insulator transition,” Opt. Express, 24, 4405–4410 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.004405, 査読有。
- [3] S. Kajiwaru, Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Observation of a nonradiative flat band for spoof surface plasmons in a metallic Lieb

lattice,” Phys. Rev. B, 93, 075126 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.075126, 査読有.

[4] T. Nakanishi and M. Kitano, “Implementation of Electromagnetically Induced Transparency in a Metamaterial Controlled with Auxiliary Waves,” Phys. Rev. Appl. 4, 024013 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.024013, 査読有.

[5] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Frequency-Independent Response of Self-Complementary Checkerboard Screens,” Phys. Rev. Lett. 114, 237401 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.237401, 査読有.

[6] 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.

[7] Y. Nakata, Y. Urade, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Plane-wave scattering by self-complementary metasurfaces in terms of electromagnetic duality and Babinet’s principle,” Phys. Rev. B, 88, 205138 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.88.205138, 査読有.

[学会発表] (計 28 件)

[1] T. Nakanishi and M. Kitano, “Electromagnetically Induced Transparency Controlled by Auxiliary Wave via Three-Wave Mixing,” 9th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Opt. 9 Sep. 2015, Oxford, UK.

[2] T. Shinji, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Storage of Electromagnetic Waves in Metamaterial via Conductivity Modulation,” 9th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Opt. 7 Sep. 2015, Oxford, UK.

[3] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Coherent Absorption Of Terahertz Pulses By A Checkerboard Metasurface,” IRMMW-THz2015, 24 Aug. 2015, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China.

[4] T. Nakanishi, “Storage and manipulation of electromagnetic waves in metamaterials,” EMN Fall Meeting, 22 Nov. 2014, Orland, USA.

[5] T. Nakanishi and M. Kitano, “Parametric Amplification in Double-EIT Metamaterial: Application to Storage of Electromagnetic Waves,” 8th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Opt. 26 Aug. 2014, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark.

[6] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Experimental Study on Frequency-independent Response of Self-complementary Metasurfaces in Terahertz Regime,” 8th Int. Congr. Adv. Electromagn. Mater. Microw. Opt. 26 Aug. 2014, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark.

[7] K. Sho, Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Excitation of flat band for spoof surface plasmons in a metallic Lieb lattice by

evanescent wave,” The International Symposium on Frontier of Terahertz Science 2014, 5 Aug 2014, OIST, Okinawa, Japan.

[8] Y. Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano, “Self-complementary Metasurface Loaded with ELC-resonators,” The International Symposium on Frontier of Terahertz Science 2014, 5 Aug 2014, OIST, Okinawa, Japan.

[9] T. Nakanishi, “Coherent trap of electromagnetic waves in a metamaterial,” 3rd Korea-Japan Metamaterials Forum, 26 Jun. 2013, Ewha Womans University, Seoul, Korea.

[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

### (1) 研究代表者

中西 俊博 (Toshihiro NAKANISHI)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：30362461