

同時発表：

筑波研究学園都市記者会（資料配布）

文部科学記者会（資料配布）

科学記者会（資料配布）



光メタマテリアルが屈折率ゼロの特殊な性質を持つことを理論的に解明

～新たな光学素子やフォトニック集積回路への応用に期待～

配布日時：2015年12月16日14時

解禁日時：2015年12月16日19時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の石井智MANA研究者と、米国パデュー大学バークナノテクノロジーセンターのアフゲニー・ノルマノフ教授からなる研究チームは、金属と誘電体が周期的に積層したメタマテリアル¹⁾が、特定の周波数の光に対して屈折率がゼロになるなど特殊な光学特性を持つことを、世界で初めて理論的に明らかにしました。屈折率ゼロの物質中では、形状がどれほど曲がったりねじれたりしていても光を損失することなく伝播することができるため、今回の成果を実験的に発展させることで、新たな光学素子やフォトニック集積回路の実現が期待されます。

2. 近年メタマテリアルと呼ばれる人工構造を用いて、自然界には存在しない新規の光学素子を開発する研究が世界中で盛んに行われています。メタマテリアルの中でも、金属と誘電体の周期構造を持つものはハイパボリックメタマテリアル (HMM) と呼ばれ、これまでに HMM を用いた超高解像度のレンズや、単一光子光源の発光効率の向上などが報告されるなど、HMM はメタマテリアルの中でも注目度が高くなっています。

3. これまで HMM は、光が HMM に対して上面から進入した場合と側面から進入した場合、光の周波数によって金属的に振舞う（反射する）か、誘電体的に振舞う（負の方向に屈折する）かの2種類の応答だけだと考えられていました。今回、研究チームは HMM 中の光の伝播を厳密に記述することに成功し、それらに加えて、特定の周波数（臨界状態）の場合には、実効屈折率がゼロになったり、光が円錐状に屈折したりといった特異な光学特性も得られることが分かりました。

4. 今後、この臨界状態での解析を更に詳細に進めることで、光学素子やフォトニック集積回路への応用を目指します。

5. 本研究は、NIMS 第三期中期計画研究プロジェクト「システム・ナノテクノロジーによる材料の機能創出」の一環として行われました。本研究成果は、2015年12月16日（現地時間）にオンラインジャーナルである Scientific Reports 誌に掲載されます。

研究の背景

メタマテリアルは自然界に存在する材料では得られない光学特性をもつことができるため、光学分野において非常に盛んに研究が行われています。例えば、負の屈折率を持つ物質、透明マント、巨大旋光性を持つ物質等が挙げられます。このようなメタマテリアルの出現によって、光を操作する自由度が格段に上がり、高機能光デバイスへの展開も見込まれています。

メタマテリアルにはいくつかの種類がありますが、その中でも金属と誘電体の周期多層膜からなる一次元構造を持つものは、ハイパボリックメタマテリアル (HMM) と呼ばれています (図 1)。HMM は実効的に極端に強異方性を持つことが知られていて、それにより超高解像度のレンズ、ナノスケールの光の干渉、単一光子光源の発光効率の向上などの新奇の特性が見出されています。HMM の構造は単純であるものの前述のように特異な応用が数多く見つかっており、HMM の研究はここ数年盛り上がりを見せています。

HMMの光学特性を理解するために、従来の研究では有効媒質近似²⁾がしばしば用いられてきました。この近似の精度は比較的高いものの、有限の周期構造からなるHMMを均質化してしまうため、HMMの局所的な構造に起因する光学特性 (非局在性³⁾) は無視されます。

研究内容と成果

本研究では、マクスウェル方程式を解析的に解くことでHMM中の光の伝播を厳密に記述しました。そして、光の周波数を固定した時の光学特性を表す等周波数面⁴⁾の形状が、周波数によってどのように変化するか (光学的トポロジー転移) を調べました。

解析の結果、ある特定の周波数において、有効媒質近似では現れない、非局在性に起因する臨界状態が生じることが初めて明らかになりました (図 2)。臨界状態での等周波数面は、波数空間の原点を通り円錐形をしています。この状態に起因することとして、まず実効屈折率がゼロ (図 1) になることが挙げられます。屈折率ゼロの物質中では、波長が無限に長いので光はその物体の形状がどれほど曲がったりねじれたりしていても伝播することができます。従来の光ファイバーや光導波路は、ある程度以上曲げると光が漏れて伝播損失が発生して効率が落ちてしまいますが、屈折率ゼロの物質を使えば、そのような損失なく光を伝播することができると期待されます。もう一つの特徴は、外から入射された光に対して円錐状に屈折するため屈折後光は円錐状のビームとして伝播することです。比較のために水やガラスなどの界面での光の屈折を考えると、光が屈折して界面でものが折れ曲がって見えますが、光は正の角度に屈折されるだけです。ここに挙げた特徴以外にも臨界状態及びその周辺では特異な光物性が観測される可能性があり、今後の研究の進展が待たれます。

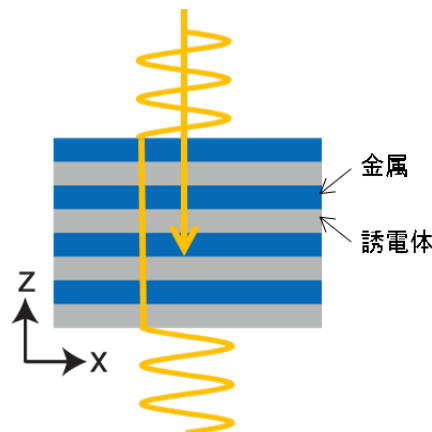


図 1 ハイパボリックメタマテリアル (HMM) が臨界状態で実効屈折率がゼロになったときの光の伝播の模式図。青が金属の層、灰色が誘電体の層を表す。

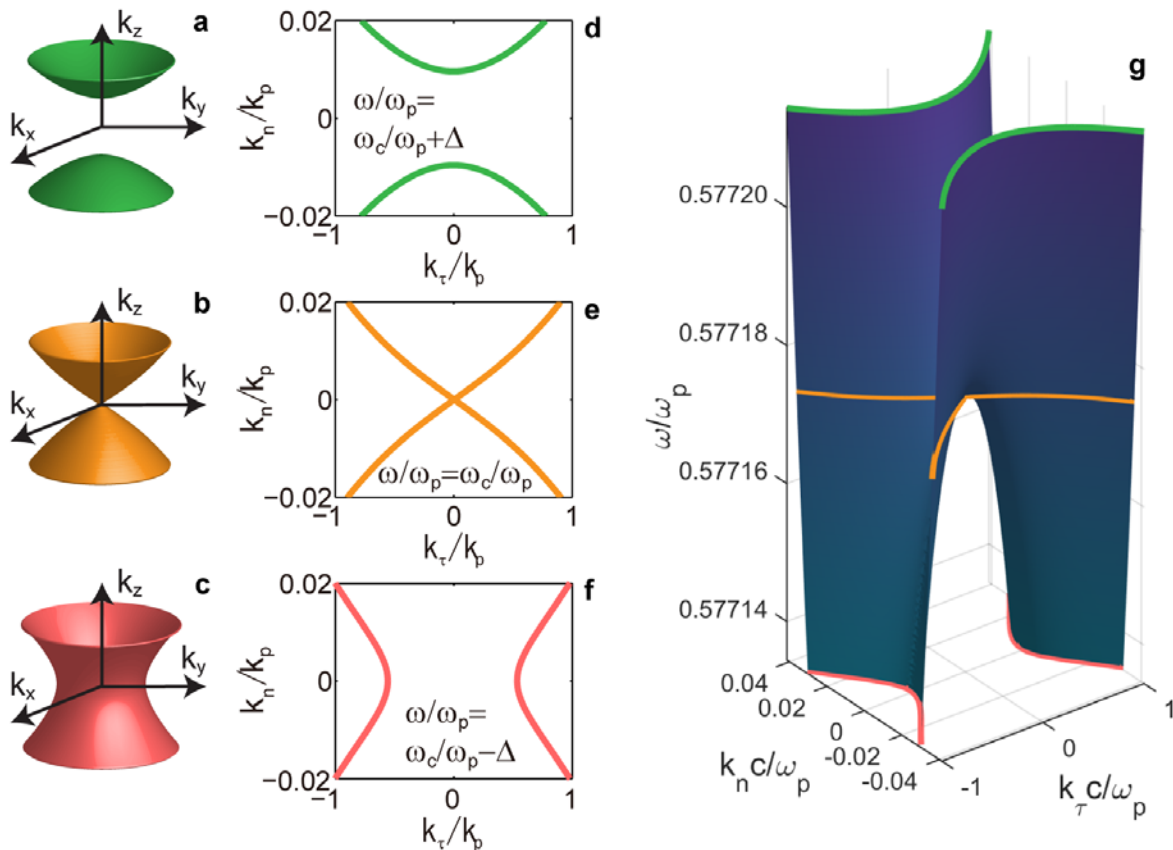


図2 ハイパボリックメタマテリアル (HMM) の臨界状態周辺での光学特性の変化。a-c は波数空間における各周波数での等周波数面、d-f はその断面。b および e の周波数のときが臨界状態で、a および d の周波数は臨界状態より高く、c および f の周波数は低い。g は臨界状態周辺の光学特性の変化を周波数に対して連続的にプロットした図。

今後の展開

今回明らかになった臨界状態での特殊な光学特性は、これまでの光学材料では見つかっていない新たな特性であり、超高感度の光学フィルターや波長板への展開やフォトニック集積回路への応用が考えられます。

また本研究は固体物理への波及効果も期待されます。光学材料の等周波数面は金属などの電子の状態を表すフェルミ面に対応します。金属のフェルミ面の形状変化 (リフシッツ転移) の前後では、金属の物性が大きく変わることが知られていて、興味深い現象を多く含んでいます。しかし、その観測は極限環境が必要なことから実験的に難しいのが現状です。一方、HMM を含めた光学材料の等周波数面の形状は入射光の周波数 (波長) を変えるだけで実験的に容易に観測できるため、将来、本研究のように光学材料についての臨界状態周辺の研究が固体物理の転移に係る研究を誘発できるかもしれません。

掲載論文

題目: Non-local Optical Topological Transitions and Critical States in Electromagnetic Metamaterials

著者: Satoshi Ishii and Evgemii Narimanov

雑誌: Scientific Reports

掲載日時: 平成 27 年 12 月 16 日 (現地時間)

用語解説

(1) メタマテリアル

異なる2種類以上の材料を組み合わせることで自然界にはない特異な光学特性を持つように設計された人工的な材料。周期的な構造である場合が多く、その場合繰り返し周期は波長より十分小さい。代表的なメタマテリアルとして負の屈折率を持つ材料、透明マントなどがあり、ハイパボリックメタマテリアル (HMM) もメタマテリアルの一種である。

(2) 有効媒質近似

メタマテリアルの光学特性を理解するために、複数の材料からなるメタマテリアルを均質化して実効的な誘電率及び透磁率を当てはめること。HMMの場合、厳密解の2次の近似が用いられることが多い。

(3) 非局在性

空間分散とも呼ばれ、メタマテリアルのように有限の構造の組み合わせがあるときに生じ、有効媒質近似では予測できないその構造体の性質。通常非局在性は発現しても非常に小さい効果しか及ぼさないが、本研究のように特にメタマテリアルでは非局在性が大きな効果を及ぼす場合がある。

(4) 等周波数面

周波数を固定したとき、3次元の波数空間において光がとりうる波数ベクトルをプロットしたもの。空気やガラスのように等方的な媒質の等周波数面は球になり、方解石や液晶のように異方性がある媒質では等周波数面は回転楕円体になる。他方、臨海状態以外の周波数でのHMMの等周波数面は双曲面になり、理想的には無限に大きな波数がHMM中に存在できることを示している。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 ナノシステム光学グループ
MANA 研究者 石井智 (いしいさとし)

E-mail: sishii@nims.go.jp

TEL: 029-860-4944

URL: <http://samurai.nims.go.jp/sishii-j.html>

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp