

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287072

研究課題名(和文) 強誘電体メタマテリアルによるテラヘルツ電磁波の制御

研究課題名(英文) Control of terahertz electromagnetic waves by ferroelectrics metamaterials

研究代表者

武田 三男 (TAKEDA, Mitsuo)

信州大学・理学部・教授

研究者番号：20115653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)： フォトニックバンドとフォノン・ポラリトンとのハイブリッドバンドを出現させることを目的に強誘電体Li<sub>2</sub>Ge<sub>7</sub>O<sub>15</sub>を積層してフォトニック結晶を設計試作した。強誘電体の透過スペクトルから極性フォノンモードの共鳴振動数、緩和定数、振動子強度の値を見積り、ハイブリッドバンドが出現するフォトニック結晶の格子定数を決定した。ギャップ端付近に出現する速度異常モードの電場空間分布を有限要素法により解析した結果、定在波と異なり電場強度は入射側の領域にのみ局在していることが分かった。また、フォトニック結晶の欠陥モードと強誘電体の極性フォノンモードを用いた電磁誘起透明化現象に類似の異常透過の可能性を議論した。

研究成果の概要(英文)： To emerge hybrid bands where coupling between photonic band and phonon-polariton in ferroelectrics are coupled, we fabricated the photonic crystals by stacking ferroelectrics plates. From terahertz transmission spectra, resonant frequencies, damping constants, and oscillator strengths of polar phonons were determined and lattice parameters for the photonic crystals where the hybrid band must exist were estimated. Spatial distributions of electric field of the group-velocity anomaly modes whose resonant frequencies are located in the vicinity of edges of band gaps were analyzed by means of finite element method. Electric fields of the modes are localized around the first to third layers near the incident side, while those of standing wave modes are localized at each layer constructing the photonic crystal. Moreover, we discussed possibility of anomalous transmission similar to electromagnetically induced transparency by using defect modes and the polar phonon in ferroelectrics.

研究分野：光物性

キーワード：メタマテリアル 強誘電体 ソフトフォノン 群速度異常モード フォノン・ポラリトン テラヘルツ  
時間領域分光 電磁誘起透明化現象

## 1. 研究開始当初の背景

誘電率と透磁率が共に負であるいわゆる「左手系物質」の概念は古く1960年代のロシアのVeselagoに始まる。1998年にPendryがこの「負の屈折率」を金属ロッド及びスプリットリングアレイの組み合わせによって実現できることを予測し、極最近カリフォルニア大学サンディアゴのグループが実証したことがきっかけとなりわかに注目されてきた。この背景にはフォトニック結晶の点における負の傾きを持つバンドに起因する負の屈折率が示す特異な電磁波の伝播特性の多くの研究がある。左手系物質、強い吸収を持つ媒質およびフォトニック結晶を含めて負の屈折率を示す人工的物質は『メタマテリアル』と呼ばれている。本研究では、極性フォノンをもつある種の強誘電体ではテラヘルツ領域においてその振動数の近傍において誘電率が0を切っただけ負の値を示すことに着目した。

## 2. 研究の目的

強誘電体の平行平板を積層してフォトニック結晶を作製し、極性フォノンによるフォノン・ポラリトンと積層構造に起因するフォトニックバンドとのハイブリッド分散関係出現させる(図1)。ギャップ内に出現する群速度異常モードの解析を行い実験結果と比較検討する。次に、強誘電体の表面に金属製スプリットリングを蒸着した平行平板を積層して3次元メタマテリアルを作製する。温度を制御し、フォノン振動数の変化に伴う群速度異常を示すモードのQ値の制御を実証する。ソフトフォノン振動数は温度変化に極めて敏感なことを利用し、レンズ効果(焦点距離)の制御の可能性を実証する。

一般の極性フォノンは中赤外より短い波長(高い振動数)領域にあり誘電率が負となることは実際には極めて稀である。ところが、幾つかの強誘電体の強誘電相転移に関するソフトフォノンでは、テラヘルツ領域において実際に誘電率が負となる。本研究はこの誘電率が極めて0に近いもしくは負となる領域における物質中の電磁波伝播特性を理論的に解明しかつテラヘルツ電磁波の制御を実証することを目的とする。また、この強誘電体を周期的に並べてフォトニックバンドとの相乗効果によるテラヘルツ電磁波制御の可能性を探

るものである。さらに、強誘電体表面に金属製のスプリットリングアレイを形成して同時に負の透磁率を実現させ、強誘電体メタマテリアル中のテラヘルツ電磁波の挙動を解明しようとするものである。

本研究は、ソフトフォノンモードに起因する0から負の誘電率をもつ強誘電体中の電磁波の伝播機構を解明しようとするもので、これまでに全くない独創的な研究である。非線形光学効果(光整流効果)を用いて強誘電体自身の内部でテラヘルツ波を発生させることに着目した独自の研究である。従来のメタマテリアルによる電磁波制御の研究は、金属周期構造により誘電率と透磁率の一方もしくは両方が共に負であることを実現しているが、本研究では、強誘電体それ自身が持つ特性に着目したものである。誘電体周期構造により生じるフォトニックバンド構造の特性を同時に利用しテラヘルツ波を制御しようとするものである。外形が凹面鏡もしくは放物面鏡の強誘電体を用いれば強誘電体内部で発生した電磁波は外部の自由空間中で自動的に集光することになる。すなわち、発信物質自体で平行光束も集光光束も自由に設計できる可能性がある。テラヘルツ電磁波の制御モジュール設計に画期的な原理を与える基礎研究である。強誘電体自身の特性である負の誘電率とその表面に形成されたスプリットリングアレイによる負の透磁率により「左手系物質」を実現しようとするもので、物性と人工構造体を組み合わせた新規な発想に基づく研究であり光物性分野に新しい方向性を示すものである。強誘電体の周期構造(フォトニック結晶)との相乗効果は現段階ではどのような新奇現象が出現するかは定かでない。

## 3. 研究の方法

初年度(平成25年度)は、強誘電体メタマテリアルのテラヘルツ波伝播機構を解明するため、強誘電体単結晶から平行平板資料を切出し、テラヘルツ時間領域分光により透過率と反射率を測定する。有限要素法等によるメタマテリアル内の電磁波解析の結果と比較検討し、電磁波伝播特性を明らかにする。平成26年度は主に周期構造を導入してフォトニックバンドに起因した負の分散との相乗効果に

よる新たな電磁波伝播特性について研究する。平成27年度は金属スプリットリングアレイにより負の透磁率を実現させ、強誘電体メタマテリアル中のテラヘルツ波の挙動を解明する。以下に年度毎の課題を示す。

[平成25年度] 初年度(平成25年度)は、強誘電体メタマテリアルのテラヘルツ波伝播機構を解明するため、育成した強誘電体( $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ [LGO],  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ [BIT],  $\text{Sr}_2\text{Ni}_2\text{O}_7$ 等)の単結晶から平行平板資料を切り出し、テラヘルツ時間領域分光により透過率と反射率を測定し、フォノン・ポラリトン分散関係及び複素誘電関数を決定する。これらのデータをもとに、有限要素法等によるメタマテリアル内の電磁波解析の結果と比較検討し、電磁波伝播特性を明らかにする。

[平成26年度] フォトニックバンドとのハイブリッド化平面波展開法と有限要素法により、フォトニックバンド計算を行いバンドギャップ位置が材料の強誘電体材料のフォノン・ポラリトンのバンドギャップ位置と一致するように格子間隔を設計する。この計算に基づいて、強誘電体平行平板をサブミリメートル間隔に並べて、テラヘルツ帯のフォトニック結晶を構築する。透過率スペクトルの測定現用のテラヘルツ時間領域分光システムを用いサンプルの反射及び透過スペクトルを測定し、フォトニックバンド分散関係を決定する。現用の超短パルスレーザーを強誘電体フォトニック結晶に照射し、非線形光学効果(光整流)により試料内部でのテラヘルツ波を発生させ、その伝播方向依存性を詳細に測定する。複合型発信体の作製とテラヘルツ波の伝播方向依存性の測定複合型発信体を周期構造の中心に挿入し、現用の超短パルスレーザーを強誘電体試料に照射し、非線形光学効果(差周波光混合)により発信体内部でのテラヘルツ波を発生させ、その伝播方向依存性を詳細に測定し、強誘電体単体における伝播特性と比較検討する。

[平成27年度] 強誘電体スプリットリングアレイ設計 FDTD法によりフォノン・ポラリトンのバンドギャップ領域に負の透磁率を実現するためのスプリットリングアレイを設計する。つづいて、強誘電体スプリットリングアレイの試作強誘電体平行平板の片面にスプリット

リング型アレイを蒸着し試料作製する。引続き、透過率スペクトルの測定、テラヘルツ波の伝播方向依存性の測定、複合型発信体の作製とテラヘルツ波の伝播方向依存性の測定を行う。さらに、複合型発信体を周期構造の中心に挿入し、現用の超短パルスレーザーを強誘電体試料に照射し、非線形光学効果(差周波光混合)により発信体内部でのテラヘルツ波を発生させ、その伝播方向依存性を詳細に測定し、強誘電体単体における伝播特性と比較検討する。

以上の実験及び理論解析の研究結果を、フォトニック結晶におけるこれまでの研究成果と比較 議論し、強誘電体メタマテリアルにおける電磁波伝播特性を解明する。

#### 4. 研究成果

強誘電体の平行平板を積層してフォトニック結晶を作製しフォトニックバンドとフォノン・ポラリトンとのハイブリッド分散関係が出現することを確認した。また、出現する群速度異常モード伝播特性を解析し実験結果と比較検討した。強誘電体平行平板の表面に金属製共振器を蒸着しメタマテリアルを設計試作し、ハイパーレンズ効果等の可能性を検討した。

初年度は、フォノン・ポラリトンおよび誘電関数の決定(図2)とハイブリッド分散関係の数値解析(図3)、強誘電体フォトニック結晶の設計試作と群速度異常モードの確認(図4)および、群速度異常モードの伝播特性の数値解析を実施した。

次年度は、引続き ~ を確認するとともに、強誘電体のソフトフォノン振動数の温度依存性によるバンド構造の制御と群速度異常モードの伝播特性制御、負の屈折率の実現とそれによるパイパーレンズ効果の実証を試みた。~ については計画通り実施できた。強誘電体の透過振幅および位相スペクトルから、複素誘電関数とフォノン・ポラリトン分散関係を決定した。次に、これらの光学パラメーターを用いて、数値解析により強誘電体平行平板を周期的に並べて構築したフォトニック結晶の分散関係を得ることができた(図5 & 図6)。群速度異常モードの伝播特性、すなわち、電場強度の空間分布

を決定し、定在波のそれと比較検討した。定在波では、各層に電場が局在した典型的な強度分布を示しているが、群速度異常モードの強度分布パターンは定在波と同じであるが、入射側の数層にのみ局在し、出射側には伝播していないことが分かった(図7)。とについては  $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$  以外の強誘電体 ( $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_{15}$ ) 候補を探索できた。

最終年度は、 $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$  について金属棒型の Q 値の低い共振器が最適であることが分かった。また、新たな知見として、このハイブリッドバンドは共振周波数はほぼ等しいが Q 値の大きく異なる 2 種類の共振器が存在する場合に現れる電磁誘起透過現象を模擬できる可能性を検討した。すなわち、強誘電体中のフォノン・ポラリトンの主役である極性フォノンが Q 値の高い共鳴であり、一方、フォトニック結晶中に欠陥を導入し、欠陥モードが Q 値の低い共振器を形成させれば、電磁誘起透過現象と同様な異常透過現象が実現できる可能性を議論した。

これらの研究成果は 6 月にペルージャで開催される国際会議 (CIMTEC2016) で発表することが確定している。

## 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)

[学会発表](計2件)

1) 武田三男、「メタマテリアルによるテラヘルツ電磁波の制御」  
日本物理学会秋季大会 関西大学(大阪府・吹田市) 領域 10 シンポジウム(招待講演)  
17aAD-8, 2015, 9月17日

2) Mitsuo W. Takeda, Akihiko Arikawa, Ryohei Araki, Yosuke Nakata, Fumiaki Miyamaru, and Toshihisa Yamaguchi,

“Group-Velocity Anomaly Modes in Hybrid Bands in Photonic Crystals Made of Ferroelectrics”,

CIMTEC 2016-7th Forum on New Materials, Perugia, Italy, 2016, 6~9 June.

[その他]

ホームページ等

信州大学学術情報オンラインシステム SOAR  
<http://www.shinshu-u.jp/soar/>

Optical Physics Laboratory, Department of Physics

<http://science.shinshu-u.ac.jp/~thz>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

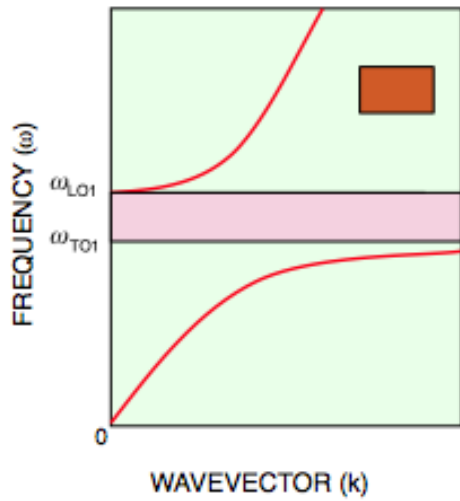
武田 三男 (TAKEDA Mitsuo)  
信州大学・理学部・教授  
研究者番号: 20115653

### (2)研究分担者

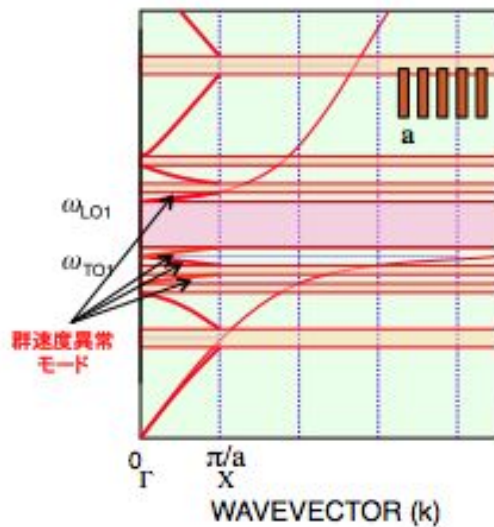
宮丸 文章 (MIYAMARU Fumiaki)  
信州大学・学術研究院理学系・准教授  
研究者番号: 20419005

### (2)研究分担者

中田陽介 (NAKATA Yousuke)  
信州大学・先鋭領域融合研究群  
環境・エネルギー材料研究所  
・助教  
研究者番号: 50745205



(a)



(b)

図1 (a)：強誘電体中のフォノン・ポラリトン分散関係の概念図。 $\omega_{LO}$ と $\omega_{TO}$ との間にバンドギャップが出現している。(b)：強誘電体を積層して作製したフォトニック結晶中の電磁波分散関係。 $\omega_{LO}$ と $\omega_{TO}$ との間のバンドギャップに加えて、 $\Gamma$ 点およびX点に周期性に起因するバンドギャップが現れる。また、フォノン・ポラリトン分枝の折重なりとの相乗作用により、群速度が極めて遅い群速度異常モードがいくつも出現する。

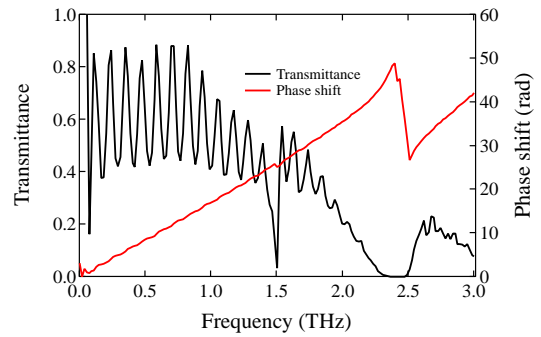


図2 強誘電体LGOのテラヘルツ透過強度スペクトル。 $50\text{cm}^{-1}$  ( $1.5\text{THz}$ )および $80\text{cm}^{-1}$  ( $2.4\text{THz}$ )に極性フォノンモードに起因する透過ディップが確認できる。

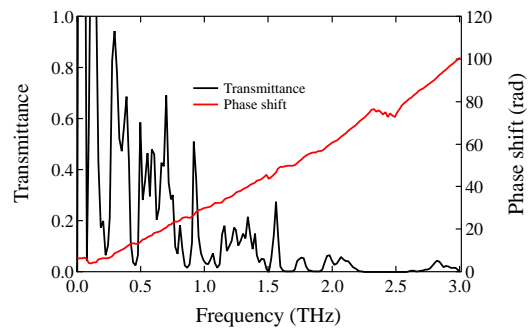


図3 厚さ $40\mu\text{m}$ の強誘電体LGOと高分子化合物Zeonorを交互に4層ずつ積層したフォトニック結晶のテラヘルツ透過強度および位相シフトスペクトルの測定結果。0.2, 0.5, 0.9THz等にバンドギャップに起因する透過ディップが確認される。

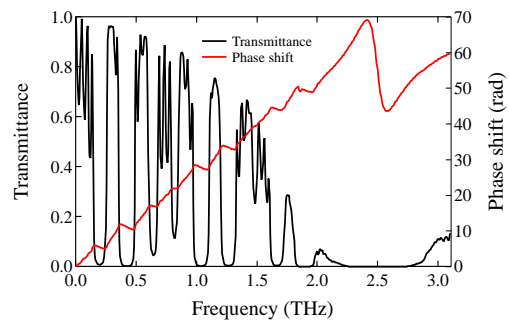


図4 厚さ $40\mu\text{m}$ の強誘電体LGOと空気層を交互に4層ずつ積層したフォトニック結晶の透過強度および位相シフトスペクトルの数値計算結果。0.2, 0.4, 0.7, 0.9THz等に

バンドギャップに起因する透過ディップが確認される。

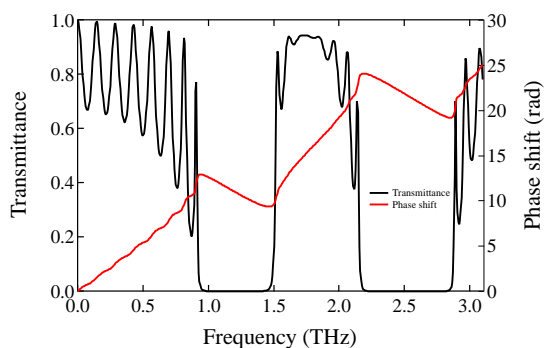


図5 厚さ  $21\ \mu\text{m}$ 、誘電率 6.0 の誘電体と空気層を交互に 8 層ずつ積層したフォトニック結晶の透過強度および位相シフトスペクトルの数値計算結果。0.0~1.5THz および 2.2~2.8THz にバンドギャップに起因する不透過領域が確認される。透過スペクトルに現れている波状のパターンは層境界面による多重反射により生じた干渉パターンであり、各バンドの 8 つの定在波に対応するピークが出現している。

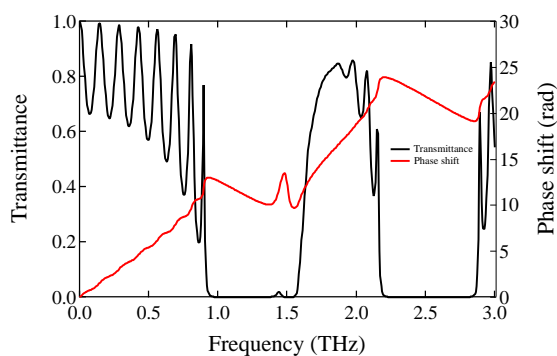
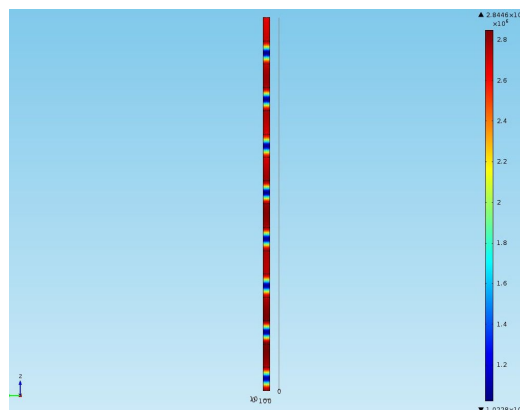
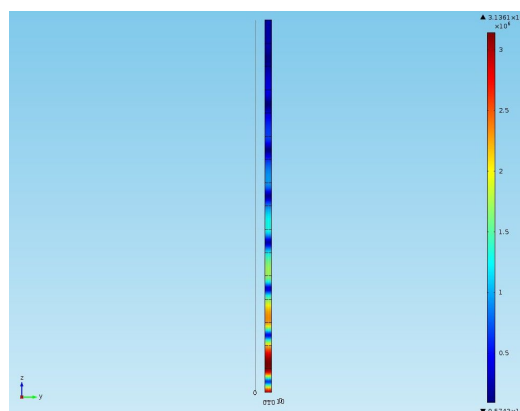


図6 厚さ  $21\ \mu\text{m}$  の強誘電体 LGO (1.5THz に極性フォノンが存在する) と空気層を交互に 8 層ずつ積層したフォトニック結晶の透過強度および位相シフトスペクトルの数値計算結果。1.5THz に極性フォノンに起因する透過ディップが確認されると同時に、位相シフトスペクトルに急峻な折れ曲りが出現する。



(a)



(b)

図7 図5のフォトニック結晶の透過強度スペクトルに現れる透過ピークに対応するモードの電場強度空間分布。(a)：第8番目の定在波。各層に電場が局在した典型的な定在波の強度分布を示している。(b)：第9番目のピーク。強度分布パターンは第8番目の定在波と同じであるが、入射側の数層にのみ局在し、出射側には伝播していないことが分かる。