

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22097

研究課題名（和文）熱環境応答型スマートメタマテリアルの提唱と熱スペクトル制御の実証研究

研究課題名（英文）Thermal environment-responsive smart metamaterials

研究代表者

金森 義明（Kanamori, Yoshiaki）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10333858

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、誘電体ナノギャップを“気体（空気）”としたナノギャップ可変の積層メタマテリアルで構成され、環境変化に応答し環境のエネルギーを利用してメタマテリアル自らパッシブに構造変形し、適切な光学特性に調整可能な熱環境応答型スマートメタマテリアルの提唱と熱スペクトル制御の実証研究を行った。十字構造金属パターン及びバイメタル可動構造を組み合わせたメタマテリアルを作製し、光学特性の評価を行った。周囲温度の変化に対して、可視光領域では透明性を維持しつつ、近赤外光領域においては透過率が可逆的に変化することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した熱環境応答型メタマテリアルは、環境の温度に対してパッシブに構造変形するMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）構造と、可視光では透明性を維持し、構造変形に応じて近赤外光の透過率を制御するメタマテリアルを組み合わせた全く新しい発想のデバイスである。本研究成果をもとに、従来の材料では不可能であった可視光領域では透明で、かつ外部からのエネルギー供給なしに熱スペクトル特性を環境に応じて切り替える遮熱窓が実現され、近年の地球温暖化やエネルギー安定供給などの問題から求められる省エネルギー化に貢献できるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed a thermal environment-responsive smart metamaterial that can be adjusted to various optical characteristics and conducted empirical research on thermal spectrum control. The metamaterial is composed of laminated structure with “gas (air)” as a dielectric variable nanogap and passively deforms its structure in response to environmental changes and uses the energy of the environment appropriately. A metamaterial combining a cross-structured metal pattern and a bimetal movable structure was prepared, and the optical characteristics were evaluated. It was confirmed that the transmittance changes reversibly in the near-infrared light region while maintaining transparency in the visible light region with respect to changes in the ambient temperature.

研究分野：マイクロ・ナノ光学

キーワード：光デバイス マイクロ・ナノデバイス メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化やエネルギー安定供給などの問題から省エネルギー化が求められており、その解決策のひとつとして遮熱フィルムが注目されている。遮熱フィルムとは、可視光(波長 400–700 nm)を透過しつつ、近赤外光(波長 700–2500 nm)を反射・吸収するフィルムのことである。地上に届く太陽光のエネルギーの 48 %と約半分が近赤外光である。そのため窓ガラスに遮熱フィルムを貼り付けることで、見た目の透明度を維持しつつ、近赤外光の侵入を防ぎ室内の温度上昇が抑えられる。これによりエアコン等の使用を抑えることができ省エネルギー化につながる。遮熱フィルムで重要なのは、まず可視光の透過率である。窓に貼り付けて使用するため視界をクリアに保たなければならない。また遮熱をするにあたっては、太陽光が出す近赤外光の中でも特にエネルギーの大きい領域(波長 700–1100 nm)で遮蔽をすることが求められる。遮熱の方法として吸収を用いると、吸収した熱の一部が室内に再放射されて効率が悪い。そのため反射を利用して遮熱するほうが好ましい。また、遮熱フィルムを用いる場合、夏場は非常に効果的であるが、逆に冬場だと熱の侵入を遮ってしまうために却って暖房などの使用を促進させてしまう。そのため、張り替えや遮熱の切り替えが必要となってくる。

現在、遮熱や遮光を制御するフィルターがいくつか販売、研究されている。その中にクロミック材料を用いた物がある。クロミック材料とは、物質の光物性が外部からの刺激によって可逆的に変化する材料のことである。電圧をかけることにより、酸化・還元反応を促し、消着色させて、調光フィルターとして機能する。消着色による調光のため、主にブラインドの代わりとして用いられている。他に、熱によって光学特性が変化する VO₂ などのサーモクロミック材料が知られている。相転移温度の 68 °C で結晶構造が変化し金属絶縁体転移を起こし、高温時と低温時で光学特性が変化する。切り替えの温度を調整することで、遮熱窓としての機能が期待されている。VO₂を用いた遮熱窓の課題として、可視光領域での透過率の低さが挙げられる。課題解決のため、遮熱窓では多重反射を用いることで可視光の透過率の改善を試みているが、透過スペクトルがフラットではないため、透明ではなく色づいてしまう。

2. 研究の目的

メタ材料は金属サブ波長構造を単位素子とした人工光学材料である。誘電体ナノギャップを隔て積層されたナノパターン構造体で構成される積層メタ材料は、ナノギャップ空間に局在するフォトンモードに共振して特定周波数で強い光学共振を示す。また、ナノギャップのわずかな違いで局在フォトンモードが大きく異なるため、ナノギャップ層(通常は SiO₂ などの透明絶縁体が使われる)の厚みに応じて光学特性を調整できる。環境の温度に対してパッシブに構造変形する MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 構造と、可視光では透明性を維持し、ナノギャップの厚み変化に応じて近赤外光の透過率を制御するメタ材料を組み合わせることで、従来のクロミック材料では不可能であった可視光領域での透明性を維持した遮熱窓の実現が期待される。本研究では、誘電体ナノギャップを“気体(空気)”としたナノギャップ可変の積層メタ材料で構成され、環境変化に共振し環境のエネルギーを利用してメタ材料自らパッシブに構造変形し、適切な光学特性に調整可能な熱環境応答型スマートメタ材料の提唱と熱スペクトル制御の実証研究を行う。

3. 研究の方法

本研究では、メタ材料、可動構造、デバイス全体の順で設計・製作・評価を進めていき、各部位の特性や挙動を調べる。メタ材料の設計及び光学特性計算には Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) 法の電磁場計算ソフトウェア DiffractMOD (Synopsys Inc.) を用いる。可動構造の設計及び構造力学計算には有限要素法計算シミュレーションソフトウェアの COMSOL Multiphysics (COMSOL Inc.) を用いる。デバイスの作製・評価の一部では、東北大学工学研究科附属マイクロ・ナノマシニング研究教育センターの共有装置・施設等を利用する。作製したデバイスに対して環境温度を変化させた場合の透過率スペクトルを計測し、可視光領域での透過率を維持しつつ、近赤外光の透過率を変化できることを確認する。

4. 研究成果

図 1 にメタ材料の 2 次元周期構造の単位構造モデルを示す。SiO₂ 基板上に Al の十字構造が周期的に配列されており、周期を Δ 、高さを h 、幅を w 、長さを l とする。光が入射する際、長さ方向に共振し、反射のピークが生じる。その反射ピークを太陽光エネルギーの大きい近赤外領域に合わせることで遮熱の性能を果たす。共振波長は主に l の大きさに依存する。また、 w を

小さくすることにより金属の面積を減少させることができ、可視領域での透過率を大きくする。表面プラズモン共鳴による反射のピークは、周辺屈折率が大きくなるほど長波長側にシフトする。このときの屈折率に対する感度は、形状が等方性のものに比べ、異方性のもの方が良い。そのため、十字構造は正方形などに比べ遮熱の切り替えに対しても効率的に働く。高屈折率と透明性を兼ねる SiN を接触させた場合に、可視光領域での透明性を維持しつつ、近赤外光におけるできるように、周期 Δ 、高さ h 、幅 w 、長さ l を決定した。図 2 に製作したメタ材料の SEM 画像を示す。設計通りの寸法および周期の Al からなる十字構造パターンアレイが形成されていることを確認した。

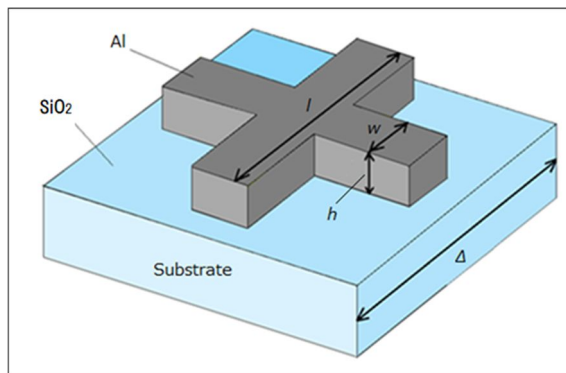


図 1 メタ材料の単位構造モデル。

可動構造の方法としてバイメタルを採用した。バイメタルは、温度変化による熱膨張を利用して反りあがるものである。温度の低い状態では下に下がり、メタ材料と SiN 薄膜が接する。温度が上昇していくと、バイメタルが上に反りあがり、メタ材料から SiN 薄膜が離れる。バイメタルの寸法を調節することで、周囲の温度変化のみ(夏冬の気温差)で駆動するので、電気を使わず、自律的に上下駆動する。バイメタルとして Al および SiN を採用し、20 °C の温度変化で 1.02 μm の変位が得られ、メタ材料の光学特性変化に十分な変位が得られるように設計した。バイメタルからなる片持ち梁を製作した例を図 3 に示す。顕微鏡観察像の焦点位置から、周囲温度を変化させることで可逆的な構造変形が生じていることを確認した。

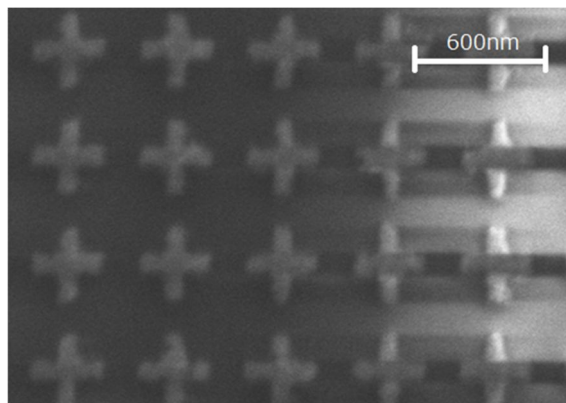


図 2 製作したメタ材料。

バイメタル及びメタ材料を組み合わせた熱環境応答型デバイスの製作に取り組んだ。まず、市販のバイメタル材料を加工し、型持ち梁状のフレームとして誘電体基板およびメタ材料を組み合わせたデバイスを製作した。フレーム部の温度をヒーター及び熱電対を用いて温度制御することで、誘電体基板とメタ材料の接触を可逆的に制御できる。図 4 に製作したデバイスの透過率スペクトルを示す。フレーム温度の変化に伴いスペクトルが変化することを確認した。設計時に計算によって得られた透過率スペクトルと同様に、可視光領域を維持しつつ近赤外光における透過ディップがシフトし、低温時には近赤外光の透過率が高まり、高温になると透過率が低下することを確認した。続いて、バイメタルをメタ材料上にマイクロマシニングにより形成する手法を進めた。本研究の時間内では動作検証には至らなかったものの、SEM 観察より構造を確認し、マイクロマシニングによるナノパターン・バイメタル一体構造の作製指針を得た。

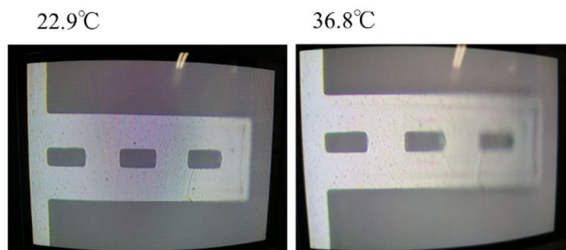


図 3 製作したバイメタル片持ち梁。

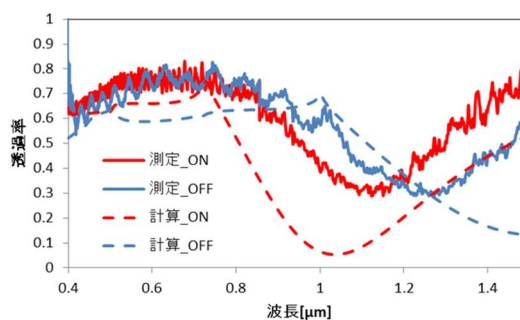


図 4. 透過率スペクトルの計算値及び測定値。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2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 金森義明	4. 巻 39
2. 論文標題 シリコンナノ微小球による誘電体メタマテリアル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 FCレポート	6. 最初と最後の頁 66-70
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 岡谷泰佑、金森義明	4. 巻 69
2. 論文標題 メタマテリアル光学センサ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 化学と教育	6. 最初と最後の頁 532-535
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 Okatani Taiyu, Sekiguchi Shota, Hane Kazuhiro, Kanamori Yoshiaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Surface-plasmon-coupled optical force sensors based on metal-insulator-metal metamaterials with movable air gap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14807
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-71825-x	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 Okatani Taiyu, Abe Yosuke, Nakazawa Takuya, Hane Kazuhiro, Kanamori Yoshiaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Fabrication of silicon nanospheres placeable on a desired position for dielectric metamaterials in the visible region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 189 ~ 197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OME.415313	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yoshiaki Kanamori and Masanari Bito
2. 発表標題 Metasurfaces for heat-shield windows
3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金森義明
2. 発表標題 ナノ構造によるメタマテリアル
3. 学会等名 第2回Nano Structured Optics 分科会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾藤 正斉、羽根 一博、金森 義明
2. 発表標題 可視透過・近赤外反射メタマテリアルの製作
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金森義明, 関口将太, 羽根一博
2. 発表標題 エアギャップ式可動MIMメタマテリアルによるフォースセンシング
3. 学会等名 第36回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 金森義明	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)R&D支援センター	5. 総ページ数 202
3. 書名 メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術（第3章第1節）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

金森・岡谷研究室 https://web.tohoku.ac.jp/kanamori/index.html

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