

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17985

研究課題名(和文)メタマテリアルによる熱ふく射制御と太陽熱光起電力発電への展開

研究課題名(英文)Thermal radiation control by metamaterial and application to solar thermophotovoltaic power generation

研究代表者

櫻井 篤(SAKURAI, Atsushi)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：20529614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽熱光起電力(Solar-TPV)発電の基礎的研究を行った。この研究で鍵となる技術は、波長選択性を持つ太陽光吸収材料とエミッターである。そこで我々は、ふく射特性を自由自在に制御することが可能なメタマテリアルに着目した。理論並びに数値解析に基づいてメタマテリアル構造の設計を行いエミッターとしてほぼ設計通りの性能を得ることに成功した。また真空容器内での試験では熱光起電力発電が可能であることを示した。また、波長選択性太陽光吸収材料について、コアシェル型ナノ粒子アレイやフィッシュネットを用いたメタマテリアルを提案した。さらに赤外領域において大面積波長選択性エミッターの研究も併せて行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, we conducted fundamental research on solar thermophotovoltaic (Solar-TPV) power generation. Key technologies in this study are solar-selective absorbers and wavelength-selective emitters. Therefore, we focused on metamaterials that can flexibly control radiative properties. We designed the metamaterial structure based on theory and numerical analysis and succeeded in obtaining performance almost as designed as Solar-TPV emitter. We also showed that the photovoltaic power generation is possible in the experiment in the vacuum. We also proposed a metamaterial using a core-shell type nanoparticle array and fishnet type for solar-selective absorbers. In addition, we have also studied large-area wavelength-selective emitter in the infrared region.

研究分野：熱工学

キーワード：波長選択性ふく射制御 メタマテリアル サーマルフोटニクス 太陽エネルギー 熱光起電力発電

1. 研究開始当初の背景

次世代の高度太陽エネルギー利用方法の一つとして最近、太陽熱光起電力発電(Solar-Thermophotovoltaic(TPV))システムが注目されている。TPV 発電システムは、主として熱源、光吸収材、エミッター、光電変換(PV)セルの4つの要素で構成される。太陽光発電は太陽エネルギーの一部しか利用できないのに対し、Solar-TPV 発電では太陽エネルギー全てを一旦熱エネルギーとして蓄えた後、PV セルの高感度領域に整合した熱ふく射光に変換することで、太陽エネルギーの全てを利用することが出来る。熱源は太陽光以外に、製鉄所や発電プラントの廃熱などが自由に選べることもメリットの一つである。

ここで鍵となる技術は、波長選択性を持つ太陽光吸収材料とエミッターである。本来、熱ふく射は広帯域のインコヒーレント光にしかなりえないと思われていたものが、近年のナノテクノロジーの進化により、その限界を突破することが可能となっている。PV セルの高感度領域に整合するよう波長を揃え、狭帯域熱ふく射を入射させることにより、高い発電効率が期待できる。ところが、高温材料の波長制御は困難であり、実用化にはクリアすべき問題が山積している。

波長選択性を持つ太陽光吸収材料は、これまでに金属ナノ粒子とセラミックを混合したサーメットに着目し、広帯域ふく射吸収特性を持つ波長選択性太陽光吸収材料を遺伝アルゴリズムにより最適設計を行ってきた。ところがこの研究では、ナノ粒子一つ一つを表現して解析を行ったのではなく、有効媒質近似法によってふく射特性が解析されていたため、材料内部での光輸送現象が明らかになっておらず材料設計のための指針を得られにくいという問題点があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、メタマテリアルに着目する。メタマテリアルとは、サブ波長サイズの構造体によって電磁場を制御し、自然界には存在しない新しい光学特性を持つ材料のことである。本研究でターゲットとする波長選択性エミッターは、PV セル(GaSb)の外部量子効率が最も高い領域に整合するような狭帯域熱ふく射を発現させるものである。また、このメタマテリアルを用いた波長選択性太陽光吸収材料の研究も併せて行い、さらに高性能な材料設計のための指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、独自開発してきたメタマテリアルに関する理論に基づき、TPV 発電に適した波長選択性エミッターを、MEMS 技術を駆使して作製する。分光測定装置を用いてエミッターの質を評価し、電磁波理論解析の両面から改良・発展させる。その耐熱性やさら

に高効率な集熱方式についても多方面から検討する。

Solar-TPV 発電システムの高効率化のため、ナノ粒子やフィッシュネット構造メタマテリアルを用いた波長選択性太陽光吸収材料についても検討を行う。

4. 研究成果

本研究課題の開始段階では、メタマテリアルに関する理論に基づき、上記のような特性を持つ波長選択性エミッターを実現できることを数値解析により見出していた。これまでに理論並びに数値解析に基づいてメタマテリアル構造の設計を行い、実際にエミッターを作製することを目的として研究を進めた。作製には電子線リソグラフィ、スパッタリング、反応性イオンエッチングといった半導体プロセスを活用した。また、エミッターの耐熱性を高めるためエミッター上層に誘電体コーティングを施すように改良した。この作製したエミッターの光学特性を測定し、Solar-TPV 用のエミッターとしてほぼ設計通りの性能を得ることに成功した(図1)。

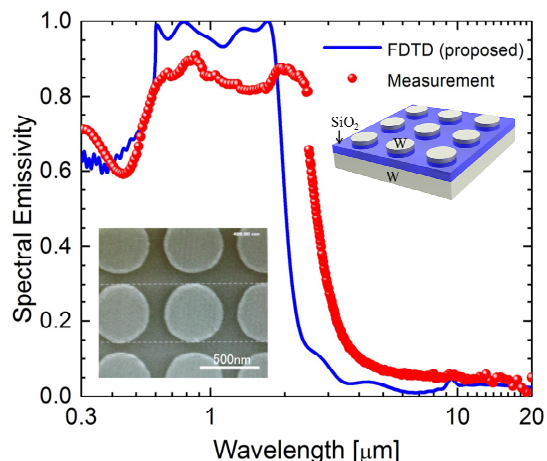


図1 Solar-TPV 波長選択エミッターのふく射特性

続いて、このエミッターを真空容器内で電気加熱し、PV セルで発電が可能かどうかを検討するための実験装置を製作した(図2)。現在までの実験ではエミッター表面を真空下で加熱することで PV セルから光起電力を得られることを確認している。

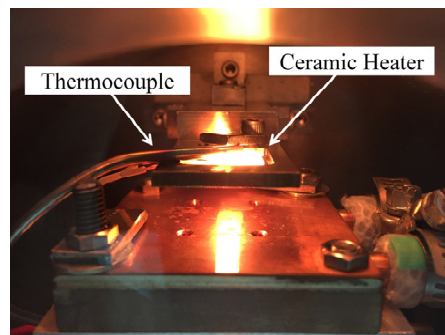


図2 TPV 発電試験

次に波長選択性太陽光吸収材料について、タングステンのコアシェル型ナノ粒子アレイを用いた材料を提案し、局在プラズモン共鳴現象とギャップ間での電磁場増強によって太陽光スペクトルの広い範囲において光吸収が起こることが明らかになった (図3)。

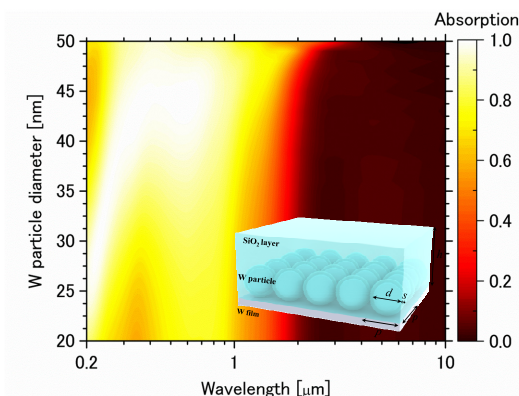


図3 コアシェル型ナノ粒子アレイを用いた波長選択性太陽光吸収材料の光吸収特性

またフィッシュネット構造によるメタマテリアルを用いた太陽光吸収材料を提案した。これはフィッシュネット間での光のキャビティ効果と、フィッシュネットと基板間での電磁場増強 (マグネティックポラリトン (MP)) によって複数の共鳴状態を同時に引き起こすことで太陽光吸収が可能になることを明らかにした (図4)。

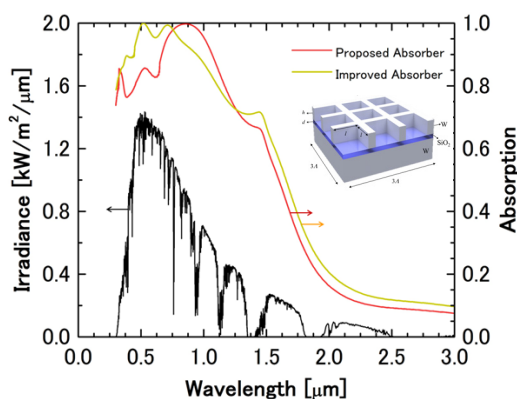


図4 フィッシュネット型波長選択性太陽光吸収材料の光吸収特性

ここでMPとは、金属・誘電体・金属の三層で構成されたサブ波長サイズの構造体において、上下の金属板に挟まれた誘電体中で強い光の閉じ込め効果が得られる現象のことである。この現象は、波長選択性エミッターとも共通のものであって、問題は大面积での作製が困難ということであった。そこで、本研究ではまず赤外領域での大面积波長選択性エミッターの研究も併せて行った。この研究では、フォトマスクによるリソグラフィとウェットエッチングによって短時間か

つ低コストでの大面积メタマテリアルの作製が可能となった (図5)。

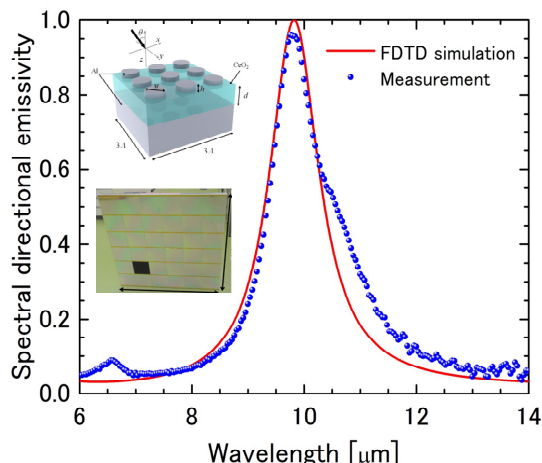


図5 大面积波長選択性エミッターふく射特性

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)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Matsuno, Y. & Sakurai, A. Perfect infrared absorber and emitter based on a large-area metasurface. *Optical Materials Express* **7**, 618-626, (2017). 査読有
DOI: 10.1364/ome.7.000618
- ② Matsuno, Y. & Sakurai, A. Electromagnetic resonances of wavelength-selective solar absorbers with film-coupled fishnet gratings. *Optics Communications* **385**, 118-123, (2017). 査読有
DOI: 10.1016/j.optcom.2016.10.044
- ③ Sakurai, A. & Kawamata, T. Electromagnetic resonances of solar-selective absorbers with nanoparticle arrays embedded in a dielectric layer. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **184**, 353-359, (2016). 査読有
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.08.005
- ④ 櫻井 篤, メタマテリアルによる自由自在な熱ふく射制御: 熱と光の新たなエネルギー変換に向けて, 伝熱, Vol.55, No.230, 18-23, (2016), 査読無
https://www.htsj.or.jp/wp/media/2016_1.pdf

[学会発表] (計17件)

- ① 櫻井 篤, 牛木 開陸, 横山 達也, 宮崎 康次, サーメット型太陽光吸収材料の直接電磁波シミュレーション, 第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2018).
- ② 矢田 恭平, 吉本 大樹, 櫻井 篤, ナノスリット型グラフェンメタサーフェスによる熱ふく射制御, 第54回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2017).
- ③ Matsuno, Y. & Sakurai, A.

- Wavelength-Selective Absorber and Emitter Based on a Magnetic Polariton, Extended Abstracts of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (2017).
- ④ Sakurai, A & Matsuno, Y., Wavelength-Selective Emitter and Absorber Based on a Metasurface, 3rd International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (2017).
- ⑤ Matsuno, Y., Koyanagi, R., Sakurai, A, Thermophotovoltaic Conversion System with Wavelength-selective Metasurface Emitter, Asian Conference on Thermal Sciences (2017)
- ⑥ Matsuno, Y., Koyanagi, R., Sakurai, A, Wavelength-selective metasurface emitter for thermophotovoltaic system, The 6th International Symposium on Micro and Nano Technology (2017)
- ⑦ 櫻井 篤, メタマテリアルによる波長選択性熱ふく射制御, 日本学術振興会メタマテリアル第 187 委員会 (招待講演) (2017)
- ⑧ 櫻井 篤, メタサーフェスによる自由自在な熱輻射制御: 宇宙機の熱マネジメントに向けて, 熱物性研究会「先進材料の熱物性と宇宙システムデザイン」(招待講演) (2017)
- ⑨ Koyanagi R., Matsuno, Y. Sakurai, A, Near-infrared wavelength-selective metasurface emitter, The 14th International Conference on Flow Dynamics (2017)
- ⑩ Yokoyama, T., Ushiki, K. Sakurai, A, Computational Design of Solar Selective Absorber with Metallic Nanoparticles Embedded in Multilayer, The 14th International Conference on Flow Dynamics (2017)
- ⑪ Hamada, K., Ogawa, R. Sakurai, A, Broadband Mid-Infrared Metasurface Emitter for Radiative Cooling, The 14th International Conference on Flow Dynamics (2017)
- ⑫ 矢田 恭平, 吉本 大樹, 櫻井 篤, グラフェンメタサーフェスによる熱ふく射制御, 第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2016).
- ⑬ 吉本 大樹, 矢田 恭平, 櫻井 篤, 赤外波長領域におけるグラフェンメタサーフェスを用いた熱ふく射制御, 熱工学コンファレンス講演論文集 (2016).
- ⑭ Kawamata, T. & Sakurai, A. Electromagnetic Resonances of High Temperature Solar-Selective Absorbers with Refractory Nanoparticle Arrays, The Fourth International Forum on Heat Transfer(2016)
- ⑮ Sakurai, A. & Kawamata, T. High-temperature solar-selective absorbers using core-shell nanoparticle arrays, The

First Pacific Rim Thermal Engineering Conference (2016)

- ⑯ Matsuno, Y. Sakurai, A, Wavelength-selective absorber with film-coupled grating metamaterial for solar-thermophotovoltaic system, The 13th International Conference on Flow Dynamics (2015)
- ⑰ 櫻井 篤, 平原大樹, 非対称メタサーフェスによる熱ふく射制御, 第 36 回日本熱物性シンポジウム講演論文集 (2015).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 赤外線放射装置
 発明者: 戸谷剛, 櫻井篤, 近藤良夫
 権利者: 北海道大学, 新潟大学, 日本碍子株式会社
 種類: 特許
 番号: 特願 2018-082171
 出願年月日: 2018 年 04 月 23 日
 国内外の別: 国内

名称: 赤外線ヒーター
 発明者: 戸谷剛, 櫻井篤, 近藤良夫
 権利者: 北海道大学, 新潟大学, 日本碍子株式会社
 種類: 特許
 番号: 特願 2016-207571
 出願年月日: 2016 年 10 月 24 日
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 赤外線ヒーター
 発明者: 戸谷剛, 櫻井篤, 近藤良夫
 権利者: 北海道大学, 新潟大学, 日本碍子株式会社
 種類: 特許
 番号: 特開 2017-50254
 取得年月日: 2017 年 03 月 09 日
 国内外の別: 国内, 海外

[その他]

ホームページ等
<http://www.eng.niigata-u.ac.jp/~rad>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 篤 (SAKURAI, Atsushi)
 新潟大学・自然科学系・准教授
 研究者番号: 20529614