

令和元年6月24日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04884

研究課題名(和文) プラズモン発熱とフラクタル低反射構造による光熱電システムの構築

研究課題名(英文) construction of photo-thermal energy conversion system via plasmonics and fractal anti-reflection surfaces

研究代表者

西島 喜明 (NISHIJIMA, Yoshiaki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60581452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトを通して、プラズモンメタ表面やブラックシリコンを利用した、低反射・高光吸収ナノ材料を開発した。特に、太陽電池で利用できない波長領域である近赤外から中赤外の波長域で、90%を超える高効率光吸収を実現するに至った。実験・シミュレーションによる解析から、光熱変換を利用した発電システムの高効率化を実現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の太陽電池で使用できない中赤外や遠赤外の波長から、熱を介して電気エネルギーを取り出すことができるシステムを実現する材料を開発することに成功した。これは、再生可能エネルギーの利用効率を極限的に高めることに役立つ社会的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：We have achieved to fabricate the plasmonic meta surface, which is absorption type of plasmonic materials and black silicon nano-micro structures for low reflectance and high absorption materials. Especially, we have achieved to construction of materials over 90% absorption in near infrared to mid infrared wavelength, which is used for un-used solar light energy from sun light.
From experimental and simulation analysis, we confirmed to realize voltaic system with photo-thermal energy conversions.

研究分野：ナノ材料

キーワード：メタ表面 ブラックシリコン 光熱変換・発電システム 光吸収効率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー問題解決のため太陽電池に関する研究が盛んにおこなわれてきた。その結果 Si 太陽電池では理論限界値 (~25%) にせまる光電変換効率の実現されつつある。一方、全太陽光のうち、20%以上は Si の吸収とは無関係に損失するエネルギー (透過・反射・散乱損失) 55%以上は吸収したのち熱となるエネルギー (熱損失) であり、実に 80%以上にもおよぶ太陽光エネルギーは利用されていない。この膨大なエネルギーの有効的な再利用法の確立が大きな課題である。

研究代表者はこの未使用のエネルギーを全て熱に変換し、熱電素子で回収する手法に注目した。すなわち、20%も存在する反射・散乱・透過光を効率よく捕捉し、光熱変換する。Si から発生する熱と併せ、残り 80%のエネルギーを熱電変換素子で発電する。これによって初めて熱電変換を効果的に機能させ、太陽光の全光エネルギーを電気エネルギーとして得ることができるようになる。

このような光熱変換の一例として、申請者はこれまでサブマイクロピラー型の極低反射表面を有するブラックシリコン(b-Si)を作製し、b-Si と金ナノ微粒子によるプラズモン発熱を利用した光熱変換素子を開発した。これにより、鏡面 Si と比較して 10 倍近い光熱変換効率を得ることに世界で初めて成功した。

2. 研究の目的

本研究は、上述の光エネルギーを効率よく熱エネルギーに変換するため、反射・散乱光を抑制するための高次フラクタル無反射表面の形成と Si が透過する光を吸収するため、Ge と Sn の合金および、金ナノロッドのプラズモン発熱を利用した全太陽光光熱変換材料を開発する。次に、これらの技術を統合した光熱変換材料を作製し、市販の熱電素子と組み合わせて高効率な光熱電変換を目指す。最終的に Si 型太陽電池と併用し、太陽電池の廃熱エネルギーを全て回収できる完全効率をもつ太陽光発電システムを構築する。

3. 研究の方法

Ge-Sn 合金材料：地表に降り注ぐ太陽光は波長約 3000 nm までの光が含まれる。Si 太陽電池は 1100 nm まで光電変換できるが、さらに長波長の光は吸収できず光電変換されない。この 1100~3000 nm の光を吸収させるため、Si よりもバンドギャップの狭い Ge-Sn 合金系を用いる(Si:~1.1 eV, Ge: ~0.67 eV, Sn:~0 eV)。Ge-Sn の組成を変えながらバンドギャップを評価し、全太陽光を吸収する最適な組成を探索する。Ge-Sn は Si よりも熱伝導性が低く、効率よく熱を伝えるために Ge-Sn 層を数 100 nm~数 nm の厚さで薄膜化する必要がある。そのためプラズモン発熱を併用した高効率化も併せて検討する。

プラズモン発熱：プラズモン共鳴は光と金属ナノ構造体との共鳴現象であり、ナノ構造体周囲に入射した光の 10^2 - 10^4 倍にも及ぶ巨大な局在電場を形成する(電場増強効果)。この局在電場により電子衝突やフォノン結合を経て、局所的に数百度にもおよぶ熱が発生する。これがプラズモン発熱であり、高効率の光熱変換が実現できる。本研究では Si が吸収できない 1100~3000 nm の光を光熱変換させる金ナノロッドを用いる。また、プラズモン共鳴は半値幅 100 nm 程度の分光特性を示すことから、様々なアスペクト比のナノロッドを混合し、太陽光スペクトルに最適な光熱変換材料を実現す

る。Ge-Sn 合金とプラズモン発熱を組みあわせ、Si を透過した太陽光を 100%熱に変換できる条件を検討する。

4 . 研究成果

本研究を通して、表面にナノニードル型のシリコンを有し、GeSn 層を下層に配置することで、近赤外から中赤外の光を効率よく吸収できるナノ材料を実現した。さらにこれをゼーベックデバイスと組み合わせることにより、近赤外の光吸収効率を向上させることに成功した。さらに、既存の太陽電池との組み合わせにおいて、太陽電池の発電効力に影響なく、熱電効率を最適化させることができる仕組みについても、開発することに成功した。

一方で、GeSn 層では吸収量を高めるためには、数ミクロンの厚みを必要とすることを実験とシミュレーションから明らかにした。しかし、これは熱の輸送効率で考えると、不利益になる。そこで、薄膜で光吸収量を最適化できる、プラズモンメタ表面とそれによる光熱変換について研究した。メタ表面は、金属-誘電体-金属ナノ構造体の積層構造型プラズモン材料であり、プラズモン共鳴の発生する波長で光吸収が起こる。金属材料、誘電体材料の組み合わせや、ナノディスクの直径、周期、膜厚などを制御して様々な組み合わせの材料を実験・シミュレーションにより精緻に検討することにより、実に 90%以上の光吸収を実現できる構造体を見出すに至った。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Y. Nishijima, A. Balcytis S. Naganuma G. Seniutinas S. Juodkazis, “Kirchhoff’s metasurfaces towards efficient photo-thermal energy conversion” Scientific Reports, 9, 8284, 2019

Y. Nishijima, A. Balcytis S. Naganuma G. Seniutinas S. Juodkazis, “Tailoring Metal and Insulator Contributions in Plasmonic Perfect Absorber Metasurfaces” ACS Applied Nano Materials, 1, 7, 3557-3564, 2018

Y. Nishijima, R. Komatsu, T. Yamamura, A. Balcytis, G. Seniutinas, S. Juodkazis, “Design concept of a hybrid photo-voltaic/thermal conversion cell for mid-infrared light energy harvester,” Optical Materials Express, 7, 3484-3493, 2017.

〔学会発表〕(計 2 件)

Y. Nishijima, A. Balcytis, G. Seniutinas, S. Juodkazis, “Plasmonic components towards photonic-nose,” META 2018 9th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, 2018 年 7 月 (招待講演)

Y. Nishijima, “Sub-micron plasmonic metasurfaces for mid infrared sensing application, Pacific RIM Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-PR 2018 年 7 月 (招待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ynlab.ynu.ac.jp/>

<https://researchmap.jp/yn2018---->

(2)研究協力者

研究協力者氏名：ヨードカジス サウリウス

ローマ字氏名：JUODKAZIS, Saulius

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。