

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分
平成31年3月25日現在

ヘテロ接合型人工微細構造による赤外エネルギーハーベスタ
Infrared Energy Harvester by Artificially Structured
Heterojunction



課題番号：16H06364

長尾 忠昭 (NAGO, TADAAKI)

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・グループリーダー

研究の概要（4行以内）

本研究は、赤外線放射を効果的に捕集し、エネルギーへと変換できるヘテロ接合型デバイスの開発を目的としている。光を捕集・捕捉する赤外共振器構造の開発と、熱・赤外光をエネルギー変換するための独自のナノ材料やプロセスの開発を遂行し、界面構造と界面物性を制御しながら、両者を結合させた効果的なエネルギー変換デバイスを製作し実証してゆく。

研究分野：工学

キーワード：赤外線デバイス、表界面光学、熱放射、ナノ材料科学

1. 研究開始当初の背景

地上の全ての物体は熱エネルギーを持ち、赤外線を放射・吸収することで、相互に熱エネルギーを授受している。適切な材料に対して人工的なナノ構造制御を施し、熱放射・吸収のスペクトルを柔軟に制御することが可能となれば、特定の対象物だけに反応するセンサー、廃熱や環境放射からエネルギーを拾い集めるエネルギーハーベスティングなどへの道が拓ける。これらの技術は赤外線ステルス技術や高性能イメージング技術とも関連し、国防、ロボット技術や、環境・状態判別用の高付加価値認知センサーなどに繋がる、大きな可能性を秘めた分野になりうる。

2. 研究の目的

本研究では、界面電子励起、表界面プラズモン・フォノンなどのエネルギーを、熱エネルギーに変換、あるいは、界面分極や電気エネルギーへと変換する接合ナノ界面の物性制御と、その効果を増大させる赤外ナノ共振器構造についての、設計・指導原理を構築する。具体的には、2008年以降これまでに研究チームが築いてきた、光を捕集し、集中・増強させる赤外プラズモン材料やナノアンテナ開発の実績を土台に、本

研究では新たに、これらナノスケール輻射捕集構造と接合させ効果的にエネルギー変換できる、赤外創エネ界面の材料・構造制御に比重を置き、進める。

3. 研究の方法

本プロジェクトでは、以下の様に進める。まず、①近赤外・赤外波長帯域のエネルギー変換を実現する、赤外創エネ材料とその金属/半導体ヘテロ界面構造・デバイスを探索する。創エネ用ナノ材料としては、当グループで実績を持つ、V族半金属の低次元構造や、グラフェン、赤外応答性の狭ギャップ半導体、IV族ボロメーター材料などを主な候補材料とする。この中から、光電変換や光熱変換材料、光伝導や熱伝導材料として、微量の光や熱の変換・検知材料として使えるものを探索する。並行して、②光を高効率に捕集するプラズモン材料やメタマテリアル構造を、電磁場シミュレーションとナノファブリケーション技術を用いて開発する。その後、①と②の開発を組み合わせることで複合化し、高効率光捕集型のヘテロ接合型熱ふく射変換デバイスの試作を行う。

4. これまでの成果

まず、Al/Al₂O₃/Al/Si界面における、光熱変換と光電変換効果を用いた変換デバイスを製作し、3-5 μ m帯域での動作を確認した。続いて、TiN/Ge界面におけるホットキャリア生成を利用した近赤外光電変換を調べ、Au/Geに比べて高い光電変換効率を見出した。TiN/Geのヘテロ界面におけるホットキャリアを近赤外帯域において高効率に生じさせることができ、Geのバンドギャップ0.7eV以下で動作する赤外ショットキーダイオードの機能を持つことを確認した。また、TiNとC₃N₄とを複合した光触媒材料を開発し、C₃N₄単体では不可能な900nm以上の波長での光電流生成を確認できた。

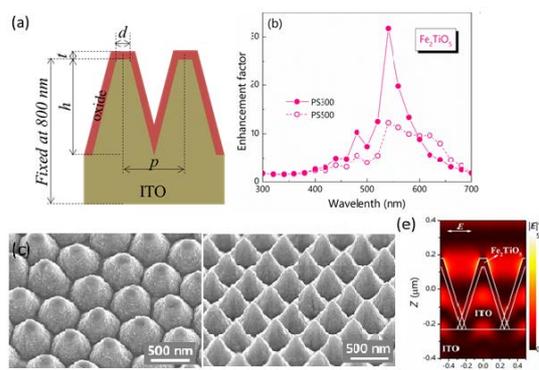


図1 円錐型ITOの共鳴を利用した光捕集電極とFe₂TiO₅とのヘテロ接合構造。平坦膜に比べて30倍の電流増大効果が得られた。

可視-近赤応答ヘテロ材料の候補として、Fe₂TiO₅の成膜に成功し、これを円錐型インジウム酸化錫(ITO)のMie共鳴を利用した光捕集構造上にヘテロ成長させ、光触媒電極を製作した。その結果、可視波長領域の光電流が、平坦膜に比べて、30倍以上増大し、可視応答材料として既知のFe₂O₃膜と比較して、3倍以上高い光電流を記録した。また、赤外創エネ材料として、金属ナノワイヤの樹状成長を見出し、光捕集能と光伝導効果を併せ持つ赤外線受光素子を目指した材料・ナノデバイス開発を進めた。

5. 今後の計画

今後はV族半金属ナノワイヤーとプラズモン構造とを接合させた赤外線デバイスや、非対称グラフェン構造と赤外ナノアンテナとを接合した整流デバイスなど、ナノスケール性や界面機能による、新奇で挑戦的な赤外線受光素子や創エネデバイスの製作へと進めてゆく。

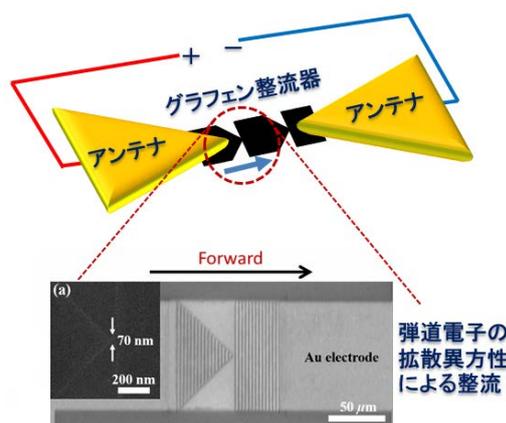


図2 非対象構造を持つグラフェン整流構造と赤外アンテナによる複合素子。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) H. D. Ngo, T. D. Ngo, *et al.*, "Structure and optical properties of sputter deposited pseudobrookite Fe₂TiO₅ thin films," *CrystEngComm* 21, 34-40 (2019).
- 2) S. Ishii, S. L. Shinde, T. Nagao "Nonmetallic Plasmonic Materials for Hot Carrier Generation," *Adv. Opt. Mat.* 7, 1800603 (2018).
- 3) I. Katayama, H. Kawakami, *et al.*, "Terahertz-field-induced carrier generation in Bi_{1-x}Sb_x Dirac electron systems," *Phys. Rev. B* 98, 214302 (2018).
- 3) R. P. Sugavaneshwar, S. Ishii, T. D. Dao, A. Ohi, T. Nabatame, T. Nagao, "Fabrication of Highly Metallic TiN Films by Pulsed Laser Deposition Method for Plasmonic Applications," *ACS Photonics* 5 (3), 814-819 (2018).
- 4) S. L. Shinde, S. Ishii, T. D. Dao, R. P. Sugavaneshwar, T. Takei, K. K. Nanda, T. Nagao, "Enhanced Solar Light Absorption and Photoelectrochemical Conversion Using TiN Nanoparticle-Incorporated C₃N₄ Dot Sheets," *ACS Applied Materials & Interfaces* 10 (3), 2460-2468 (2018)
- 5) K. Chen, T. D. Dao, T. Nagao, "Tunable Nanoantennas for Surface Enhanced Infrared Absorption Spectroscopy by Colloidal Lithography and Post-Fabrication Etching," *Scientific Reports* 7, 44069 (2017).
- 6) C. Huck, J. Vogt, *et al.*, "Strong coupling between phonon-polaritons and plasmonic nanorods," *Optics Express* 24(22),25528-25539, (2016).

7. ホームページ等

https://samurai.nims.go.jp/profiles/nagao_tadaaki?locale=ja
<https://www.nims.go.jp/research/group/photronics-nano-engineering/>