

「エネルギー高効率利用のための相界面科学」
平成 25 年度採択研究代表者

H29 年度 実績報告書

長尾 忠昭

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・MANA 主任研究者

セラミックスヘテロ層における界面電磁場制御と熱エネルギー利用

§ 1. 研究実施体制

(1) 「光機能創発」グループ

- ① 研究代表者：長尾 忠昭（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）
- ② 研究項目
 - ・高耐熱型のプラズモニック材料や誘電体ヘテロ層界面における電磁場制御と
ふく射スペクトル制御
 - ・狭帯域波長選択型赤外線センサーの開発と真温度計測への応用

(2) 加熱グループ

- ① 主たる共同研究者：戸谷 剛（北海道大学大学院工学院 准教授）
- ② 研究項目
 - ・界面電磁場制御技術の乾燥炉への適用と実用化

§ 2. 研究実施の概要

本研究では、材料内部の性質に由来する光・熱物性と、表界面ナノ構造における電磁場制御の二つの側面をリンクさせ、光エネルギーを完全に熱エネルギーに変換する、あるいはその逆過程を実現するための方法論とその利用方法の開拓を進めてゆく。NIMS光機能創発グループでは、高融点金属・合金、金属性セラミックス、半導体などのナノ構造の界面電磁波に起因する高効率な光熱変換特性、波長選択性を探求する。特に、高い波長選択性を持つ赤外線センサーを開発し、社会・産業における真温度センシングへの応用や、熱エネルギー制御・省エネルギー化へとつなげる事を目指す。また、北大・日本ガイシ加熱炉グループでは金属-絶縁体-金属構造(Metal-Insulator-Metal: MIM 構造)による省エネルギーかつ、低温で熱損傷の少ない乾燥が可能な赤外線乾燥炉用のヒーターエレメントの開発を進め、このエレメントを組み込んだ省エネ低温乾燥炉を日本ガイシ株式会社とともに実現させる。このように本研究チームは、固体物性研究を基軸とした機能創発、デバイス工学と熱工学を基軸とした応用研究の2つを相補的に組み合わせ、熱ふく射エネルギーの利用を出口とした研究を効果的に推進してゆく。

①波長選択赤外線センサー(物質・材料研究機構)

H29年度は、昨年までの焦電体方式に替えて、Si-Al 熱電方式を用いたセンサーを開発した。熱電方式にするメリットは、信号をロックインアンプに通すことなく、直接電圧として測定できる点にあり、実用化の際にデバイスの ROIC 回路が簡略化できる。感度については、室温付近の物体からのふく射計測により真温度計測できるように、また、イメージセンサーへの応用も視野に入るように比検出能 $D^* \sim 10^8$ 台を目標とし、光熱応答性が高まるように MEMS 技術による中空断熱構造をもつデバイスを製作した。対象とする波長範囲は、中赤外帯域における大気の窓領域での使用を想定し、 $3.7 \sim 5.5 \mu\text{m}$ の範囲とした。H27年度開発の波長選択方式と同じく、 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の波長分解能を持つ MIM 波長選択素子と Si-Al 熱検知素子とを組み合わせ、目標とした $0.5 \mu\text{m}$ レベル分解能の分光感度を持つ赤外線センサーを実現した。一方で、比検出能 D^* の値は昨年度開発の焦電体センサーと同程度の $D^* \sim 10^6$ 台にとどまった。

この製作と並行して、簡便な積層構造を持つ波長選択素子を開発し、その素子を用いて、波長分解能 100 nm を目指したセンサーを新たに試作した。波長分解能が 50 nm を切る良好な性能を示した。波長幅が 10 分の1に狭くなり、また、断熱構造を持たず、熱マネージメントを行っていないにもかかわらず $D^* \sim 10^6$ 台の感度を記録した。今後は、断熱性能や熱検知材料の改良に注力し、さらなる高感度化を目指して研究を進めてゆく。

② 波長選択赤外線素子を用いた乾燥試験(北海道大学)

1. 波長 $3 \mu\text{m}$ の赤外線を用いた乾燥

多くの溶剤が吸収帯を持つ波長 $3 \mu\text{m}$ 帯の赤外線を用いた乾燥実験を行い、従来の波長制御ヒーターで使われているフィルター方式と金属-絶縁体-金属(MIM)構造方式における、水 1 g を蒸発させるために必要な入力電力を比較した。フィルター方式は、エミッタが射出する広い波長域の赤外線のうちフィルターで必要な波長域のみを透過させるのに対し、MIM 構造方式は、上部金属

部の材質と寸法、絶縁層の材質と厚み、MIM 構造の周期を設計することにより、必要な波長の赤外線が角度依存性がなく強く射出することができる。水 1gを蒸発させるために必要な入力電力は、フィルター(石英、透過波長:5 μm 以下)を用いた従来の波長制御ヒーターの場合、183 kJ/g であったのに対し、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用した場合、101 kJ/g となり、約 45%削減できることが分った。また、フィルター方式のエミッタ部を真空中で使用する場合でも、107 kJ/g であり、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用した場合、約 6%削減できることが分った。従来のフィルター方式は、エミッタが溶剤の吸収しない波長域の赤外線も射出するため、MIM 構造方式よりも多くの電力を必要したと考えることができる。特筆すべきは窓温度であり、従来のフィルターを用いた方式でエミッタ部を真空中で使用する場合、116 $^{\circ}\text{C}$ であったのに対し、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用した場合、93 $^{\circ}\text{C}$ となり、約 20 $^{\circ}\text{C}$ ほど低温になった。窓温度が高温であると、蒸発した溶剤が窓に触れた時に着火する恐れがあるため、窓温度が低温であるのは、望ましい結果である。

2. 波長 6 μm の赤外線を用いた乾燥

多くの溶剤が吸収帯を持つ波長 6 μm 帯の赤外線を用いた乾燥実験を行った。トルエン 1gを蒸発させるために必要な入力電力は、フィルター(多層膜、透過波長:6~8 μm)を用いた従来の波長制御ヒーターの場合、49.9 kJ/g であるのに対し、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用した場合、30.1 kJ/g となり、約 40%削減できることが分った。また、フィルター方式のエミッタ部を真空中で使用する場合、38.3 kJ/g であり、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用すると、約 21%削減できることが分った。エミッタ背面設置されている加熱部の温度は、従来のフィルター方式では 156 $^{\circ}\text{C}$ 、フィルター方式のエミッタ部を真空中で使用する場合 251 $^{\circ}\text{C}$ 、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用した場合 287 $^{\circ}\text{C}$ であった。真空中でエミッタを使用した場合温度が高くなるのは、エミッタから空気への対流熱伝達を抑制でき、エミッタの温度上昇に使われる熱量が増えるためである。また、MIM 構造を持つ波長制御エミッタを真空中で使用した場合の方が、フィルター方式のエミッタ部を真空中で使用する場合よりも温度が高くなるのは、MIM 構造の方が特定の波長域の赤外線を強く射出することができる一方、同量のエネルギーを射出するためには、表面温度が高くなる必要があるためである。MIM 構造を持つエミッタはフィルター方式に比べて温度が高くなるため、熱損失が大きくなりやすいので、MIM 構造を持つエミッタからの熱損失が小さくなるように熱マネジメントを徹底することが他の方式よりも重要であることが分った。

代表的な原著論文

1. 長尾忠昭, T. D. Dao, K. Chen, 石井智, 横山喬大, “マイクロ構造による赤外線波長選択素子とその応用”, 化学工業, Vol.68, No.4, pp.295-301 (2017).
2. R. P. Sugavaneshwar, S. Ishii, T. D. Dao, A. Ohi, T. Nabatame, and T. Nagao, “Fabrication of Highly Metallic TiN Films by Pulsed Laser Deposition Method for Plasmonic Applications,” ACS Photonics, vol.5, No.3, pp. 814-819 (2018).
3. S. Ishii, K. Uchida, T. D. Dao, Y. Wada, E. Saitoh, and T. Nagao, “Wavelength-selective spin-current generator using infrared plasmonic metamaterials,” APL Photonics, vol.2,

106103 (2017).