

ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出
2019 年度採択研究代表者

2019 年度 実績報告書

内田 建

東京大学大学院工学系研究科
教授

空間的・時間的に局在化したナノ熱の学理と応用展開

§ 1. 研究成果の概要

熱は物質中を容易に広がるため、熱による高温状態を活用する技術は、エネルギー効率が極めて低い。本研究課題では、ナノ材料中の電流によって発生するジュール熱を時間的・空間的に局在化させた「ナノ熱」を創出し、このナノ熱を自由自在に制御するための学理と技術を構築することを目標とする。ナノ熱を所望の場所に所望の時間だけ生成する技術により、温度上昇に必要なエネルギーを極限まで抑制する。また、ナノ空間の温度を新たな自由度とするナノ熱エレクトロニクスを創製する。より具体的には、身の回りに漂うガス分子を認識する機能を、環境負荷の少ない小型・低エネルギーで実現することを目標としている。

本年度は低エネルギーの「ナノ熱分子センサ」を実現するために、どのような電極材料を選択しうるかをシミュレーションにより明らかにした。また、センサ材料と電極材料の界面における抵抗(界面熱抵抗)への要請も明らかにした。さらに、界面抵抗を増大する手法について検証実験を開始するとともに、ナノ熱分子センサを実現するための低熱伝導電極材料の製造プロセスを構築した。具体的には、センサを利用する高温度(400°C)においても安定に動作する、低熱伝導性酸化物電極材料(Alドープ ZnO)を製造することに成功した。

さらに、ナノ熱を利用した分子センサとして、新たに2つのタイプのセンサを開発した。一つは金属ナノシートの危険性ガス検知センサである。もう一つは、有毒ガスである一酸化炭素に応答して低・中・高濃度という3つの濃度領域を識別し、自律的に応答性を変化させる発光型のセンサである。

【代表的な原著論文】

H. Masai, T. Yokoyama, H. V. Miyagishi, M. Liu, Y. Tachibana, T. Fujihara, Y. Tsuji, J. Terao, “Insulated Conjugated Bimetallopolymer with Sigmoidal Response by Dual Self-controlling System as a Biomimetic Material”, *Nat. Commun.* **11**, 408 (2020).

R. Yan, T. Takahashi, M. Kanai, T. Hosomi, G. Zhang, K. Nagashima, T. Yanagida, “Unusual Sequential Annealing Effect in Achieving High Thermal Stability of Conductive Al-doped ZnO Nanofilms,” *ACS Appl. Elect. Mater.*, 2020, doi: 10.1021/acsaelm.0c00321.

§ 2. 研究実施体制

(1) デバイスグループ

① 研究代表者: 内田 建 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

② 研究項目

・ナノ熱デバイスの設計および作製と評価

- 1) 半導体-ナノ金属ハイブリッド素子の作製
- 2) グラフェン素子の作製と電子温度計測
- 3) 電子-フォノン散乱増強修飾物の作製(酸化物 Gr 共同)
- 4) 分子温度計プロトタイプの特性評価(有機材料 Gr 共同)
- 5) ナノ熱センサ・プロトタイプ of 作製と評価

(2) 熱モデリンググループ

① 主たる共同研究者: 塩見 淳一郎 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

② 研究項目

・ナノ熱の計測とモデリング

- 1) 非平衡フォノン輸送の実験的評価
- 2) 非平衡フォノン輸送シミュレーション

(3) 酸化物グループ

① 主たる共同研究者: 柳田 剛 (九州大学先導物質化学研究所 教授)

② 研究項目

・ナノ熱のための酸化物電極と酸化物受容部の開発

- 1) 高電気伝導率・低熱伝導率の酸化物電極の作製
- 2) 非平衡フォノンデバイス(ナノ材料-金ナノドット-酸化物電極)の作製
- 3) ナノ熱分子センサの作製

(4) 有機材料グループ

① 主たる共同研究者: 寺尾潤 (東京大学大学院総合文化研究科 教授)

② 研究項目

・ナノ熱計測・活用のための機能化有機材料の設計と合成

- 1) ホスト-ゲスト相互作用を利用する分子温度計の設計
- 2) 金属配位結合を利用する二段階調節機能を有する生体模倣型センサ素子の設計
- 3) 環状分子の熱的スライディングを利用する発光型分子温度計の設計