

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

2020年度 年次報告書

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

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。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する。

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、センサ受容部として金ナノシート、酸化タングステン、イオン液体の3種類の材料について検討を重ねた。その結果、金ナノシートが硫化水素センサとして低濃度の硫化水素を高速に検出可能であることを示した。また、イオン液体がアセトン受容部として機能することを実証することに成功した。さらに、ナノ熱センサとして期待される酸化タングステンナノワイヤを低電圧で駆動可能とする技術の開発にも成功した。このように各種材料でセンサの動作を実証するだけでなく、センサ動作を原子論的シミュレーションで定量的に評価可能な技術の開発も行った。開発した手法は、様々な化学センサへの応用が可能な普遍的な技術であり、センサの社会実装に貢献すると期待される。

一方で、センサを電氣的接続する電極としてAlを添加した酸化亜鉛電極(Al-doped ZnO:AZO)の開発にも成功した。AZOのアニール手法を最適化することで、熱安定性・化学安定性共に格段に向上した電極を形成することに成功した。この技術はナノ熱センサを開発する上で今後共通基盤技術になると期待される。

また、二次元材料のヘテロ構造において、熱輸送計算と機械学習を組み合わせ、面直方向の熱伝導率が非常に低い非周期的な構造を設計することに成功し、その起源がフォノンの局在化によることを明らかにした。

§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・プロトタイプの作製と評価

(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(東京大学大学院工学系研究科 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) 熱分解型分子温度計の設計

2) 構造変化による発光を伴う分子温度計の設計

3) 環状分子のシャトリングを利用する熱駆動発光ゲル材料の合成

【代表的な原著論文情報】

1. R. Yan, T. Takahashi, H. Zeng, T. Hosomi, M. Kanai, G. Zhang, K. Nagashima, T.

- Yanagida, Enhancement of pH Tolerance in Conductive Al-Doped ZnO Nanofilms via Sequential Annealing. *ACS Appl. Electron. Mater.* **3**, 955–962 (2021).
2. 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. Electron. Mater.* **2**, 2064–2070 (2020).
 3. T. Tanaka, T. Kato, T. Yajima, K. Uchida, “Atomistic simulation study of impacts of surface carrier scatterings on carrier transport in Pt nanosheets,” *IEEE Electron Dev. Lett.*, Published Online 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3077466