

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

2021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

空間的・時間的に局在化したナノ熱を利用した分子センサを実現するために、基板への熱散逸を低減する①架橋グラフェン構造、LSI への集積化を可能とするような低電圧で動作する②低抵抗の酸化タングステン・ナノロッド(WO_3)を実現する技術を構築した。 WO_3 ナノロッドをチャンネルとする分子センサを作製し、低電圧での駆動を実証した。また、分子センサを多数集積化センサシステムに用い、被験者に負担をかけないセンシングを実施する技術を開発した。

ナノ熱センサで熱の流出を防ぐために、半導体チャンネル/ナノスケール金属層/電極基板の高熱抵抗化に取り組み、金属層に金ナノドットを用いることで電子とフォノンの非平衡性によって熱抵抗を増大できることを示した。また、モード依存の電子・フォノン結合輸送シミュレーションを利用して、金属/半導体界面における非平衡熱輸送とそれから成る多層膜の実効熱伝導率を計算し、メカニズムを明らかにした。

ナノ熱センサで発生し、無機界面上の自己組織化単分子膜(SAM)に伝わる熱を検出するために、加熱に伴う化学変化を利用した「分子温度計」を設計し、加熱による不可逆な化学変化を用いることで、有機分子に到達した熱を記録する分子温度計を開発した。また、ホスト分子としてシクロデキストリンを用いた超分子センサを高感度の抵抗型センサへと応用するために、導電性 π 共役ポリマーを用いてキャストし、グラフェンへのシクロデキストリン修飾に成功した。

ナノ熱センサの高度化のために、熱耐久性と高電気伝導性を有する金属酸化物電極材料(アンチモン添加酸化錫)を用いた金属酸化物ナノ薄膜分子センサを 1024 個集積化したセンサアレイチップを作製し、分子検出動作を実証した。酸化亜鉛ナノワイヤアレイブリッジ構造の分子センサの結晶成長シード層端部形状の設計を行い、センサ特性の素子間ばらつきを劇的に削減することに成功した。

§ 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) メタンを認識するナノ熱分子センサのための材料決定
 - 2) 高熱抵抗・低電気抵抗電極の開発
 - 3) 酸化物半導体を用いたナノ熱センサの開発
 - 4) ナノ材料を電極に架橋した分子センサの作製
 - 5) 分子センサを集積化する技術の開発.
 - 6) 開発したセンサの実使用環境における課題を抽出する.

(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

- ・ 半導体チャネル/電極の界面金属層の電子・フォノン非平衡性および幾何学を利用した高熱抵抗化の評価
- ・ モード依存の電子・フォノン結合輸送シミュレーションによるメカニズム同定
- ・ 非周期の二次元ヘトロ構造の最適化による究極的な熱伝導低減

(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/九州大学 先端物質化学研究所 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・高耐久性の金属酸化物電極の創成
 - 2) 金属ナノ粒子/半導体ナノチャネル界面熱物性評価サンプルの作製
 - 3) 酸化物ナノ構造体の作製および特性評価
 - 4) 酸化物半導体に対するロバストな分子修飾技術の確立

(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および特性評価
 - 2) シクロデキストリンのキラリティを活用した分子センサ
 - 3) π 共役ポリマーを用いたグラフェンへのホスト分子修飾

【代表的な原著論文情報】

- 1) H. Honda, T. Takahashi, Y. Shiiki, H. Zeng, K. Nakamura, S. Nagata, T. Hosomi, W. Tanaka, G. Zhang, M. Kanai, K. Nagashima, H. Ishikuro, T. Yanagida, Impact of Lateral SnO₂ Nanofilm Channel Geometry on a 1024 Crossbar Chemical Sensor Array. *ACS Sens.* **7**, 460-468 (2022).
- 2) Zihao Liu, Xingxing Li, Hiroshi Masai, Xinyi Huang, Susumu Tsuda, Jun Terao, Jinlong Yang, Xuefeng Guo, A Single-Molecule Electrical Approach for Amino Acid Detection and Chirality Recognition, *Science Advance*, **7**, abe4365 (2021).