

「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」
平成27年度採択研究代表者

H29 年度
実績報告書

渡邊 孝信

早稲田大学理工学術院
教授

計算フォノンクスを駆使したオン・シリコン熱電デバイスの開発

§ 1. 研究実施体制

(1) 渡邊グループ

- ① 研究代表者: 渡邊 孝信 (早稲田大学理工学術院 教授)
- ② 研究項目
 - ・研究全体の統括
 - ・スケーラブル・プレーナ型デバイスの高集積化効果の検討
 - ・熱電物性評価用素子の作製
 - ・ナノワイヤ熱電デバイスの作製と性能評価
 - ・SiGe ナノワイヤの熱電特性評価
 - ・分子動力学法によるフォノン輸送シミュレーション
 - ・縦型モジュールの検討

(2) 鎌倉グループ

- ① 主たる共同研究者: 鎌倉 良成 (大阪大学工学研究科 准教授)
- ② 研究項目
 - ・ナノスケール熱電デバイスに適した金属コンタクトのデザイン
 - ・第一原理計算を活用したフォノン状態解析

(3) 池田グループ

- ① 主たる共同研究者: 池田 浩也 (静岡大学電子工学研究所 准教授)
- ② 研究項目
 - ・熱電物性評価用素子の作製

- ケルビンプローブフォース顕微鏡を用いたナノスケール材料のゼーベック係数評価技術の開発
- 走査電子顕微鏡を用いた熱伝導率評価技術の開発
- 極薄 SGOI 基板形成技術と SiGe ナノワイヤのパターニング

§ 2. 研究実施の概要

昨年度に発明したスケーラブルなプレーナ型 Si 熱電発電モジュールについて、大きな発電密度を実現するデバイス構造の理論的検討を進め、プロジェクト目標である $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の実現見通しを得た。熱電デバイスの試作実験でも期待通り微細化による発電密度の大幅な向上が確認された。また、熱電物性評価用ナノ素子を作製し、ナノスケール熱電特性評価手法の開発を進めた。

有限要素シミュレーションによる検討の結果、図 1 に示すように、ナノワイヤ長の縮小に伴い発電パワー密度が上昇する領域があることが確認され、温度差 50K で最大 $537\text{mW}/\text{cm}^2$ に達することが判明した。温度差 5K でも $4.2\text{mW}/\text{cm}^2$ に達する。熱源の熱抵抗による温度低下も考慮した検討が必要であるが、本プロジェクトの最終目標としている温度差 10K で $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の発電密度は十分達成可能と考えられる。

熱電デバイスの試作実験で観測されているゼーベック係数のナノワイヤ長依存性の起源について、理論的な検討を行った。電極部からナノワイヤ部への接続部における熱抵抗に注目し、狭窄部における局所的なゼーベック係数が短いナノワイヤで顕在化する可能性を検討した結果、長さ依存性が生じるのは拡散的熱輸送機構のみを考えた場合は長さ $10\mu\text{m}$ 以下に限られることが判明した。実験結果を説明するためには、ナノワイヤ中のフォノンの弾道輸送性も考慮したキャリアとフォノン相互作用も考慮する必要があると考えられる。

ナノスケール Si の熱電特性評価手法の開発では、専用のナノスケール試料を作製し、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) を用いたナノサイズ Si のゼーベック係数評価装置で表面電位分布測定を実施した。走査電子顕微鏡 (SEM) を用いたナノ材料熱伝導率評価装置の改良も行い、試料表面の広い範囲で SEM 像と赤外線サーモグラフィ像の同時取得を可能にした。レンズ系の改良により電子ビームによる試料加熱も確認され、SEM による AC カロリメトリ測定に向けた重要な要素技術を確立した。

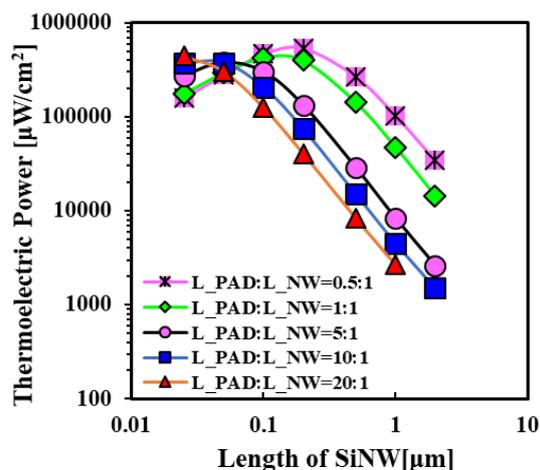


図 1 シミュレーションで予測された熱源温度差 50K のときの発電密度とナノワイヤ長の関係

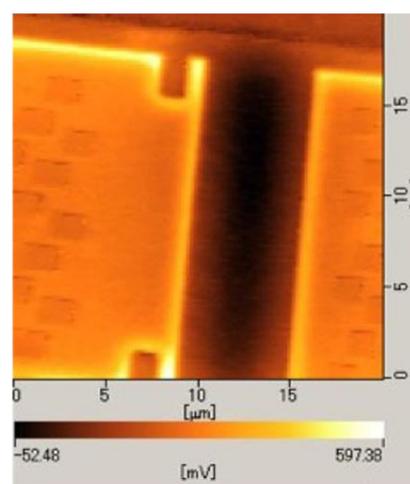
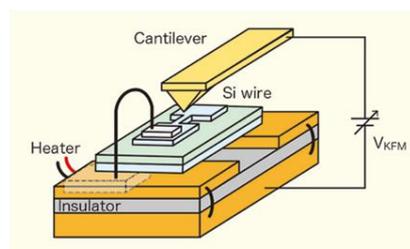


図 2 KFM 測定の概略図と作製した評価用素子の表面電位像

代表的な原著論文

- 1) Shuichiro Hashimoto, Shuhei Asada, Taiyu Xu, Shunsuke Oba, Yuya Himeda, Ryo Yamato, Takashi Matsukawa, Takeo Matsuki, and Takanobu Watanabe, "Anomalous Seebeck Coefficient Observed in Silicon Nanowire Micro Thermoelectric Generator," *Applied Physics Letters*, Vol. 111, 023105 (2017).
- 2) Hui Zhang, Taiyu Xu, Shuichiro Hashimoto, Takanobu Watanabe, "The Possibility of mW/cm^2 -class On-Chip Power Generation Using Ultra-Small Si Nanowire based Thermoelectric Generators," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 65, pp.2016-2023 (2018).
- 3) Tianzhuo Zhan, Ryo Yamato, Shuichiro Hashimoto, Motohiro Tomita, Shunsuke Oba, Yuya Himeda, Kohei Mesaki, Hiroki Takezawa, Ryo Yokogawa, Yibin Xu, Takashi Matsukawa, Atsushi Ogura, Yoshinari Kamakura, Takanobu Watanabe, "Miniaturized planar-type Si-nanowire micro thermoelectric generator using exuded thermal field for power generation, " *Science and Technology of Advanced Materials (STAM)*, Vol. 19, 443-453 (2018).