

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  
2019年度採択研究代表者

2020年度 年次報告書
-----------------

渡邊 孝信

早稲田大学 理工学術院  
教授

プレーナ型スケーラブル熱電発電機構の実証と展開

## § 1. 研究成果の概要

2015～2018 年度に実施したプロジェクト(JPMJCR15Q7)で創出した「プレーナ型 Si 熱電デバイス」の実証研究に取り組むとともに、CNT 熱電シート材料、ならびに IV 族混晶薄膜への適用を進めた。

Si 熱電デバイスに関しては、高密度集積モジュールのフォトマスクを完成させ、先端半導体プロセスによる試作を開始した。外部の熱源からデバイス内の局所領域に熱を伝えるヒートガイド用の金属配線層の形成プロセスを確立し、小規模の熱電発電デバイスの試作で所望の発電性能が得られることを確認した。また、Si 結晶中のフォノン・ドラッグ機構を再現するモンテカルロシミュレータを開発し、Si ナノワイヤ中のフォノン輸送機構を解析した。滑らかな表面ラフネスを持つ Si ワイヤでは、幅を狭めることで、ゼーベック係数のフォノン・ドラッグ成分を保持しつつ、熱伝導率を低下させることが可能であることが示された。

CNTシートを使った熱電デバイス開発では、CNT配向を制御した不織布シートでシート面内方向に大きな温度勾配を付けることを可能にし、配向制御しない従来のシートより顕著に高い発電密度が得られることを実証した。

IV 族混晶薄膜に関して、高 Si 組成の  $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{Sn}_y$  薄膜(n 型)および  $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$  薄膜(p 型)で、共同研究者のさきがけプロジェクト(JPMJPR15R2)で得られた性能を上回る試料を新たに見出した。また、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  熱電デバイスの試作を行い、微細化・高集積化により発電密度が向上することを実証した。

また、熱電デバイスの社会実装形態の検討として、放射冷却による環境発電実験を実施した。夜間放射冷却に加え、昼間の太陽光放射加熱によっても温度差が生じ、得られた電力でセンシングデータの無線送信に成功した。

## § 2. 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
  - ・ 集積化 Si ナノワイヤ熱電モジュールの開発
  - ・ ナノスケール局所熱電物性評価
  - ・ IV 族混晶デバイス用プロセス技術の開発
  - ・ 変換効率の定式化
  - ・ プレーナ型熱電発電デバイスの社会実装形態の検討

### (2) 鎌倉グループ

- ① 主たる共同研究者: 鎌倉 良成 (大阪工業大 学情報科学部 特任教授)
- ② 研究項目

- ・ フォノン・ドラッグモンテカルロシミュレーション
- ・ 変換効率の定式化
- ・ プレーナ型熱電発電デバイスの社会実装形態の検討

(3) 藤ヶ谷グループ

① 主たる共同研究者: 藤ヶ谷 剛彦 (九州大学 工学研究院 教授)

② 研究項目

- ・ CNT シート伝導異方性制御技術の確立
- ・ パターンドーピング法の開発
- ・ CNT シート熱電デバイスの最適設計
- ・ CNT シート熱電デバイスの試作

(4) 黒澤グループ

① 主たる共同研究者: 黒澤 昌志 (名古屋大学 大学院工学研究科 講師)

② 研究項目

- ・ IV 族混晶半導体熱電材料の探索
- ・ IV 族混晶デバイス用プロセス技術の開発
- ・ IV 族混晶熱電デバイスの発電性能評価

【代表的な原著論文情報】

- 1) M. Matsumoto, K. Shima, R. Yamaguchi, M. Mukaide, M. Tomita, T. Ishida, T. Watanabe, T. Fujigaya, "Control Anisotropic Conduction of Carbon Nanotube Sheets and Their Use as Planar-type Thermoelectric Conversion Materials" Science and Technology of Advanced Materials Vol.22, pp.272-279 (2021).
- 2) R. Yokogawa, H. Takeuchi, Y. Arai, I. Yonenaga, M. Tomita, H. Uchiyama, T. Watanabe, and A. Ogura, "Anomalous low energy phonon dispersion in bulk Silicon-Germanium observed by inelastic X-ray scattering," Applied Physics Letter, Vol 116, 242104 (2020).
- 3) S. Y. Y. Chung, M. Tomita, R. Yokogawa, A. Ogura, and T. Watanabe, "Observation of an Unidentified Phonon Peak in SiGe Alloys and Superlattices Using Molecular Dynamics," ECS Transactions, Vol. 98, 533-546 (2020).
- 4) M. M. H. Mahfuz, M. Tomita, S. Hirao, K. Katayama, K. Oda, T. Matsukawa, T. Matsuki, T. Watanabe, "Designing a bilayer silicon-nanowire thermoelectric generator with cavity-free structure," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 60, SBBF07 (2021).
- 5) Y. Peng, H. Lai, C. Liu, J. Gao, M. Kurosawa, O. Nakatsuka, T. Takeuchi, S. Zaima, S. Tanemura, and L. Miao, "Realizing high thermoelectric performance in p-type  $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{Sn}_y$  thin films at ambient temperature by Sn modulation doping," Applied Physics Letters, Vol. 117, Issue 5, pp. 053903-1~5 (2020).