

2024 年度年次報告書

ナノ物質を用いた半導体デバイス構造の活用基盤技術

2023 年度採択研究代表者

竹延 大志

名古屋大学 大学院工学研究科
教授

二次元物質における超高密度キャリア制御

主たる共同研究者:

張 文馨 (産業技術総合研究所 先端半導体研究センター 主任研究員)

平原 佳織 (千葉大学 大学院工学研究院 教授)

丸山 実那 (筑波大学 数理物質系 助教)

宮田 耕充 (東京都立大学 大学院理学研究科 准教授)

研究成果の概要

本研究提案は、 $10^{14}/\text{cm}^2$ を超えるキャリア密度を実現可能な電気二重層 (EDL) ドーピング技術を駆使し、二次元半導体を基盤とする多機能デバイス開発を目指すものである。2024 年度は、以下の 3 点において顕著な進展が得られた。

第 1 に、ピエゾ応答力顕微鏡[1]および二次電子イメージング[2]を用いたモアレ構造評価技術を確立した。これにより、積層界面における構造と伝導特性の相関が明らかになりつつある。具体的には、 WSe_2/WS_2 ヘテロ接合を用いた PN 接合において、EDL 形成時の過渡応答を詳細に解析し、イオンのドリフト遅延に由来する複数の応答モードを検出した。また、界面品質が過渡特性や層間励起子の有無に大きな影響を与えることも明らかとなり、ヘテロ積層界面の電気特性と発光特性の関連性が示された。

第 2 に、 MoS_2 と Sb_2Te_3 電極を組み合わせた N 型 FET において、レジスト残渣の低減やプロセスの最適化を通じて、短チャネル素子 (ゲート長 $\sim 100 \text{ nm}$) 作製が可能となりつつある。これにより、微細デバイスへの展開が現実的なものとなった。加えて、P 型 FET への EDL ドーピング導入の可能性も拓いた[3]。

第 3 に、電解質の最適化とパルス電圧印加により、これまで困難とされてきた高電圧 ($> 10 \text{ V}$) 印加と高電流密度 ($> 100 \text{ kA}/\text{cm}^2$) が可能となった。これにより、EDL ドーピングの過渡応答を高精度で捉えることができ、デバイス動作時におけるキャリア注入の初期過程を時間分解的に解析する基盤が整いつつある。加えて、超高電流密度 ($> \text{MA}/\text{cm}^2$) 下での発光素子駆動やレーザー素子への展開も期待される。

これらの進展により、当初 4 年次以降に計画していた CMOS や発光素子の研究は前倒しで進展し、EDL を用いた熱電効果の研究も可能となるなど[4]、材料・プロセス・評価技術の全方位的な構築が進んでいる。特に、EDL の固定化および P/N 素子の両立は、次世代集積デバイス実現に向けた鍵であり、今後の展開が強く期待される。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Ou, H., Oi, K., Usami, R., Endo, T., Shinokita, K., Kitaura, R., Matsuda, K., Miyata, Y., Pu, J., Takenobu, T. Continuous Strain Modulation of Moiré Superlattice Symmetry From Triangle to Rectangle. *Small*, DOI:10.1002/sml.202407316.
- 2) Saitoh, K., Oyobe, T., Igarashi, K., Sato, T., Matsumoto, H., Inada, H., Endo, T., Miyata, Y., Usami, R., Takenobu, T. Surface sensitivity of atomic-resolution secondary electron imaging. *Microscopy*, **74**, 28–34 (2025).
- 3) Chang, W. H., Hatayama, S., Saito, Y., Okada, N., Endo, T., Miyata, Y., Irisawa, T. Thermally stable $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{WSe}_2$ Van Der Waals contacts for pMOSFETs application. *Sci. Rep.*, **14**, 28572 (2024).
- 4) Ito, S., Tanaka, H., Oshima, Y., Kanahashi, K., Ito, H., Chen, B., Ohta, H., Takenobu, T. Systematic investigation of charge transport and thermoelectric properties in semicrystalline polymers: electrochemical doping effects on doping level and temperature dependence using one sample. *Appl. Phys. Express*, **18**, 021002 (2025).