

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

2024 年度採択研究代表者

長汐 晃輔

東京大学 大学院工学系研究科
教授

ウエハースケール vdW エピタキシーの確立と 2D-CMOS 集積化のためのプロセス技術の構築

主たる共同研究者:

トシ ヴィンセント (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

長田 貴弘 (物質・材料研究機構 電子・光機能材料研究センター グループリーダー)

研究成果の概要

本研究では、c 面サファイア基板上に N 型 MoS₂ 及び、P 型 WSe₂ を vdW(van der Waals)エピタキシーにより単結晶成膜し、CMOS インバータ動作の実証を目指すものである。初年度である今年度は、成膜技術の確立を中心に研究を進めた。

単層 TMDC の単結晶成膜において、核生成時点で結晶方位を揃え、成長時にシームレスな粒接合を促すのが従来手法である。本研究では、c 面サファイア基板上における MOCVD による単結晶 MoS₂ の新しい成長メカニズムとして、スーパーセルの関係で予想される準安定的な方位関係で核生成・成長が起こるが、合体後に自己整合的に最安定ドメインに方位が揃い、粒界のない連続単結晶膜が形成されることを見出した。本手法による高品質な結晶性は、室温で 66 cm²/Vs、20 K で 749 cm²/Vs とフォノン散乱律速の高い移動度からも理解できる。

2 次元材料の欠陥密度の低減は、デバイス特性向上の鍵となる。CVD 合成時における酸素導入は欠陥密度の低減と同時に MoS₂ の成長速度を高めることが示唆されている。本研究では、最も高い移動度が期待できる WS₂ の酸素支援合成法を検討した。固体前駆体中の酸素の空間分布を分析した結果、酸素の存在によって前駆体材料の不完全な硫化の大幅な減少が確認されたことから、金属前駆体のより安定した供給に寄与したと考えられる。また、現時点で PL 強度と半値幅、キャリア移動度などの特性向上を得ている。

最後にデバイス化に関してであるが、high-k 絶縁膜である Er₂O₃ に関して問題であった誘電率の経時劣化に着目した。従来のレジストプロセスを用いたデバイス作製プロセスでは無く、MOCVD によりサファイア基板に製膜された MoS₂ 上に直接 Er₂O₃ を堆積し誘電率と関係する膜密度を計測したところ 100 日後においても経時劣化を示さなかった。本結果は、ゲートファーストプロセスによるデバイス作製により 2 次元材料上に優れた high-k 膜形成が可能であることを示している。

【代表的な原著論文情報】

- 1) K. Kanahashi, I. Tanaka, T. Nishimura, K. Aso, A. K. A. Lu, S. Morito, L. Chen, T. Kakeya, S. Watanabe, Y. Oshima, Y. Yamada-Takamura, K. Ueno, A. Azizi, K. Nagashio, "Dimensionality-induced transition from degenerate to non-degenerate states in Nb-doped WSe₂", **ACS nano**, 2025, 19, 10244.
- 2) S. Li, R. Otake, T. Nishimura, T. Taniguchi, K. Watanabe, Yoshiki Sakuma and Kosuke Nagashio, "Reliability Challenges in EOT Scaling with High-κ Er₂O₃ Dielectrics on 2D MoS₂ FETs", **ACS mater. lett.**, 2025, 7, 1993-2001.
- 3) Y. Wang, J. Nishida, K. Nakamoto, X. Yang, Y. Sakuma, W. Zhang, T. Endo, Y. Miyata, T. Kumagai, "Ultrafast Nano-Imaging of Spatially Modulated Many-Body Dynamics in CVD-Grown Monolayer WS₂", **ACS Photonics**, 2025, 12, 207-218.
- 4) J. Shen, A. Aljarb, Y. Cai, X. Liu, J. Min, Y. Wang, C. Zhang, C. Chen, M. Hakami, J.-H. Fu, H. Zhang, G. Li, X. Wang, Z. Chen, J. Li, X. Dong, V. Tung, G. Shi, I. Pinnau, L.-J. Li, and Y. Han, "Engineering grain boundaries in monolayer molybdenum disulfide for an efficient water/ion separation", **Science**, 2025, 387, 779-782.