

未来社会創造事業（探索加速型）
「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域
年次報告書（探索研究）

令和4年度採択研究開発代表者

[研究開発代表者名:長汐 晃輔]

[所属:東京大学 大学院工学系研究科・教授]

[研究開発課題名:2D材料 CMOS・デバイス集積化技術の開発]

実施期間:令和5年4月1日～令和6年3月31日

§1. 研究開発実施体制

(1)「デバイス」グループ(東京大学)

① 研究開発代表者:長汐 晃輔 (東京大学工学系研究科、教授)

② 研究項目

- ・ドーピング技術の確立
- ・P型動作のためのオーミック電極形成
- ・high-k/2D 界面特性向上
- ・集積化の検討

(2)「成膜・デバイス」グループ(産業技術研究所)

① 主たる共同研究者:入沢 寿史 (産業技術研究所、研究グループ付)

② 研究項目

- ・位置選択成長技術による素子配置技術の開発
- ・high-k/2D 界面特性向上
- ・P型動作のためのオーミック電極形成
- ・集積化の検討

(3)「成膜・構造」グループ(東北大学)

① 主たる共同研究者:吹留 博一 (東北大学電気通信研究所、准教授)

② 研究項目

- ・縦型 FET 構造
- ・集積化の検討

(4)「解析」グループ(筑波大学)

① 主たる共同研究者:蓮沼 隆 (筑波大学数理物質系、准教授)

② 研究項目

- ・high-k/2D 界面特性向上
- ・集積化の検討

(5)「モデリング」グループ(広島大学)

① 主たる共同研究者:飯塚 貴弘 (広島大学 HiSIM 研究センター、研究員)

② 研究項目

- ・大規模集積化にむけた物理モデル構築
- ・集積化の検討

§2. 研究開発成果の概要

本研究では、P型FETを確立し、集積化を目指したPNによる2D-CMOS動作実証を目指している。達成すべき事項は、(1)位置選択成長技術による素子配置技術の開発、(2)ドーピング技術の確立、(3)P型動作のためのオーミック電極形成、(4)high-k/2D界面特性向上、(5)縦型FET構造、(6)大規模集積化にむけた物理モデル構築である。

(1)に関して、産総研300mmラインでWプラグ構造をもつ位置選択成長用下地基板の一次作製を完了し、Wプラグ部を起点とするWS₂の位置制御成長実証実験を行った。H₂SとWF₆によるCVD成膜に関して、WプラグからのWS₂成長が確認された。SiO₂上への成長選択性に関しては、成膜条件の最適化により十分な選択性確保を狙う。(2)に関しては、Nbの置換量の異なるWSe₂試料のホール計測から不純物置換量による縮退/非縮退の遷移を2次元材料において初めて明らかにした。置換元素、置換量等、系統的に進めていく。(3)に関して、層状物質かつ状態密度の小さい狭バンドギャップ縮退半導体であるBi₂Te₃をp型WSe₂FETの電極として検討した。比較として用いたCr電極と比べ3桁以上のオン電流の増大を確認した。(4)集積化の展開を目指して、MOCVDにより2インチサファイア基板上に製膜されたMoS₂において、SiO₂/Si基板に転写後、FET特性評価を行った。移動度に関して、高いもので28cm²/Vs程度であり、世界的なMOCVD研究でのMoS₂と同等であった。(5)に関して、SiC基板上的グラフェンエピタキシャル成長、遮蔽膜として自然酸化膜付きAl膜構造形成、自己整合エッチング等により、今回、極短(膜厚~1nm)ゲート電極作製を達成した。(6)に関して、2次元半導体素子の電気的動作を仮想的に計算機上で模擬するため、商用ソフトウェアを用い、MoS₂極薄膜トランジスタの電気特性の計算が受忍しうる計算時間にて遂行可能であることを確認した。今後、さらなるグループ間の連携によりデバイス作製から計測までをシームレスに進めていく。

【代表的な原著論文情報】

- [1] Tomohiro Fukui, Tomonori Nishimura, Yasumitsu Miyata, Keiji Ueno, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, and Kosuke Nagashio, "Single-gate MoS₂ Tunnel FET with thickness-modulated homojunction", **ACS appl. mater. interfaces**, 2024, 16, 8993-9001.
- [2] Ryuichi Nakajima, Tomonori Nishimura, Kaito Kanahashi, Keiji Ueno, and Kosuke Nagashio, "Work function modulation of Bi/Au bilayer system toward p-type WSe₂ FET" **ACS appl. electronic mater.**, 2024 6(1), 144-149.
- [3] Yih-Ren Chang, Ryo Nanae, Satsuki Kitamura, Tomonori Nishimura, Haonan Wang, Yubei Xiang, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, and Kosuke Nagashio, "Shift current photovoltaics based on a noncentrosymmetric phase in in-plane ferroelectric SnS", **Adv. Mater.**, 2023, 35, 2301172.
- [4] Ryoichi Kato, Haruki Uchiyama, Tomonori Nishimura, Keiji Ueno, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Edward Chen, Kosuke Nagashio, "p-type conversion of WS₂ and WSe₂ by position-selective oxidation doping and its application in top gate transistors", **ACS appl. mater. interfaces**, 2023, 15(22), 26977-26984.
- [5] Supawan Ngamprapawat, Jimpei Kawase, Tomonori Nishimura, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Kosuke Nagashio, "From h-BN to graphene: characterizations of hybrid carbon-doped h-BN for applications in electronic and optoelectronic devices", **Adv. Electronic Mater.**, 2023, 2300083.