

二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出
2016 年度採択研究代表者

2020 年度 年次報告書

宮田 耕充

東京都立大学 大学院理学研究科
准教授

原子層ヘテロ構造の完全制御成長と超低消費電力・3次元集積デバイスの創出

§ 1. 研究成果の概要

2020年度は、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)原子層の成長技とデバイス要素技術に関して引き続き研究を進めてきた。特に、TMDCへのドーピング技術の開発に注力し、(i)分子塗布による安定な電子ドーピング、(ii)原子ビームによるTMDCへの異種遷移金属打ち込みについてそれぞれ進捗を得ることができた。前者に関しては、クラウンエーテル錯体を利用することで、MoS₂やWS₂等の各種TMDCへの電子ドーピングできることを見出した。単層MoS₂に関しては最大でキャリア密度が $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 程度まで増加でき、金属的な温度依存性を示すことを確認した。1月程度はドーピング後も大気中でほとんどトランジスタ特性が変化せず、半年以上経過した後も電子ドーピングが継続するなど、従来の電子ドーピングと比較しても高い安定性を示している。ドーピングにより電極-半導体界面の接触抵抗を減少させ、単層MoS₂電界効果型トランジスタにおけるオン電流の向上も実証できた。後者の金属打ち込みでは、超高真空中の原子ビームを用いてWSe₂中のWをNb等の別の遷移金属に置換できることを見出した。照射時間により置換濃度を調整でき、濃度に依存して電子輸送特性が変調可能である。これらの手法により、今後PNダイオード等のTMDCのデバイス研究を発展させていく。成長技術に関しては、結晶成長の速度論的挙動を詳細に調べると共に、結晶粒径拡大を図り、アルカリ金属フリーの条件下において、最大粒径で $3 \mu\text{m}$ を超える単結晶を得る事に成功した。極めて均一性と制御性が高く、高品質TMDCの大面積成膜への展開が期待される。

§ 2. 研究実施体制

(1) 宮田グループ(都立大)

- ① 研究代表者: 宮田 耕充 (東京都立大学 大学院理学研究科、准教授)
- ② 研究項目
 - ・MOCVDによる原子層ヘテロ構造の連続合成
 - ・原子層へのドーピング技術の開発
 - ・原子層の位置・方位制御成長

(2) 入沢グループ(産総研)

- ① 主たる共同研究者: 入沢 寿史 (産業技術総合研究所 デバイス技術研究部門、主任研究員)
- ② 研究項目
 - ・位置制御されたTMDC成長法の開発
 - ・3次元LSI用集積化プロセス開発
 - ・デバイス要素技術開発

(3) 森グループ(阪大)

① 主たる共同研究者: 森 伸也 (大阪大学 大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・第一原理電子状態計算
- ・バンド間トンネル透過確率の計算

(4) 北浦グループ(名大)

① 主たる共同研究者: 北浦 良 (名古屋大学 大学院理学研究科、准教授)

② 研究項目

- ・MOCVD 装置の設計と開発
- ・ヘテロ構造の成長とその基礎的評価

(5) 宮内グループ(京大)

① 主たる共同研究者: 宮内 雄平 (京都大学 エネルギー理工学研究所、教授)

② 研究項目

- ・新奇原子層物質の光学キャラクタリゼーション
- ・励起子ダイナミクス of 解明と制御

(6) 吉田グループ(筑波大)

① 主たる共同研究者: 吉田 昭二 (筑波大学 大学院数理物質科学研究科、准教授)

② 研究項目

- ・新しい STM 装置の構築
- ・欠陥、ドーパントの原子スケール計測
- ・光励起時間分解 STM による TMDC 原子層のキャリアダイナミクス計測

(7) 小林グループ(東大)

① 主たる共同研究者: 小林 正治 (東京大学・工学系研究科附属システムデザイン研究センター、准教授)

② 研究項目

- ・TMDC 成膜技術と強誘電体 HfO_2 成膜プロセスの融合によるトランジスタ形成技術の開発
- ・TMDC を用いた新規不揮発性メモリの検討

【代表的な原著論文情報】

- [1] Air-stable and efficient electron doping of monolayer MoS_2 by salt-crown ether treatment, H. Ogura, M. Kaneda, Y. Nakanishi, Y. Nonoguchi, J. Pu, M. Ohfuchi, T. Irisawa, H. E. Lim, T. Endo, K. Yanagi, T. Takenobu, Y. Miyata, *Nanoscale* 13 (2021) 8784–8789

- [2] Wafer-Scale Growth of One-Dimensional Transition-Metal Telluride Nanowires,
H. E. Lim, Y. Nakanishi, Z. Liu, J. Pu, M. Maruyama, T. Endo, C. Ando, H. Shimizu, K. Yanagi,
S. Okada, T. Takenobu, Y. Miyata, *Nano Lett.* 21 (2021) 243–249.
- [3] ALD-ZrO₂ Gate Dielectric with Suppressed Interfacial Oxidation for High Performance MoS₂
Top Gate MOSFETs,
W. H. Chang, N. Okada, M. Horikawa, T. Endo, Y. Miyata, T. Irisawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* 60
(2021) SBBH03-1-6.