

原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能  
2020 年度採択研究代表者

2022 年度  
年次報告書

丸山 茂夫

東京大学 大学院工学系研究科  
教授

単層 CNT に基づく一次元ヘテロナノ構造の制御合成と物性・機能設計

主たる共同研究者:

井ノ上 泰輝 (大阪大学 大学院工学研究科 助教)

末永 和知 (大阪大学 産業科学研究所 教授)

## 研究成果の概要

丸山 G では、原子層配列制御合成とデバイス構造設計の2つを主軸に研究を進展させた。まず、前者に関して、MoS<sub>2</sub> ベースの一次元ファンデルワールス(vdW)ヘテロ構造に加えて、W や Se を含む遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)ヘテロ構造を合成した。カーボンナノチューブの(CNT)-窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)テンプレート上に単層 WS<sub>2</sub> や MoSe<sub>2</sub> を成長し、ラマン、TEM、STEM-HAADF で構造評価した。異なる TMDC を組み合わせることで、異なる元素濃度の合金ナノチューブ動径方向や軸方向の接合も得られた。一方、デバイスの観点では、半導体/誘電体の界面トラップ密度を抑えたトランジスタの設計として、一次元ヘテロ構造が配向した高次構造を作製する方法を提案した(文献1)。合成した CNT アレイを部分的に宙に浮かせ、BNNT で被膜した結果、大気中分子による影響が排除され、ヒステリシスのない特性が得られた。また、デバイス基板においてもBNNTを光学分光で間接的に観察するための理論的な力学モデルを構築した。末永 G では、チーム内連携の中でヘテロナノチューブの原子レベルにおける元素種同定や局所的な物性測定のための高分解能電子顕微鏡や電子分光法の開発を引き続き行った。丸山 G が合成したヘテロ接合ナノチューブにおいて、外層を構成する Mo や W 原子を区別しその界面構造についての知見が得られるようになった。

井ノ上 G では、BNNT の外層へのグラフェン層の合成と構造分析を行った。ラマン分光計測により、合成条件に依存した結晶性の変化を明らかとし、末永 G による STEM-EELS 観察と合わせて、高結晶性グラフェン層のヘテロ成長を確認した(文献2)。より高温においてグラフェン層が連続した外層 CNT の形成を実現した。また、電子デバイス集積に向けて、テンプレートとなる単層 CNT を配向・架橋させる手法の確立を行った。水平配向 CNT をピラー状基板へ全面転写し、臨界点乾燥を用いて表面張力による CNT の破断やバンドル化の抑制に成功した。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) Matsushita, S.; Otsuka, K.; Sugihara, T.; Zhu, G.; Kittipaisalsilpa, K.; Lee, M.; Xiang, R.; Chiashi, S.; Maruyama, S. Horizontal Arrays of One-Dimensional van Der Waals Heterostructures as Transistor Channels. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15* (8), 10965–10973.
- 2) M. Kato, T. Inoue, Y. L. Chiew, Y. Chou, M. Nakatake, S. Takakura, Y. Watanabe, K. Suenaga, and Y. Kobayashi, “Coaxial heterostructure formation of highly crystalline graphene flakes on boron nitride nanotubes by high-temperature chemical vapor deposition,” *Appl. Phys. Express* **16**, 035001 (2023).