

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

2020 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

## § 1. 研究成果の概要

一次元ヘテロナノチューブを用いた電子デバイスの作製と評価を行った。架橋した単一の単層カーボンナノチューブ(SWCNT)と同心状に窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)および二硫化モリブデンナノチューブ(MoS<sub>2</sub>NT)を成長し、半径方向に半導体-絶縁体-半導体のヘテロ接合を形成した。転写後のヘテロナノチューブに電極を形成し、その電気特性を測定したところ、ダイオード特性を示し、1000以上の整流比が確認された。ファンデルワールス界面に基づき、直径11 nm程度の微細な同心配列構造の中に機能を付与することに成功したといえる。

こうしたデバイスの構築には、やはり材料の制御合成が重要である。一次元ヘテロナノチューブの成長メカニズム解明に対する一つのアプローチとして電子顕微鏡内レーザー照射システムを用いた材料成長のその場観察について検討を行った。この電子顕微鏡内レーザー照射技術は、レーザー誘起によっておこる様々な物理現象や化学反応を直接観察することができるため、ナノ材料の成長および物性発現メカニズムに迫る本研究課題において極めて重要な役割を果たすことが期待される。また、一次元ヘテロ構造の成長は曲率が極めて大きい面上のファンデルワールス接合に基づいている点で珍しく、その形成メカニズムと層間の相関を明らかにする必要がある。本年度は、化学気相成長法で合成した一次元ヘテロ構造の詳細な構造と形成メカニズムについて、透過型電子顕微鏡を用いた包括的な研究を行った。異なる形状のBNNTのエッジ構造を識別し、同一箇所に対して電子線回折によりそれぞれのカイラル角と極性が厳密に相関を持つことを見出した。加えて、SWCNTテンプレートとBNNTの対掌性の相関を明らかにした。これは一次元ヘテロ構造という新材料群の知見に留まらず、より一般的な観点から曲率半径数 nm の基板上での結晶成長としての波及効果も期待される。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 丸山グループ

① 研究代表者: 丸山 茂夫(東京大学大学院工学系研究科、教授)

② 研究項目

- ・ ヘテロナノチューブの合成制御
- ・ ヘテロナノチューブの物性評価
- ・ ヘテロナノチューブを用いたデバイス開発

### (2) 末永グループ

① 主たる共同研究者: 末永 和知(大阪大学産業科学研究所、教授)

② 研究項目

- ・ ヘテロナノチューブの超高分解能電顕観察および局所元素分析
- ・ ナノカーボン材料の成長過程観察
- ・ デバイス中ナノ構造の局所物性測定

### (3) 項グループ

① 主たる共同研究者: 項 栄(東京大学大学院工学系研究科、准教授)

② 研究項目

- ・ ヘテロナノチューブの合成制御
- ・ ヘテロナノチューブの構造解析
- ・ ヘテロナノチューブの制御メカニズム

#### (4) 井ノ上グループ

① 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)

② 研究項目

- ・ 合成・観察用の特殊構造基板作製
- ・ 電気特性・光電特性の計測
- ・ 電子・光電デバイス作製・評価, 薄膜形成

### § 3. 研究実施内容

#### 【代表的な原著論文情報】

- 1) Y. Feng, H. Li, T. Inoue, S. Chiashi, S. V. Rotkin, R. Xiang, and S. Maruyama, “One-dimensional van der Waals heterojunction diode,” *ACS Nano* **15**, 5600 (2021).
- 2) P. Wang, Y. Feng, R. Xiang, T. Inoue, A. Anisimov, E. I. Kauppinen, S. Chiashi, S. Maruyama, “Phenomenological model of thermal transport in films of carbon nanotubes and hetero-nanotubes,” *Nanotechnology* **32**, 205708 (2021).
- 3) A. Shawky, J.-S. Nam, K. Kim, J. Han, J. Yoon, S. Seo, C. S. Lee, R. Xiang, Y. Matsuo, H. M. Lee, S. Maruyama, I. Jeon, “Controlled Removal of Surfactants from Double-Walled Carbon Nanotubes for Stronger p-Doping Effect and its Demonstration in Perovskite Solar Cells,” *Small Methods*, 2100080 (2021).
- 4) W. Jang, B. G. Kim, S. Seo, A. Shawky, M. S. Kim, K. Kim, B. Mikkladal, E. I. Kauppinen, S. Maruyama, I. Jeon, D. H. Wang, “Strong dark current suppression in flexible organic photodetectors by carbon nanotube transparent electrodes,” *Nano Today* **37**, 101081 (2021).
- 5) L. Shi, R. Senga, K. Suenaga, H. Kataura, T. Saito, A. P. Paz, A. Rubio, P. Ayala, T. Pichler, “Toward Confined Carbyne with Tailored Properties”, *Nano Letters* **21**, 1096 (2021).
- 6) M. Maruyama, S. Okada, “Carrier Redistribution in van der Waals Nanostructures Consisting of Bilayer Graphene and Buckybowl: Implications for Piezoelectric Devices,” *ACS Applied Nano Materials* **4**, 3007 (2021).