

【助成 39-04】

1～2トランス次元系の設計・創出と電子物性

代表研究者 名古屋大学理学部 特任准教授 北浦 良

〔研究の概要〕

本研究では、独自の結晶成長法を用いてナノスケールの二次元半導体の構造を制御し、新機能を持つ二次元半導体の創製を試みた。特に、接合幅が 10 ナノメートル以下の二次元接合構造に着目し、それを用いて超短チャネルトランジスタの実証など、新しい光電子機能の開発に取り組んだ。この一連の研究により、接合幅が原子 1 個分しかない超微細な接合構造を初めて実現するとともに、接合構造に特徴的な光学特性を発見することに成功した。現在、超短チャネルデバイスの実証に向けたデバイス作製プロセスの開発を進めており、近い将来、一定の成果を得ることができると考えている。

〔研究経過および成果〕

次元性は物質のバンド構造を左右し、光学的・電子的な性質に大きな影響を与える。例えば、グラフェンでは、多層構造であるグラファイトを単層にすることで、ディラック・コーンと呼ばれる特徴的なバンド構造が出現し、質量のないディラック電子が現れることが知られている。この発見を契機として、グラフェンを含む多様な二次元系の研究が急速に発展し、二次元系の研究は現在の材料研究で最も活発な分野の一つとなっている。

次元性による物性変化は、2 次元への変化に限らず、1 次元への変化においても現れる。例えば、グラフェンを巻き上げたカーボンナノチューブではバント端の状態密度が発散し、特徴的な光学応答が見られる。本研究では、2 次元層状構造に 1 次元構造を埋め込んだ新奇ナノ構造(二次元接合構造)を制御して生み出す手法を確立するとともに、その光・電子物性探索を行った。

本研究では、本研究では有機金属化学気相成長(MOCVD)法を用いて、まるでレゴを組み立てるように

二次元接合構造をプログラム構築できる手法の確立を行った。MOCVD 法は、液体原料に Ar をバブリングし、原料蒸気を反応室に送り込み、加熱された基板上で反応させる方法である。原料の供給量はマスフローコントローラー(MFC)で制御され、原料の供給はソレノイドバルブ(SV)の開閉で行われる。構造制御性および再現性の向上をめざし、MFC、SV、基板温度制御を自動制御し、ボタン一つで成膜を行う自動成膜装置の開発をはじめに行った。以下に、開発した装置の概要を示す。

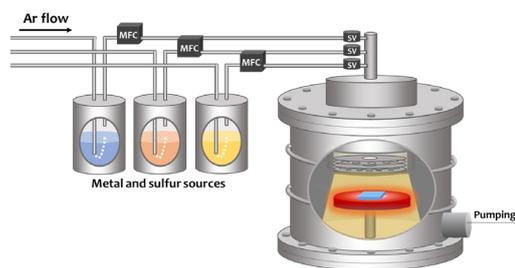


図 1. MOCVD 装置の概略図、バブリングによって原料をチャンバーに供給し、加熱した基板上に吹き付けることで結晶成長を行う。

本実験では、開発したプログラムを用いて、六方晶窒化ホウ素基板上に Et_2S 供給下で $(\text{t-Bu}=\text{N})_2\text{W}$

(NMe₂)₂ と (t-Bu=N)₂Mo(NMe₂)₂ を交互供給して、2次元 WS₂/MoS₂ 接合構造を作製した。AFM 像には、結晶内部に WS₂ および MoS₂ に対応する明暗のコントラストが見られ、MoS₂ 幅は 10 nm 以下と極めて細いことがわかった。また、AFM の高さプロファイルより、結晶の厚みはおよそ 1.0 nm であったことから作製した構造は単層であることがわかった。次に、接合界面の原子レベルの構造解析を行うため、球面収差を補正した走査透過型電子顕微鏡(STEM)を用いた高角度環状暗視野(HAADF)観察を行った

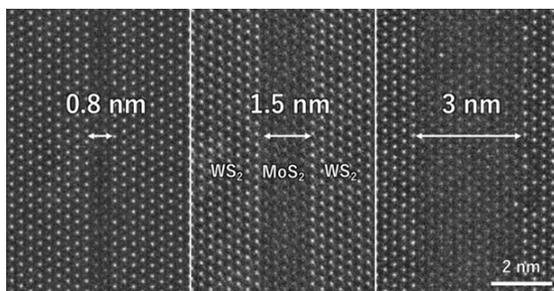


図 2. WS₂/MoS₂ 接合構造の HAADF-STEM 像。接合界面が原子レベルで平坦であることがわかる。

図 2 に示したのは、異なる太さを持つ WS₂/MoS₂ 接合構造の HAADF-STEM 像である。HAADF 像では、原子番号に強く依存したコントラストが付き、W 原子が最も明るく、Mo 原子がそれよりも暗く観察される。左から Mo 原料の供給時間を 15~60 秒で変化させて成長させた 2 次元接合構造の界面付近の像であり、供給時間に応じて 0.8 ~3 nm の接合幅が実現できていることがわかる。0.8 nm の接合幅は、これまでに報告されている作製された 2 次元接合構造の中で最も細いものである。また、予備的結果ながら、最近単原子の接合も実現することができた。実現した接合界面は原子レベル急峻であり、接合界面で原子の混合は起こっていない。

WS₂/MoS₂ 接合構造の光応答性には、1.55eV 付

近に WS₂ や MoS₂ 単体では現れない新たなピークが観測された。WS₂/MoS₂ 接合構造のバンド計算の結果を考え合わせると、この発光は MoS₂ の伝導帯から WS₂ の価電子帯への遷移によるものであると考えられる。また、1.55eV の新しいピークの強度の励起光強度に対する対数プロットの傾きは 0.5 であり、このピーク強度は励起光強度に対して強く飽和していることもわかった。

[発表論文]

1. Nanami Ichinose, Mina Maruyama, Takato Hotta, Zheng Liu, Ruben Canton-Vitoria, Susumu Okada, Fanyu Zeng, Feng Zhang, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Ryo Kitaura. Two-dimensional atomic-scale ultrathin lateral heterostructures. arXiv:2208.12696
2. Takato Hotta, Haruna Nakajima, Shohei Chiashi, Taiki Inoue, Shigeo Maruyama, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Ryo Kitaura. Trion confinement in monolayer MoSe₂ by carbon nanotube local gating. Applied Physics Express. 16 [1] (2023) 0150012022
3. Sihan Zhao, Ryo Kitaura, Pilkyung Moon, Mikito Koshino, Feng Wang. Interlayer Interactions in 1D Van der Waals Moiré Superlattices. Advanced Science. 9 [2] (2022) 2103460
4. Kaoru Hisama, Yanlin Gao, Mina Maruyama, Ryo Kitaura, Susumu Okada. Continuous Fermi level tuning of Nb-doped WSe₂ under an external electric field. Japanese Journal of Applied Physics. 61 [1] (2022) 015002