

審査の結果の要旨

氏名 鄭永嘉

本論文は *Synthesis and structure characterization of one-dimensional van der Waals heterostructures* (一次元ファンデルワールスヘテロ構造の合成と構造評価) と題し、単層カーボンナノチューブ (Single-walled carbon nanotube, SWCNT) をテンプレートとして窒化ホウ素ナノチューブ (Boron nitride nanotube, BNNT) や遷移金属ダイカルコゲナイド (Transition metal dichalcogenide, TMD) のナノチューブ (TMD-NT) の合成が可能となることを示したものであり、全8章から構成される。

第1章は、Introduction (序論) であり、カーボンナノチューブやBNナノチューブなどの1次元材料、グラフェンやhBNなどの2次元材料、さらにこれらのファンデルワールスヘテロ構造に関する研究動向と本論文の研究目的を議論している。

第2章は、Experimental means (実験手法) である。1次元材料や2次元材料の合成と構造評価の実験手法として、化学気相堆積法 (Chemical vapor deposition, CVD 法)、ラマン分光法、走査型電気顕微鏡 (SEM)、透過型電気顕微鏡 (TEM)、吸収分光について議論している。特に、TEMグリッド上のSWCNT薄膜のモフォロジーを特定し、CVD前後のTEM観察で同一のSWCNTを比較する独創的な手法を提案している。

第3章は、CVD synthesis of SWCNT-BNNT heterostructures (SWCNT-BNNTヘテロ構造のCVD合成) である。グラフェンと六方晶系窒化ホウ素 (Hexagonal boron nitride, h-BN) は同じ2次元構造を有し、原子間距離もほぼ等しい。グラフェンを用いる多くのデバイスにおいては、高安定かつ絶縁性のhBNのサンドイッチ構造がよく用いられている。同様に1次元のSWCNTとBNNTの同心構造ナノチューブが実現すれば理想的なデバイスとなることが期待されている。本章では、BN源のガスを用いた独自のCVD技術を実現して、SWCNTの外層に同心のBNNTを合成することに成功している。

第4章は、CVD synthesis of MoS₂ based heterostructures (MoS₂を用いたヘテロ構造のCVD合成)である。2次元材料として知られているMoS₂などの遷移金属ダイカルコゲナイドのナノチューブが、SWCNTやSWCNT@BNNTをテンプレートとして同心状に合成できることを示している。TEMやSTEM-EDXに加えて、吸収分光やラマン分光によって、新規一次元ヘテロ構造を評価している。

第5章は、Growth mechanism (合成メカニズム)であり、CVD法によってSWCNTの外層にBNNTが形成されるメカニズムについて議論している。SWCNTをテンプレートとするBNNTの成長は、BNチューブ末端にホウ素原子と窒素原子のペアが次々と結合するopen-end成長であることを示している。また、アモルファスカーボンの堆積物がBNNTの核成長の起点となることを実験的に示している。

第6章は、Structure analysis (構造解析)である。ヘテロ構造SWCNT@BNNTについて、内層のSWCNTと外層のBNNTのカイラル角を同定して比較することによって、これらに相関がないことを明らかとしている。ただし、右巻き・左巻きのらせんの巻き方の選択制については、内層のSWCNTと外層のBNNTに相関があり、内層のSWCNTと外層のBNNTが同じらせん方向になる場合が多いことを明らかとしている。

第7章は、Properties of 1D heterostructures (一次元ヘテロ構造の物性)である。一次元ヘテロ構造の物性として、薄膜の熱伝導率や光学特性について議論するとともに、電子デバイス応用の可能性を示している。

第8章は、Closing remarks (結論)であり、上記の研究結果をまとめたものである。

以上要するに本論文は、単層CNTをテンプレートとする各種ヘテロナノチューブのCVD合成と構造解析について述べたものであり、新たな一次元ヘテロナノチューブ構造を提案している。本論文はナノマテリアルの合成制御に関する新たな知見を与えており、ナノ材料工学及び分子熱工学の発展に寄与するものだと考えられる。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。