

審査の結果の要旨

氏名 徐昇柱

本論文は “**Functionalizations of single-walled carbon nanotubes and their application on solar cells** (単層 CNT の機能化と太陽電池応用)” と題し、単層カーボンナノチューブ(CNT)の機能化によって、ペロブスカイト型太陽電池の高性能化を実現したものである。具体的には、半導体型単層 CNT を用いたペロブスカイト薄膜の結晶サイズ制御及びパッシベーションの実現、および、ペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池の応用に向けた単層 CNT 透明電極の開発である。論文は、全 5 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の様々な物性やそれを利用した太陽電池について系統的に議論するとともに、シリコン太陽電池およびペロブスカイト型太陽電池におけるカーボンナノチューブの応用及びその機能化の現状について議論している。

第 2 章は、**Grain size control and passivation of perovskite films with s-SWNT additives for highly efficient perovskite solar cells** (半導体型単層 CNT の添加によるペロブスカイト薄膜の結晶サイズ制御及びパッシベーション) である。ペロブスカイト薄膜の結晶性を向上させるために、添加剤として様々な有機ポリマーが用いられているが、低いモビリティがペロブスカイト型太陽電池の高効率化のボトルネックとなっている。界面活性剤(デオキシコール酸ナトリウム)で分散された半導体型単層 CNT をペロブスカイト結晶成長時に添加剤として用いることで、効果的にペロブスカイト結晶サイズを拡大し、パッシベーションの機能ももたらすことを明らかにした。さらに、半導体型単層 CNT がペロブスカイト層からのキャリア取り出しを向上させることにより、19.5%の光電変換効率を達成した。

第 3 章は、**Highly efficient metal-free semi-transparent Perovskite solar cells enabled by MoO₃-doped transparent carbon nanotube top electrodes and four-terminal**

Perovskite silicon tandem applications (カーボンナノチューブ透明電極を用いた高性能半透明ペロブスカイト型太陽電池の開発及び 4 端子型ペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池への応用) である。ペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池は太陽光の広範囲の波長領域を発電に利用できることで注目されている。光の短波長側を発電に利用するタンデム構造のトップセルにおいて、半透明ペロブスカイト型太陽電池の変換効率の向上と共にボトムセルへの光透過(透過率)を最大化する必要がある。変換効率と透過率の向上はトップセルに用いられる透明対向電極に強く依存することから、適切な透明対向電極の利用がタンデム型太陽電池の性能に鍵となる。本章では、酸化モリブデン (MoO_3) を単層 CNT 上に真空蒸着することで、単層 CNT が高い透過率を保持しつつ、ホールドーピングされることを示し、 MoO_3 の等価厚さの最適化と単層 CNT のドーピング効果を明らかにした。この MoO_3 をドーパントとして用いた単層 CNT を用いてペロブスカイト型太陽電池を製作し、単層 CNT 電極を用いたペロブスカイト型太陽電池における世界記録となる 20.25% の変換効率を実現した。また、これをトップセルとした 4 端子型ペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池の性能をデバイスシミュレーションによって議論している。

第 4 章は、Conclusions (結論) であり、上記の研究成果をまとめたものである。

以上要するに本論文は、ペロブスカイト型太陽電池において、適切な機能化を施した単層 CNT を応用することにより、極めて高性能な太陽電池が製作できることを実証している。本論文は、ナノマテリアルの機能化および光電変換デバイス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。