

氏 名	Zhang Chao
学 位 の 種 類	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 8060 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 29 年 3 月 24 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
審 査 研 究 科	数 理 物 質 科 学 研 究 科
学 位 論 文 題 目	Probing Nanomaterial Properties in a High-resolution Transmission Electron Microscope (高分解能透過型電子顕微鏡内でのナノ材料特性測定)
主 査	筑波大学教授(連係大学院) Ph.D. Dmitri Golberg
副 査	筑波大学教授(連係大学院) 理学博士 佐々木高義
副 査	筑波大学准教授(連係大学院) 博士(工学) 深田直樹
副 査	筑波大学教授 博士(工学) 佐々木正洋

## 論 文 の 要 旨

審査委員(ゴルバーグ教授、佐々木(高)教授、深田准教授、佐々木(正)教授)は、Chao Zhang 氏の博士論文を慎重に審査した。その結果、今回の公聴会で述べられた TEM‘その場’観察による研究成果は、世界トップレベルに値すると、審査委員全員が一致して結論した。また、Zhang 氏の発表のあとに行われた質疑応答において、いくつかの重要な項目が指摘され、それに対する Zhang 氏からの回答があった。深田准教授から、硫化カドミウム(CdS)-シリコン(Si)ナノワイヤーヘテロ接合におけるバンド構造に関連して、電子顕微鏡内で近接場光観察の可能性について質問があった。さらに、ヘテロ接合における電荷輸送に関連して、2成分界面の状態が重要な要素であることが指摘され、原子レベルで平滑な界面を実現する可能性について質問があった。また、佐々木(正)教授から、酸化亜鉛(ZnO)ナノワイヤーの歪みに伴う光誘起電流スペクトルのピーク分裂に関し、ピーク分裂とピーク幅拡大との違いについて質問があった。佐々木(高)教授からは、測定中の電子線照射の影響について質問があった。また、リチウムおよびナトリウムイオン電池に関する TEM 内電流測定に関しても質問があった。さらに、ゴルバーグ教授から、TEM の代わりに SEM が利用できる可能性について、さらに、真空中の測定ではなく、最近リチウムイオン電池の研究に用いられている環境セル型の TEM 試料ホルダーが利用できる可能性について質問があった。

Zhang 氏は、これら全ての質問に対し、追加のスライドを使いながら適切に回答し、彼の研究内容への理解度、さらには背景となる物理学、化学、材料科学に関する知識が、博士号に見合う十分な高さを持っていることを示した。最後に、審査委員全員が、今回の公聴会での発表およ

び研究内容は十分なレベルにあり、博士号の称号に値するものと認めた。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

Chao Zhang 氏の博士論文では、最新の TEM‘その場’測定技術を用いて、様々なナノ材料で観察されるいろいろな物理-化学現象について詳細に研究を行った結果が述べられている。

序章(第1章)では、本研究に関連する先行研究を説明するとともに、本研究の背景と目的を記述している。

続いて、第2章では、独自開発をした斬新な TEM‘その場’観察システムについて述べ、先端が極めて尖った金属探針の作製方法、ナノ物質試料の取り付け方法についても記述している。候補者とその共同研究者によって開発された、斬新かつトップレベルの装置群と、それによって明らかにされる物理-化学現象についても、網羅的に述べられている。

第3章では、世界で初めて実施された、硫化カドミウム(CdS)とリンがドーピングされたシリコン(P-doped Si)ナノワイヤーのヘテロ接合に対する TEM 内‘その場’実験の結果について述べられている。この実験では、ボトムアップによる新規機能デバイスの構築を実現しており、まさに「ナノアーキテクニクス」のコンセプトを実践するものである。

第4章では、リンをドーピングしたグラフェンによるサンドイッチ構造を持った陽極を利用したナトリウムイオン電池について、TEM 内‘その場’解析を行った結果が述べられている。この形状を持った陽極では、グラフェンを含まない陽極と比べて、充放電に伴う陽極の劣化が抑えられることが確認され、ナトリウムイオン電池の実用化・製品化に向け極めて重要な知見を与えることができた。

第5章では、酸化亜鉛(ZnO)ナノワイヤーにおいて、歪みに起因した光電流スペクトルの分裂現象について解析結果が述べられ、その分裂幅はナノワイヤーの歪みに比例することが示されている。この現象は、全く新しい超高感度歪みセンサーに応用できるものと期待される。

第6章では、硫化カドミウム(CdS)ナノワイヤーに関して、TEM 内で 100 回を超える曲げ伸ばしを実施した結果、ナノワイヤーがフレキシブルな光電素子として応用し得ることが示されたことを述べている。ナノワイヤーが示す光誘起電流は、一本一本については大きなばらつきを持っているものの、数百本のナノワイヤーを総合すると、暗電流と光照射下での電流の比が10倍程度の安定した性能を発揮することを明らかにしている。この結果は、光-電気-ピエゾを組み合わせた新しい素子の可能性を指し示すものと言える。

最終章で、以上の実験結果をまとめるとともに、これら新しい‘その場’観察技術が持つ今後の可能性について述べている。候補者は、今後の可能性として、電気物性測定、機械物性測定、熱物性測定、光物性測定をハイブリッドに組み合わせた、TEM 内‘その場’測定を提案しており、これによって、フレキシブルなナノ電子デバイス、イオン電池、スーパー蓄電池、光センサーなど、ナノ材料のスマートデザインへ発展させられることを述べている。

〔最終試験結果〕

平成 29 年 2 月 14 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。