

氏名	Xiaolong Zhang
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第9384号
学位授与年月日	令和2年3月25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	

Study on Si/Ge Core-Shell Nanowires and Their Alloy Structures for Future Electronic Devices (次世代電子デバイスのための Si/Ge コアシェル構造および合金組成ナノワイヤの研究)

主査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	深田 直樹
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	都甲 薫
副査	筑波大学准教授(連係大学院)	博士(理学)	山口 尚秀
副査	筑波大学准教授(連係大学院)	PhD	石井 智

## 論文の要旨

審査対象論文は、次世代トランジスタ開発に関する課題に対して、シリコン(Si)およびゲルマニウム(Ge)を利用したヘテロ接合をナノワイヤ構造の直径方向に形成した新構造の構築および位置ドーピング制御による不純物散乱の抑制を目的とした、高移動度トランジスタチャネルの開発に関するものである。1次元構造を有するナノワイヤの直径方向内部に Si および Ge からなるヘテロ接合を構築したコアシェルナノワイヤと呼ばれる特殊な構造を構築し、Si 中のみボロン(B)による p 型不純物ドーピングを行うことで、ホールガスを Ge 中に形成できる。この構造では、不純物のドーピング領域(Si)とキャリアの輸送領域(Ge)を分けることができるため、ナノ構造デバイスで重要課題であった不純物散乱のないチャネルを実現する高電子移動度トランジスタ(HEMT)構造をナノワイヤ内部に構築できるという特徴を有する。

ヘテロ接合から形成されるコアシェルナノワイヤでは、ヘテロ界面の制御が重要となる。本論文では、ヘテロ接合界面での Si および Ge の相互拡散について熱処理温度、熱処理時間、雰囲気ガス種および雰囲気ガス圧依存性を詳細に調べ、相互拡散を抑制した急峻な界面を得るプロセス条件を明らかにしている。特に、相互拡散を抑制する条件として雰囲気ガス圧を低くした高真空条件が有効であるという新しい知見を見出している。

本論文ではヘテロ接合界面の制御条件のもとに、金属触媒反応を利用したボトムアップ手法による p-Si/intrinsic (i)-Ge コアシェルナノワイヤおよび p-Si/i-Ge/p-Si コアダブルシェルナノワイヤの成長制御

技術を確立し、不純物未ドーピング領域である **i-Ge** 層へのホールガスの蓄積まで実証できている。更に、ナノインプリント法と反応性イオンエッチング法を組み合わせたトップダウン的手法でも、**p-Si/i-Ge** コアシェルナノワイヤおよび **p-Si/i-Ge/p-Si** コアダブルシェルナノワイヤの成長制御を可能にし、デバイス応用において重要となる配列・サイズ制御およびホールガスの蓄積実証まで成功している。**p-Si/i-Ge/p-Si** コアダブルシェルナノワイヤでは、**p-Si** コアに加えて最外殻 **p-Si** シェルからも **i-Ge** 層へのホールガスの蓄積を行えるため、ホールガス濃度の増大を可能にし、シェル層の形成、ドーピング濃度によるホールガス濃度の制御を可能にしている。

ヘテロ接合から形成されるコアシェルナノワイヤおよびコアダブルシェルナノワイヤに加えて、**Si** および **Ge** から形成される **Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>** 合金ナノワイヤの成長制御から不純物ドーピングに関する研究も実施している。**Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>** 合金ナノワイヤの形状は、原料ガスであるモノシランガスおよびゲルマンガスの流量費、成長温度およびドーピング濃度に強く依存することを明らかにしている。本論文では、全組成領域での **Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>** 合金ナノワイヤの形成制御に成功している。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

審査対象論文に記載されている **p-Si/i-Ge** コアシェルナノワイヤは次世代の高速トランジスタチャンネルとして期待されている材料であり、ナノワイヤ構造の形成法、**Si** および **Ge** 相互拡散を抑制した急峻なヘテロ界面制御、位置制御不純物ドーピング制御法およびホールガスの蓄積実証を中心に質疑応答を行った。審査対象論文では、従来のボトムアップ的手法に加えてトップダウン的手法により **p-Si/i-Ge** コアシェルナノワイヤの配列・サイズ制御、**Si** および **Ge** 相互拡散を抑制した急峻なヘテロ接合界面を実現する手法の確立、正確な位置制御ドーピングまで確立できている点が評価された。更に発展的な構造として、**p-Si/i-Ge/p-Si** コアダブルシェルナノワイヤの結果も報告された。最も顕著な成果として評価された点は、分光学的手法により不純物がドーピングされていない **i-Ge** 層へのホールガス蓄積を世界に先駆けて実証できた点にあり、ナノ構造デバイスで重要課題であった不純物散乱のないチャンネルを実現する高電子移動度トランジスタ (**HEMT**) 構造をナノワイヤ内部に構築した成果といえる。更に、全組成領域での **Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>** 合金ナノワイヤの形成制御に関する成果は、ナノワイヤ構造のバンドギャップを制御でき、新たなデバイス応用に繋がる成果として評価された。

以上の成果は、半導体ナノ構造体を利用した次世代高速・低消費電力トランジスタデバイス実現のための重要な知見になると高く評価された。

[最終試験結果]

令和 2 年 2 月 10 日、数理物質科学研究科学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。