

氏名	孫 永烈		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 10232 号		
学位授与年月日	令和 4 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	Vertically Aligned Group-IV Semiconductor Nanowires and Nanotubes for Electronic and Optoelectronic Applications (電子・光電子デバイス応用を目指した垂直配列IV族半導体ナノワイヤおよびナノチューブの形成制御)		
主査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	深田 直樹
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(理学)	唐 捷
副査	筑波大学准教授(連係大学院)	Ph.D.	石井 智
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	都甲 薫

論文の要旨

審査対象論文は、次世代トランジスタおよび蓄電材料等のエネルギー関連材料に関する課題に対して、IV族半導体材料であるシリコン(Si)およびゲルマニウム(Ge)を中心に新規材料としてゲルマニウムスズ(GeSn)を利用したナノワイヤおよびナノチューブ構造のサイズ・配列制御、ナノワイヤ内部へのヘテロ接合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となっている。

Ge_{1-x}Sn_x材料を利用したナノワイヤの形成実験では、Sn自己触媒に加えて金(Au)を1次元ナノワイヤ構造の支援触媒として利用した独自の気相-液相-固相(VLS)成長により、Ge_{1-x}Sn_xナノワイヤの成長に成功している。VLS成長を利用すると、疑似的に融点直下での成長をGe-Sn-An三元合金の共晶温度付近の低温で実施できることになる。Ge結晶中へのSnの融点付近での最大固溶度は1at%程度であるが、VLS成長を取り入れたことで最大Sn組成7 at%の実現に成功している。更に、ナノワイヤの直径と成長方位に関するモデルを立て、シミュレーションにより実験結果を説明することに成功している。

Ge_{1-x}Sn_xナノワイヤはVLS成長を利用したボトムアップ的手法で成長されたが、将来のデバイス応用を考えると、ナノワイヤのサイズ・配列制御技術の確立は重要となる。審査対象論文では、サイズ・配列制御可能で、従来の電子ビームリソグラフィを利用した手法に比べて短時間で大面積にパターン形成できるナノインプリントリソグラフィ技術と反応性イオンエッチングを組み合わせた手法によりGeナノワイヤの配列制御法を確立している。更に、形成されたGeナノワイヤの表面にSi層をエピタキシャル成長することで、配列制御されたGe/Siコアシェルナノワイヤの形成にも成功している。Siシェル層にはボロン(B)によるp型ドーピングが行われている。ヘテロ接合から形成されるコアシェルナノワイヤでは、ヘテロ界面の制御が重要であり、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。Si中のみ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。最終的に、ラマン分光法により観測されるGe光学フォノンピークに現れるFano干渉により、Geナノワイヤ中へのホールガスの蓄積まで実証できている。

更に、ナノワイヤの形成法を応用してナノチューブ構造の配列制御法も確立している。ナノチューブ構造の研究では、ナノチューブの外形と内径をそれぞれ制御できており、表面ラフネスの低下も達成できている。光学特性を評価することで、ナノチューブ構造がナノワイヤに比べて優れた低反射特性を示すことにも成功している。

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ネルおよび高容量バッテリー材料等に期待されている材料である。本審査では、各種ナノワイヤおよびナノチューブ構造の形成法、コアおよびシェル層の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が行われた。審査対象論文では、まず将来の高速チャネルとして期待されている $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ 材料を利用したナノワイヤの形成に関する成果を報告している。高移動度化のポイントは、Sn組成を上げることであり、本研究ではSn自己触媒を利用したVLS成長という特殊な成長法を採用することで、熱平衡では1at%が限界であるところを、最大で約7at%までSn組成を上げること成功している。更に、ナノワイヤの直径と成長方位に関するモデルを立て、シミュレーションからも実験結果を説明することに成功している点が評価された。

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ナノワイヤの配列・サイズ制御、その配列制御されたナノワイヤを利用したi-Ge/p-Si コアシェルナノワイヤの形成制御、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も評価された。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た成果といえる。更に発展的な構造として、ナノチューブ構造の精密な配列制御にも成功しており、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および高容量バッテリーの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4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。