



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Synthesis and Characterizations of Vertical Ferromagnetic MnAs/Semiconducting InAs Heterojunction Nanowires [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	小平, 竜太郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13514号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74178
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryutaro_Kodaira_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 小平 竜太郎

審査担当者 主 査 教 授 本久 順一

 副 査 教 授 高橋 庸夫

 副 査 教 授 橋詰 保

学位論文題名

Synthesis and Characterizations of Vertical Ferromagnetic MnAs/Semiconducting InAs Heterojunction Nanowires

(強磁性体 MnAs/半導体 InAs 縦型ヘテロ接合ナノワイヤの成長と評価に関する研究)

本学位論文の著者が述べている通り、半導体エレクトロニクス産業は主にトランジスタの微細化を予言したムーアの法則に従い発展してきたが、現在確立されている Si-CMOS トランジスタ技術は寸法スケージングの物理的な限界を迎えつつあると指摘されており、素子の微細化のみによるトランジスタ性能の向上が困難な状況である。そこで新たな材料・素子構造、あるいは新たな自由度・機能性を付加することによるトランジスタの高性能化が探求されているが、その有力候補の一つとして注目されている技術が「垂直自立型半導体ナノワイヤ (NW)」である。NW 構造によりこれまで不可能であった異種材料 (ヘテロ) 接合構造の実現が可能になるばかりか、チャネルを 360 度電極で覆うサラウンディングゲート構造の作製が可能となり、その高いゲート制御性から短チャネル効果の抑制や高 ON/OFF 比等、素子特性の大幅な向上が見込める。また半導体 NW はナノスピントロニクス分野においてもその素子応用が期待されており、磁性材料と III-V 族化合物半導体 NW のハイブリッド構造に関する研究が数多く報告されている。これらの報告では、従来技術の vapor-liquid-solid (VLS) 法により NW 構造が作製されている例が多く、ナノスピントロニクス素子応用に向け、金属触媒の混入による素子特性の劣化、NW の位置・サイズ制御が困難な点などが課題となっている。

こうした背景を踏まえて本論文で著者は、強磁性体 MnAs ナノクラスタ (NC) と半導体 InAs NW を複合した縦型ハイブリッド NW 構造を作製する手法として、有機金属気相選択成長 (SA-MOVPE) 法を新たに開発し、その実験結果の詳細を報告している。SA-MOVPE 法は、半導体基板上に堆積した微小開口部を有する非晶質 SiO₂ 膜を用いることで従来技術で必須の金属触媒を必要とせず、かつ NW の位置・サイズ制御を可能にするボトムアップ型成長手法であるため、極めて有望な手法である。NiAs 型六方晶構造 MnAs は室温、またはそれ以上の高いキュリー温度を有し、大きな磁気抵抗効果を示すことから注目を集めている。また InAs は、その高い電子移動度と強いスピン軌道相互作用から、スピントロニクス素子 (例えば、Datta-Das-Type-Spin FET) のチャネル材料の有力候補として期待されており、スピントロニクス分野においても近年盛んに研究されている。この MnAs/InAs ハイブリッド NW をナノスピントロニクス素子に応用するためには、高効率のスピン注入を可能にする高品質な磁性体/半導体界面と、強磁性体の磁化方向の高い制御性が要求される。これらの要求を充たすため本論文では、縦型強磁性体 MnAs/半導体 InAs ヘテロ接合 NW を作製し、これをチャネル材料に用いたサラウンディングゲート構造を有する新奇のナノスピ

ントロニクス素子の実現に向け、その磁気特性および磁気輸送特性評価を行っている。

本論文は第 1 章から第 7 章までで構成されている。第 1 章では、はじめに近年半導体エレクトロニクス産業が抱える課題と背景、そのブレークスルーとなり得る垂直自立型半導体 NW および強磁性体/半導体複合材料についてまとめている。また本論文で扱う強磁性体 MnAs/半導体 InAs ヘテロ接合 NW のナノスピントロニクス素子応用に向けた優位性について説明している。第 2 章では、半導体 NW の研究が辿る歴史と、その特徴・利点について説明した後、代表的な半導体 NW の成長手法である VLS 法と MOVPE 法について概説している。第 3 章では、MOVPE 法の基本的な成長プロセスや成長装置について述べ、本論文で縦型 NW を作製するために用いた SA-MOVPE 法の基本的な成長特性を説明している。続いて本論文の最大の特徴である、縦型強磁性体 MnAs/半導体 InAs ヘテロ接合 NW の作製および磁気特性・磁気輸送特性評価用素子の作製に使用したプロセス技術と、その特性評価方法について説明している。さらに第 4 章では、縦型強磁性体 MnAs/半導体 InAs ヘテロ接合 NW の作製と結晶構造評価、成長条件依存性について詳細に記述する共に、これらの結果を基に、縦型 MnAs/InAs ヘテロ接合 NW の構造制御に向け、MnAs NC の成長メカニズムに関する考察を行っている。まず、580,490 度 C で MnAs NC を成長した 2 種類のサンプルについて、透過型顕微鏡を用いた結晶構造評価結果を示している。この結果から、高温 (580 度 C) で MnAs NC を成長することで、原子レベルで急峻な界面を有する縦型 MnAs/InAs ヘテロ接合 NW が形成することを明らかにしている。また NiAs 型六方晶構造 MnAs の c 軸が閃亜鉛鉱構造 InAs の [111]B 方向と平行であることを示しており、これらの特徴は素子応用に向けて MnAs NC の磁化方向を制御するための大きな利点となる。次に、結晶構造評価から得られた種々のデータと成長条件依存性評価の結果を基に MnAs NC の成長メカニズムを提案している。最後に縦型 MnAs/InAs ヘテロ接合 NW 中の MnAs NC のサイズや形状制御を目的にした成長時間依存性評価の結果を示している。第 5 章では、作製した MnAs/InAs ヘテロ接合 NW 中の MnAs NC の磁化および磁区についての磁気特性評価を行っている。MnAs NC は単磁区構造を示しており、第 4 章で行った結晶構造評価と比較することで、NiAs 型六方晶構造 MnAs の磁化容易軸 (a 軸) 方向に磁化されることを確認している。また、高いアスペクト比を有する NC では磁化困難軸である c 軸方向に磁化し得ること、屈曲した MnAs/InAs ヘテロ接合 NW で確認された MnAs NC の保磁力の減少について考察している。第 6 章では、縦型半導体 NW を用いた新奇のナノスピントロニクス素子実現に向けて、母体となる InAs および、MnAs/InAs ヘテロ接合 NW に対し、NW 一本単独での磁気輸送特性評価を行っている。外部磁場印加時、InAs NW では正の磁気抵抗効果だけでなく、低温領域では普遍的伝導度揺らぎと弱局在効果による負の磁気抵抗効果が観測されている。また外部印加磁場の角度依存性に関する評価結果も示し、InAs NW チャネル中の輸送モデルについて考察している。一方、MnAs/InAs ヘテロ接合 NW では負の磁気抵抗効果が観測されたため、この原因について考察している。第 7 章では、以上の結果をまとめている。

これを要するに、著者は、新奇の強磁性体 MnAs/半導体 InAs 縦型ヘテロ接合 NW の成長と評価に関する新しい知見を得たものであり、半導体ナノテクノロジー及びスピントロニクス分野の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。