



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 小平 竜太郎

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）

近年の半導体エレクトロニクス産業の発展は、ムーアの法則に従い主にトランジスタ等の素子の微細化によってもたらされてきた。しかし、現在産業化レベルで確立されている Si-CMOS 技術は、寸法スケージングの物理的な限界を迎えつつあり、素子の微細化のみによるトランジスタ性能の向上が難しくなっている。そこで新たな材料や素子構造、もしくは新たな自由度や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要求されている。その有力候補のひとつとして注目されているのが垂直自立型半導体ナノワイヤ (NW) である。NW によりこれまで不可能であった異種材料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の vapor-liquid-solid 法 (VLS 法) で作製されている場合も多く、ナノスピントロニクス素子応用に向けて、金属触媒の混入による素子特性の劣化や、NW の位置・サイズ制御が困難である点などが課題として挙げられる。

そこで本研究では有機金属気相選択成長法 (SA-MOVPE 法) により作製する、強磁性体 MnAs ナノクラスター (NC) と半導体 InAs NW の縦型ハイブリッド NW を取り上げる。SA-MOVPE 法とは、半導体基板上に堆積した微小開口部を有する SiO_2 薄膜により、金属触媒を必要とせず、かつ NW の位置・サイズ制御を可能としたボトムアップ型成長手法である。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 をスピントロニクス素子に応用するためには、高効率でスピン注入を行うための高質な磁性体/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。そこで本研究ではこれらの要求を充たすために、縦型強磁性体 MnAs/半導体 InAs ヘテロ接合 NW を作製し、この縦型 NW 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て、その磁気特性および磁気輸送特性評価を行う。

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説明する。また本研究で扱う強磁性体 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記述する。最後に本研究の目的と各章の構成を示す。

第 2 章では、半導体 NW の研究が辿る歴史と、その特徴・利点について説明する。また代表的な半導体 NW の成長手法として、VLS 法と MOVPE 法について触れる。

第 3 章では、MOVPE 法の基本的な成長プロセスや成長炉について述べ、本研究で縦型 NW を形成するために用いた選択成長法の基本的な成長特性を説明する。また、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記述する。

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。またこれらの結果を基に、縦型 MnAs/InAs ヘテロ接合 NW の構造制御に向けて、MnAs NC の成長メカニズムに関する考察を行う。はじめに、580, 490 度で 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す。この結果から、高温 (580 度) 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 が形成することが明らかになった。また NiAs 型六方晶構造 MnAs の c 軸は閃亜鉛鉱構造 InAs の (111)B 方向と平行であり、これ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唱する。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す。

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う。まず、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た。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と、屈曲した MnAs/InAs ヘテロ接合 NW において確認された MnAs NC の保磁力の減少について考察する。

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デバイスの実現に向けて、InAs および MnAs/InAs ヘテロ接合 NW に対して、NW 一本単独での磁気輸送特性評価を行う。外部磁場を印加したとき、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た。また InAs NW に対する外部印加磁場の角度依存性についての結果も示し、その輸送モデルについて考察を行う。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、この原因についても考察する。

第 7 章では、以上の研究結果をまとめる。