HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Control of Formation and Magnetic Domain Structures in Selectively-Grown MnAs Nanostructures [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	堀口, 竜麻
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14589号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81328
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryoma_Horiguchi_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　堀口　竜麻

審査担当者　主　査　特任教授　橋詰 保
副　査　教　授　本久 順一
副　査　教　授　植村 哲也

学位論文題名

Control of Formation and Magnetic Domain Structures in Selectively-Grown MnAs Nanostructures
（選択成長した MnAs ナノ構造の形成及び磁区構造制御に関する研究）

近年 CMOS 集積回路では、スケーリング則に基づいて素子を微細化することで、性能の向上を図ってきた。しかし、微細加工技術の物理的な限界等から新たな動作原理に基づいた素子の実現が求められている。そこで、電子が持つ電荷・スピンの 2 つの自由度を利用したスピントロニクス分野が注目されている。特に 2 つの強磁性層で絶縁薄膜を挟んだ磁気トンネル接合 (MTJ) は、大きな磁気抵抗効果を有することから、スピントランジスタ (FET) 等の半導体スピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。これまで、Si 基板上にソースおよびドレイン電極として MTJ 電極を使用した spin-transfer-torque MOSFET や MTJ 素子と CMOS-FET を備えたレーストラック型メモリセルアレイが提案され、研究されてきた。このような MTJ 構造の作製手法として、強磁性金属の薄膜蒸着後のエッチング加工によるトップダウン型製造技術が主に用いられてきた。しかし、このような従来の作製手法では、エッチングプロセスによるダメージや欠陥生成およびサイズの不均一性が問題となっており、デバイスの極微細化に伴う性能劣化の一因となっている。

そこで本研究では、有機金属気相選択成長 (SA-MOVPE) 法により半導体基板上へ選択成長した MnAs ナノ構造について取り上げている。SA-MOVPE 法は、半導体基板上に堆積した微小開口部を有する絶縁膜を用いることで、開口部のみに選択的に結晶成長を行うことを可能としたボトムアップ型作製技術である。また、リソグラフィ技術を利用するためサイズ、位置、形状の制御性が良く、ボトムアップ型作製手法のため良好な結晶性を持つ等、デバイス作製に向け優れた特徴を有する。さらに、本研究で取り扱う NiAs 型六方晶構造 MnAs は室温以上の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。特に、GaAs 中に MnAs ナノクラスタが埋め込まれたグラニュラー層 (GaAs:MnAs) を用いた MTJ 構造において 100,000% を超える高い磁気抵抗効果が報告されている。このような MTJ 素子では 2 つの強磁性体の磁化配列により素子を流れる電流が変化するため、強磁性体の磁区構造制御が重要となる。そこで本研究では、スピントロニクスデバイス応用に向け、MnAs ナノ構造の磁区構造制御及び磁化方向制御を目指し、主に Si(111) 基板上に選択成長した MnAs ナノディスク (ND)、及び GaAs(111)B 基板上に選択成長した横型 MnAs ナノワイヤ (NW) の構造評価及び磁区構造・磁化方向の印加磁場依存性評価を行い、詳細に議論している。

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、近年の半導体エレクトロニクス産業が抱える課題と背景について説明した後、そのブレークスルーとなり得る半導体スピントロニクス素子について説明している。また本研究で扱う MnAs の結晶構造及び物理的な性質につい

てまとめ、最後に本研究の目的と各章の構成を示している。第 2 章では、強磁性体における磁区構造について説明した後、磁区構造の制御で重要となる結晶磁気異方性、形状磁気異方性について述べている。第 3 章では、本研究で MnAs ナノ構造の作製に用いた選択成長法である MOVPE 法の基本的な成長プロセスや成長炉について述べている。また、MnAs ナノ構造の成長評価及び磁区構造評価を行う上で用いた方法について記述している。第 4 章では、Si(111) 基板上へ AlGaAs ナノピラーバッファを成長した後、選択成長した MnAs ND のマスク材料及びマスクパターン依存性について説明している。円形開口部の存在する $100 \times 100\,\mu m^2$ の外側にある SiO_2 薄膜を取り除いたマスクパターンを用いて成長した場合、MnAs ND 上に意図しない Si 原子を約 17% 含む MnAsSi の成長を確認しており、Si 基板中にも意図しない MnSi の成長を確認している。一方、円形開口部のみを有する SiON 薄膜を用いて成長させた場合には、上記の問題は確認されておらず、この原因について考察を行っている。第 5 章では、形成した MnAs ND における磁区構造及び磁化方向の外部印加磁場依存性評価を、磁気力顕微鏡 (MFM) を用いて行っている。as-grown 状態において、4×10^4 nm^2 以下の面積を有する ND(Group S) では単磁区構造が、6×10^4 nm^2 以上の面積を有する ND(Group L) では多磁区構造が支配的であり、その磁化方向は ND の稜線方向に分布することを示している。また、ネール磁壁を有する ND とブロッホ磁壁を有する ND を確認している。故にネール磁壁を有する ND とブロッホ磁壁を有する ND が混在する可能性について詳細な議論を行っている。さらに、Group S では、外部印加磁場-1.5 kG において、単磁区構造を有する ND の割合が最小化し、Group L では、外部印加磁場-0.5 kG において、Group S と比較すると明瞭ではないが単磁区構造を有する ND の割合が最小化することを示しており、これらの結果について議論している。第 6 章では、横型 MnAs/AlGaAs NW に対して、構造評価及び磁区構造・磁化方向の印加磁場依存性評価を行っている。反射電子像及び二次電子像による観察の結果、高いアスペクト比及び明瞭な結晶ファセットを有する NW の形成を確認し、さらに MFM 測定の結果から、外部印加磁場 2.0 kG において単磁区構造を有する NW と多磁区構造を有する NW を確認している。しかしながら、外部印加磁場-5.0 kG においても磁化反転は確認できず、NW 端において MFM コントラストの急峻な変化を確認しており、この原因について考察している。第 7 章では、各章で述べた研究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 ナノ構造のボトムアップ型選択形成手法の確立と構造制御、さらにその磁区構造評価と制御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。