

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02727

研究課題名(和文)シリコン上の縦型ナノワイヤスピントランジスタのボトムアップ集積

研究課題名(英文)Bottom-Up Integration of Vertical Nanowire Spin-Transistors on Silicon

研究代表者

原 真二郎 (Hara, Shinjiro)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・准教授

研究者番号：50374616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：独自技術により半導体基板上に位置・サイズ制御してボトムアップ作製した高アスペクト比の垂直自立型半導体ナノワイヤ(NW)に、磁気トンネル接合(MTJ)電極によるヘテロ接合NWを用いた縦型NWスピン電界効果トランジスタの実現を目指し、主にInAs、Si、MnAs/InAs系NWチャンネル中の電子散乱過程・輸送現象の評価、MTJ電極で用いるCoFe膜の外部磁場印加による磁化方向制御技術の確立、Si、Ge系NWチャンネルの選択形成技術、絶縁層埋め込み・NW頭出しプロセスにより強磁性体Ni電極を形成したNW1本の磁気輸送特性評価等について成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題の最終目標である縦型NWスピン電界効果トランジスタの実現には至っていないが、それを達成すべく推進した種々の要素技術・物性評価に関する成果が多数得られた。計画通り、国内・海外研究協力先との連携を積極的に推進することで、素子設計の具体的な指針を得られたことの社会的意義は大きい。本課題で得られた種々の要素技術を結集して、今後の研究推進により最終的な目標である縦型素子実用化が近づいた。また実用化に直接結びつく成果のみならず、NWチャンネル中の電子散乱過程等の擬次元メソスコピック系物性物理や、強磁性体薄膜を電極パターン化する場合の磁化制御等に関する基礎的な理解が深まった学術的意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to create and integrate vertical nanowire-spin-transistors, in which vertical semiconductor nanowires (NWs) are used with magnetic tunnel junction (MTJ) electrodes, on semiconducting substrates, e.g., Si. Such vertical NW-spin-transistors are realized using free-standing NWs with a high aspect ratio fabricated by our bottom-up-type formation method in a reproducible manner in terms of a location and size of NWs on substrates. We succeeded in obtaining some experimental results mainly relating to quasi-one-dimensional mesoscopic phenomena of electron scattering and magnetotransport in NWs, control of magnetization switching in patterned CoFe nanolayers of CoFe/MgO-MTJ electrodes by external magnetic fields, selective-area growth of Si and Ge NWs based on a vapor-solid-liquid method, and magnetotransport properties of a nanowire with ferromagnetic Ni electrodes after carrying out the established device fabrication processes for burying and exposing NWs.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：垂直自立型ナノワイヤ スピンエレクトロニクス スピントランジスタ ボトムアップ メソスコピック系

1. 研究開始当初の背景

磁性の起源である電子や原子核のスピン物性と従来の半導体素子との「Beyond CMOS」の融合化技術を目指し、強磁性体/半導体複合材料や希薄磁性半導体等により具現化されつつある半導体スピントロニクス研究では、電界・光誘起磁性の発見、スピン MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET)、熱電変換スピン流素子等、高機能素子実現に向けて魅力的な研究が盛んである。また従来の半導体ナノテクノロジー分野では、トップダウン型微細加工がナノ構造作製手法として産業化レベルで開発されてきた。しかし加工損傷や加工寸法の限界等の課題から、原子を 1 つ 1 つ積み上げるいわゆる、ボトムアップ型ナノテクノロジーが幅広い分野で今後の産業技術として必要不可欠となった。そうした中、半導体デバイスとシステムに関する国際ロードマップ (IRDS) でも Si-CMOS 技術の次世代を担う技術と予測され、2000 年頃から急速に研究が盛んになった半導体ナノワイヤ (NW) は、ピエゾ発電素子・ガラス基板上のナノ LED・高効率太陽電池等、グリーンナノエレクトロニクス素子の試作に加え、縦型 NW-MOSFET 向け CMOS 回路プロセスの設計等の報告によりこれまで以上に注目を浴び、実用化に向かって着実に前進している。[J. H. Choi *et al.*, *Nature Photon.* **5**, 763 (2011); J. Wallentin *et al.*, *Science* **339**, 1057 (2013); T. H. Bao *et al.*, *Proc. ESSDERC 2014*, 102 (2014)]

2. 研究の目的

独自の半導体 NW 技術と半導体スピントロニクス技術の融合により、(1) 垂直自立型 (縦型) 半導体 NW (直径~数 10 nm, 高さ~数 μm) と強磁性体トンネル障壁電極によるヘテロ接合 NW を用いた垂直自立型 NW スピントランジスタの実現、(2) 材料を問わず種々の結晶ウエハ上で位置・サイズ制御可能で、原子レベルで急峻な単結晶ヘテロ接合界面の形成が可能な新奇のボトムアップ型集積技術の基盤確立を目的とする。従来のトップダウン型微細加工では、格子定数や結晶構造が異なる材料間の高品質なヘテロ接合結晶薄膜形成は困難であったが、ナノ領域に結晶成長を制限する独自のボトムアップ型選択形成技術を駆使し、これまでに無い垂直自立型 NW スピントロニクス技術の提案と基盤構築を目指す。

3. 研究の方法

GaAs (111)B 及び Si (111)基板上で位置・サイズ制御した III-V 族化合物半導体 (InAs 系) および IV 族半導体 (Si, Ge 系) による垂直自立型 NW の作製を行った。NW スピントランジスタである NW-spin-FETs のチャネル材料候補である InAs 系 NW (高スピン軌道相互作用 (SOI) 材料) に関しては、電子線描画で非晶質 SiO_2 膜に周期的な円形開口部を形成したマスク基板上 (図 1(a)) の有機金属気相 (MOVPE) 選択成長 (図 1(b)) により、これまで取得した成長条件、成長温度 580°C 、成長時間 30 分の下、 $(\text{CH}_3)_3\text{In}$ 及び AsH_3 原料とキャリアガスの水素を用いて作製した。また、もう 1 つの NW スピントランジスタである NW-spin-MOSFETs のチャネル材料候補である Si, Ge 系 NW (低 SOI 材料) については、当初の計画通り、国内研究協力者である物質・材料研究機構 (NIMS)・深田直樹博士グループとの学外連携の下、NW 形成位置制御のための金触媒薄膜パターンニングを用いた、新たな気相-液相-固相成長 (VLS) 法による選択形成技術の開発を進めた。本研究代表者の研究室に所属する大学院学生が NIMS (つくば) に滞在し、化学気相堆積 (CVD) 装置を用いた結晶成長実験を行い、Si, Ge 系 NW が基板に垂直 ($\langle 111 \rangle$ 方向) に成長する条件を取得する目的で、金膜厚、 SiH_4 および GeH_4 原料ガス分圧、成長温度等の成長パラメータ依存性を詳細に調査した。

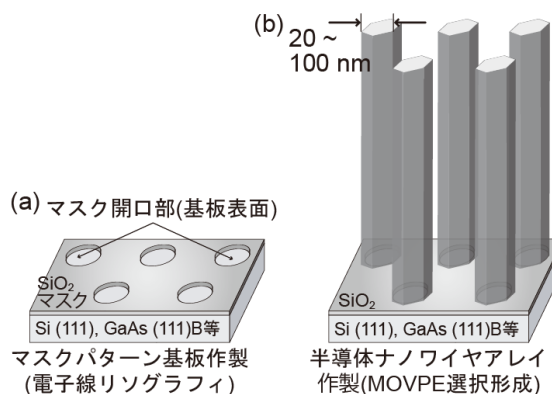


図 1: 母体テンプレートとなる垂直自立型 InAs 系 NW の MOVPE 選択成長

は、当初の計画通り、国内研究協力者である物質・材料研究機構 (NIMS)・深田直樹博士グループとの学外連携の下、NW 形成位置制御のための金触媒薄膜パターンニングを用いた、新たな気相-液相-固相成長 (VLS) 法による選択形成技術の開発を進めた。本研究代表者の研究室に所属する大学院学生が NIMS (つくば) に滞在し、化学気相堆積 (CVD) 装置を用いた結晶成長実験を行い、Si, Ge 系 NW が基板に垂直 ($\langle 111 \rangle$ 方向) に成長する条件を取得する目的で、金膜厚、 SiH_4 および GeH_4 原料ガス分圧、成長温度等の成長パラメータ依存性を詳細に調査した。

擬 1 次元メゾスコピック系物性物理の解明を目的として、作製した縦型 NW を根元から機械的に剥離、酸化膜除去後、別の SiO_2/Si (111)基板上に横倒し、その NW 上に種々の電極を形成した種々の試料を作製した。本研究代表者と研究室所属の大学院学生がギーセン大学 (ドイツ) に滞在し、海外研究協力者であるギーセン大学 (ドイツ)・P. J. Klar 教授及び M. T. Elm 博士グループと連携の下、磁気輸送特性・磁気抵抗 (MR) 効果及びそれらの外部磁場印加角度依存性、測定温度依存性等、基礎物性評価を実施した。

また、ナノワイヤデバイスプロセスの確立を目的として、半導体産業で通常用いられる低誘電層間絶縁膜、ハイドロジェン-シルセスキオキサン樹脂 (HSQ) 絶縁膜による NW の埋め込み・再露出プロセスの開発を行った。最終的な NW 素子では、単磁区化かつ磁化方向制御のため、MTJ 電極を NW 上で平坦化かつ形状異方性パターンニングして形成する必要があるため、溶媒 (MIBK: メチルイソブチルケトン) による HSQ の希釈条件、HSQ のスピニコティングによる膜厚制御性や加熱・熱処理条件、NW 再露出のための CF_4 によるドライエッチング条件 (膜厚制御性) 等、必要となるプロセス条件を取得した。(ただし、本研究期間終了間際に、製造メ

一カより HSQ 絶縁膜の製造中止の案内があり、現在まで、国内研究協力者との間で代替品の検討を継続してきたが、東京応化工業製・OCD 無機型 SiO₂ 平坦化塗布液を代替品の第 1 候補に今後実験を進める。）

さらに、通常のスピンコトランジスタでも用いられている CoFe/MgO 系磁気トンネル接合 (MTJ) 電極では、マグネトロンスパッタ法等で堆積した CoFeB, CoFe 系磁性体薄膜の磁化特性が一般的に、下地の化合物半導体の結晶方向に依存することが知られているが、磁化率 (M-H) 曲線の結晶方位依存性に関する報告がほとんどで、[M. Dumm *et al.*, *J. Appl. Phys.* **87**, 5457 (2000); A. T. Hindmarch *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 117201 (2008); T. Akiho *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 02BM01 (2012)] CoFe 系薄膜の磁区構造を磁気力顕微鏡 (MFM) 等の手法により直接的に観察し、その詳細を報告した例は、本研究代表者の知る限り 1, 2 例と数える程度である。[R. Pulwey *et al.*, *J. Appl. Phys.* **91**, 7995 (2002)] したがって本研究では、実際に CoFe 単膜を GaAs (001) 方位基板にマグネトロンスパッタ法により堆積し、室温下の MFM 測定により磁区構造・磁化方向の外部印加磁場 (B) 方向及び強度依存性評価を実施し、CoFe 薄膜電極パターン形状・方向、CoFe 層厚に対する依存性評価に関する実験を行った。さらに、GaAs (001) 基板に、実際の素子を想定した CoFe (10 nm)/MgO (1 nm)/CoFe (5 nm)-MTJ 電極を作製して、磁化率測定 (M-H 曲線) を行った。HSQ 絶縁膜埋込・頭出し後の NW に MTJ 電極を形成するため、非晶質 HSQ 絶縁膜上にも CoFe 単膜を堆積した試料を作製しているが、良質膜の堆積条件の取得に時間を要している。なお、本研究で作製した CoFe 膜の固相組成は Co_{0.8}Fe_{0.2} とした。以上については、国内研究協力者である北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST)・赤堀誠志准教授グループとの学外連携の下、実施した。以上のように実施した種々の実験で得られた主な研究成果を下記にまとめる。

4. 研究成果

InAs-NW チャンネル中の電流と外部磁場 (B) 印加方向の角度に依存した磁気輸送特性評価を進め、電子輸送現象の系統的なメカニズム構築に向け、測定試料数を増して実験を進めた結果、NW 表面での電子散乱過程の温度および印加磁場強度依存性に関する種々の知見を得た。一例として、MR 効果評価の結果を概説する。低温 4 K, B = +10 T の条件において、InAs-NW と平行に B 印加した場合、MR は +10% 程度であったが、NW と垂直に B 印加した場合、+20% 程度の正の MR 効果を示した。通常の正の MR 効果は印加 B 強度の 2 乗に比例するため、B² 特性では B² に対して MR は線形に変化する。図 2 は、低温 4 K で得られた MR の B² 特性 (B = 0 ~ 10 T) および、InAs-NW に対する B 印加方向依存性を示す。図 2 から明らかなように、NW と垂直に B 印加した場合、線形特性からの逸脱を示している。本研究で得られた異常な角度依存 MR 効果のメカニズムの解明のため、透過型電子顕微鏡による断面観察と数値シミュレーションを実施した結果、InAs-NW 表面には、比較的大きな表面粗さを有する 3 ~ 5 nm 厚の自然酸化膜が形成されており、それに起因する NW 中の自由キャリアの拡散界面散乱 (diffuse boundary scattering) による効果の寄与で説明されることが分かった。また、InAs-NW の磁気輸送特性評価の参考試料として測定を進めていた、MnAs 強磁性体ナノ構造を含む縦型 MnAs/InAs ヘテロ接合 NW では、InAs-NW の正の MR 効果と異なり、低温 4 K, B = +10 T の測定条件下で -10% 程度の負の MR 効果を示した。本試料では、MR 効果測定時の高抵抗が課題であったが、原因を探るべく委託した第一原理による理論計算の結果、金属/半導体界面、つまり MnAs/InAs 界面にショットキ障壁は生じず、界面のエネルギー障壁が高抵抗の主要因ではないとの知見を得ている。ただし、MnAs から InAs-NW へのスピン偏極電流注入は、キャリアの伝導型や濃度に強く依存するため、詳細な評価は継続中である。

次に、金触媒を用いた CVD 装置による Si および Ge 半導体 NW の選択成長実験を実施し、結晶成長条件 (SiH₄ および GeH₄ 原料ガス分圧・成長温度・金触媒薄膜厚等) 依存性実験を行った。ここでは主に、評価結果が比較的揃っている Si-NW について概説する。金薄膜 4 nm・高 SiH₄ 分圧で成長した Si-NW では成長レートが高く、NW の配向 (基板からの NW の成長方向) はランダムで、直径の小さな NW 形成が支配的であった。一方、金薄膜 4 nm・低 SiH₄ 分圧の条件と共に、金触媒 8 nm・SiH₄ 分圧 106 Pa の条件下で成長した Si-NW は直径が大きく、パターンニングの所望の位置に選択的に成長する傾向が強くなり、基板から垂直方向 (<111> 方向) に成長する NW が多く確認された。Si-NW の成長方向を詳細に調査するため、基板からの NW 成長角度 θ と NW 直径を測定した結果を図 3 (次頁) の分布図にまとめる。縦軸左は基板からの NW 成長角度 θ を、縦軸右はそれに対応するダイヤモンド型 Si 結晶の結晶方向を示している。60 nm 程度の NW 直径では、SiH₄ 分圧を増加する程 NW の成長方向にばらつきがあり、低 SiH₄ 分圧

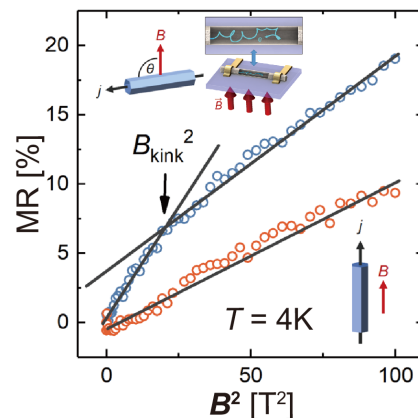


図 2: InAs 半導体 NW の MR 効果の外部磁場の 2 乗 (B²) 特性と NW に対する B 印加方向依存性 [Nano Lett. **20**, 618 (2020)]

になるにつれ、垂直方向 (<111>方向) の割合が増加することがわかる。NW 成長角度 θ から推定した NW の結晶方向から、低 SiH_4 分圧では<111> 方位に成長しやすく、 SiH_4 分圧増加に伴い<111> 方向に加えて、<112>や<100>方向に成長する傾向が確認できる。さらに NW 直径の大きいもの程、<111>方向に成長する傾向が得られた。これは Si (001)基板上に成長した Si-NW に関する他グループからの報告と良い一致を示している。[Y. Wu *et al.*, *Nano Lett.* **4**, 433 (2004)] また、金薄膜が比較的厚い条件と低 SiH_4 分圧下で成長させた NW において、垂直方向 (<111>方向) 成長の傾向が確認される結果は、成長開始 (過飽和) までの共晶液滴中で Si 濃度の増加率が低いことが一因と推察される。金薄膜が比較的厚い条件では、金触媒 (粒子) の表面体積比が小さく、共晶液滴中の Si 濃度の増加が遅いと考えられる。また低 SiH_4 分圧の場合、 SiH_4 から金触媒に溶け込む Si が少なく、触媒同士で凝縮を繰り返し過飽和に至ると考えられる。NW の成長方向制御の詳細なメカニズム解明には至っていないが、本研究の実験結果は、NW 直径と共に、原料ガス分圧と金属触媒サイズによる共晶液滴中の Si 濃度制御が重要であることを示唆している。以上の通り、好適な条件範囲が極めて狭いが、比較的高真空条件下での SiH_4 原料ガス供給による選択成長では、Si (111)ウェハと垂直な<111>方向のみに Si 半導体 NW を作製可能との知見を得ており、直径 90 nm、高さ 500 nm 程度の垂直自立型 Si-NW を作製することに成功した。ただし、NW の不均一成 長と低成長速度が依然課題として残る。国内研究協力者との議論等の結果、リフトオフに伴う Au/Si 界面汚染による金触媒の不活性化が一因と考えており、その観点からプロセスを見直した結果、電子線リソグラフィ用レジストによる汚染が主要因と考えられるため、酸素アッシング等、Au 薄膜堆積前の表面処理を検討した。さらに、実際の Ge/Si コアシェル NW チャネルで用いる Ge-NW の VLS 選択成長実験を並行して進め、Si ウェハ上の金触媒膜厚、選択成長条件等に対する依存性評価を行った。実験結果の詳細な解析を継続中であるが、Si に比べ Ge-NW では比較的良好な垂直方向 NW 成長が確認されており、Ge をコア層とする Ge/Si-NW 選択成長実験を進めている。

続いて、MTJ 電極作製では、CoFe 薄膜の磁区構造が電極パターンの形状 (アスペクト比)・方向、CoFe 層膜厚に強く依存するとの明瞭な知見を得た。CoFe 層膜厚を 10, 20 nm とした試料を準備したが、全ての構造において室温で明瞭な自発磁化を確認した。膜厚を 20 nm とし、外部磁場を一切印加しない as-depo 状態の CoFe 薄膜では、アスペクト比が 1、すなわち正方形パターン (例えば $2.0 \times 2.0 \mu\text{m}^2$ パターン) において、環流磁区が支配的であることを確認した。また、アスペクト比の増加に従って、CoFe 薄膜の磁区構造は、単磁区構造が支配的となった。さらに高アスペクト比の形状、特に $0.5 \times 2.0 \mu\text{m}^2$ パターンにおいて、その長手方向が GaAs (001)基板の<110>方向と平行な場合 (図 4 の Is (2, 0.5))、単磁区構造が確認された。一方<1-10>方向と平行な場合においては、二磁区構造が確認された。GaAs (001)基板上的 $\text{Co}_{0.66}\text{Fe}_{0.34}$ 薄膜では面内一軸磁気異方性が報告されており、[M. Dumm, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **87**, 5457 (2000)] 本研究で直接観測された基板結晶方位に依存する磁区構造は、面内一軸磁気異方性に起因すると考えられる。膜厚 10 nm の CoFe 薄膜 $0.5 \times 2.0 \mu\text{m}^2$ パターンでは、長手方向が GaAs (001)基板の<1-10>方向と平行な場合においても単磁区構造が観測されており、本研究の結果は、CoFe 薄膜の磁区構造制御ではサイズおよびアスペクト比だけでなく、基板結晶方位も制御する必要があることを示唆している。さらに、単磁区となる電極パターン、すなわち、図 4 の模式図

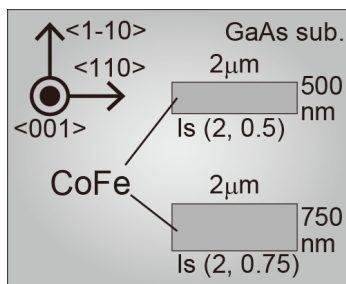


図 4: GaAs (001)基板上に堆積した CoFe 単膜のパターン形状と基板方位関係 [国内(学外)共同研究成果]

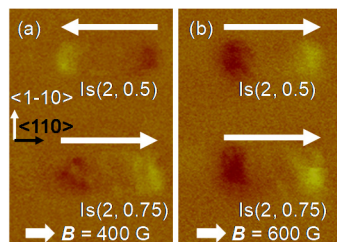


図 5: 20 nm 厚 CoFe 薄膜の MFM 像: B = (a) 400 G, (b) 600 G

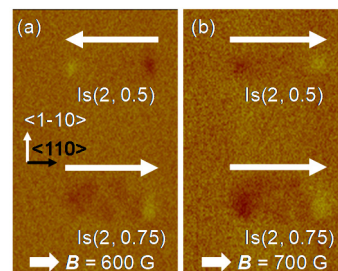


図 6: 10 nm 厚 CoFe 薄膜の MFM 像: B = (a) 600 G, (b) 700 G

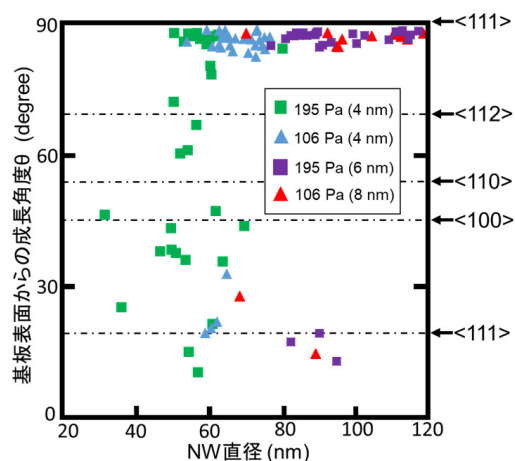


図 3: Si (111)基板上的金 (Au) 触媒薄膜リフトオフパターンを用いた VLS 成長 Si 半導体 NW の成長方向 [国内(学外)共同研究成果]

に示す電極パターン $I_s(2, 0.5)$ および $I_s(2, 0.75)$ に対して、詳細な印加磁場方向・強度依存性評価を行った。図 5 および 6 は外部磁場 (B) 印加後の室温における MFM 像であり、高アスペクト比のパターン ($I_s(2, 0.5)$) ほど、また、CoFe 膜厚が薄い (10 nm) ほど、磁化スイッチングに要する B 強度が大きいことを明瞭に示している。この結果は膜厚の減少によるスイッチング磁場の増大を示唆しており、これは CoFe 膜厚に対する表面粗さの寄与が増大したためと考えられる。[C. H. Lin *et al.*, *Thin Solid Films* **519**, 8379 (2011)] 原子間力顕微鏡を用いた CoFe 薄膜表面評価の結果、本研究で作製した膜厚 10、20 nm における表面粗さは、それぞれ 0.7、0.3 nm 程度であった。以上、本研究で直接観察により得られた実験結果は、未だ報告されていない初の研究成果である。また、MTJ 薄膜電極に近い層構造、CoFe(10 nm)/MgO(1 nm)/CoFe(5 nm) ヘテロ薄膜の堆積と磁化率測定 (4 K 及び 300 K) を行った。M-H 曲線では低温・室温共に明瞭なヒステリシス曲線を得たが、上述のように、CoFe 薄膜の磁化・磁区構造はパターン形状に依存するため、パターンを施さない通常の強磁性体 CoFe 多結晶膜の冷却過程における磁区の磁化方向に依存すると解釈できる M-H 曲線形状を示した。また、 B 印加方向に依存した保磁力の変化を観測した (300 K で保磁力 -8 Oe, $+20$ Oe)。以上、本学外共同研究で得られた実験結果をまとめた学術雑誌への論文投稿を JAIST (石川) と計画しており、これらの成果を基に、縦型素子における MTJ 電極構造を設計・作製する。

最後に、強磁性体電極を用いた NW の磁気輸送特性に関する初の評価として、NIMS (つくば) との連携で作製した Si-NW を機械的に Si (111) 基板から剥離、自然酸化膜除去後、別の SiO_2/Si (111) 基板上に横倒し、4 端子を形成した物性評価用試料を作製し、ギーセン大学 (ドイツ) との連携により MR 効果測定を実施した。現在までに得られている測定結果の一例として、直径約 35 nm、長さ約 10 μm の Si-NW の両端付近の 2 端子に Au/Ti (非磁性) 電極、その間に位置する 2 端子に Au/Ni (強磁性) 電極を形成した 4 端子測定用試料では、非磁性-強磁性電極間に流す電流方向に依存して、 ± 10 T (温度 = 180 K) の外部磁場 (B) 印加掃引に対し、電流方向 Ni \rightarrow Ti で MR = +8% (-10 T) \rightarrow 0% (0 T) \rightarrow +8% ($+10$ T)、電流逆方向、つまり Ti \rightarrow Ni で MR = 0% (-10 T) \rightarrow 0% (0 T) \rightarrow +10% ($+10$ T) という特異な非対称 MR 効果を示した。以上、本研究で得られた実験結果は、未だ報告されていない初の研究成果であり、Ni および Ti と Si-NW の間のショットキ障壁高さの違いと、強磁性体 Ni 電極の磁化方向に依存した効果と推察しているが、詳細なメカニズム解明のためには、海外研究協力先との間で、さらなる追加実験が必要であるとの見解で一致している。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shinjiro Hara, Matthias T. Elm, Peter J. Klar	4. 巻 34
2. 論文標題 Selective-Area Growth and Transport Properties of MnAs/InAs Heterojunction Nanowires (Invited Paper)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research	6. 最初と最後の頁 3863 ~ 3876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1557/jmr.2019.333	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Patrick Uredat, Ryutaro Kodaira, Ryoma Horiguchi, Shinjiro Hara, Andreas Beyer, Kerstin Volz, Peter J. Klar, Matthias T. Elm	4. 巻 20
2. 論文標題 Anomalous Angle-Dependent Magnetotransport Properties of Single InAs Nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 618 ~ 624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b04383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Patrick Uredat, Matthias T. Elm, Ryoma Horiguchi, Peter J. Klar, Shinjiro Hara	4. 巻 53
2. 論文標題 The Transport Properties of InAs Nanowires: An Introduction to MnAs/InAs Heterojunction Nanowires for Spintronics (Invited Topical Review Paper)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 333002-1 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab88e8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ryoma Horiguchi, Shinjiro Hara, Masaya Iida	4. 巻 124
2. 論文標題 Magnetic domain structure and domain wall analysis of ferromagnetic MnAs nanodisks selectively-grown on Si (111) substrates for spintronic applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 153905-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5045241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryutaro Kodaira, Ryoma Horiguchi, Shinjiro Hara	4. 巻 507
2. 論文標題 Magnetization characterization of MnAs nanoclusters at close range in bended MnAs/InAs heterojunction nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 241 ~ 245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2018.11.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryutaro Kodaira, Kyohei Kabamoto, Shinjiro Hara	4. 巻 56
2. 論文標題 Shape control of ferromagnetic MnAs nanoclusters exhibiting magnetization switching in vertical MnAs/InAs heterojunction nanowires	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 06GH03-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/jjap.56.06gh03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 Shinjiro Hara, Matthias T. Elm, Peter J. Klar
2. 発表標題 Transport Properties of MnAs/InAs Heterojunction and InAs Nanowires Formed by Selective-Area Growth
3. 学会等名 the 2019 Material Research Society (MRS) Spring Meeting, Phoenix, Arizona, USA, April 22-26, 2019, EP10.06.02 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Teramoto, Ryoma Horiguchi, Yusuke Adachi, Masashi Akabori, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Thickness and Aspect Ratio Dependences of Magnetic Domain Structures in Patterned CoFe Thin Films on GaAs (001) Substrates
3. 学会等名 the 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2019), Nagoya, Japan, September 2-5, 2019, PS-8-20 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Patrick Uredat, Ryoma Horiguchi, Ryutaro Kodaira, Shinjiro Hara, Peter J. Klar, and Matthias T. Elm
2. 発表標題 Anomalous Angle-Dependent Magnetoresistance in InAs Nanowires
3. 学会等名 the Nanowire Week 2019, Pisa, Italy, September 23-27, 2019, Tu4.4, p. 55 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Teramoto, Ryoma Horiguchi, Yusuke Adachi, Masashi Akabori, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Applied External Magnetic Field Dependence of Magnetic Domain Structures in Patterned CoFe Thin Films on GaAs (001) Substrates
3. 学会等名 the 32nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019), Hiroshima, Japan, October 28-31, 2019, 31C-8-1 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryoma Horiguchi, Keigo Teramoto, Yusuke Adachi, Masashi Akabori, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Aspect Ratio Dependence of Magnetization Switching in CoFe Nanolayers Patterned on GaAs (001) Substrates
3. 学会等名 the 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-VIII), Sendai, Japan, November 27-30, 2019, WP2-20, pp. 53-54 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryutaro Kodaira, Ryoma Horiguchi, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Magnetization Characterization of Two MnAs Nanoclusters at Close Range in MnAs/InAs Heterojunction Nanowires
3. 学会等名 the 19th International Conference on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX), Nara, Japan, June 3-8, 2018, 7C-3.6 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinjiro Hara, Matthias T. Elm, Peter J. Klar
2. 発表標題 Selective-Area Growth and Transport Characterization of Vertical MnAs/InAs Heterojunction Nanowires
3. 学会等名 the 10th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC 2018), Paris, France, July 8-13, 2018, H5-10 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Patrick Uredat, Ryutaro Kodaira, Ryoma Horiguchi, Shinjiro Hara, Peter J. Klar, Matthias T. Elm
2. 発表標題 Determining the Carrier Mobility in Single InAs Nanowires from Magnetotransport Measurements
3. 学会等名 the 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2018), Tokyo, Japan, September 9-13, 2018, M-6-02 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Kitazawa, Ryutaro Kodaira, Ryoma Horiguchi, Wipakorn Jevasuwan, Naoki Fukata, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Dependence of Si Nanowire Orientation on Vapor-Liquid-Solid Growth Conditions
3. 学会等名 the 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018), Sapporo, Japan, November 13-16, 2018, 16P-11-111L (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuro Kadowaki, Ryutaro Kodaira, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Structural Investigation of Bended MnAs/InAs Heterojunction Nanowires
3. 学会等名 the 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018), Sapporo, Japan, November 13-16, 2018, 16P-11-115L (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuro Kadowaki, Ryutaro Kodaira, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Analysis of Bending Mechanism in MnAs/InAs Heterojunction Nanowires
3. 学会等名 the 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017), Sendai, Japan, September 19-22, 2017, J-6-02 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Patrick Uredat, Matthias T. Elm, Ryutaro Kodaira, Ryoma Horiguchi, Peter J. Klar, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Electrical Transport Properties of Single MnAs/InAs Hybrid Nanowires Grown by Selective-Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 the 2017 Material Research Society (MRS) Fall Meeting, Boston, Massachusetts, USA, November 26-December 1, 2017, NM03.07.06 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryutaro Kodaira, Tetsuro Kadowaki, Shinjiro Hara
2. 発表標題 Control of Bending Structures in MnAs/InAs Heterojunction Nanowires
3. 学会等名 the 2017 Material Research Society (MRS) Fall Meeting, Boston, Massachusetts, USA, November 26-December 1, 2017, NM03.14.17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Junichi Motohisa, Shinjiro Hara	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer Nature AG.(Switzerland)	5. 総ページ数 57
3. 書名 Fundamental Properties of Semiconductor Nanowires (分担執筆, Chapter名: Nanowire Field Effect Transistors)	

1. 著者名 Shinjiro Hara	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Pan Stanford Publishing Pte Ltd	5. 総ページ数 527
3. 書名 Novel Compound Semiconductor Nanowires: Materials, Devices, and Applications, edited by Fumitaro Ishikawa and Irina Buyanova: "Ferromagnetic MnAs/III-V Hybrid Nanowires for Spintronics", Part II, Chapter 6, pp. 177-220	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	本久 順一 (Motohisa Junichi) (60212263)	北海道大学・情報科学研究院・教授 (10101)	
研究 協力者	Elm Matthias T. (Elm Matthias T.)		
研究 協力者	Klar Peter J. (Klar Peter J.)		
研究 協力者	深田 直樹 (Fukata Naoki)		
研究 協力者	赤堀 誠志 (Akabori Masashi)		