

令和元年5月19日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13671

研究課題名(和文)シリコン上の縦型ナノワイヤスピLEDのボトムアップ作製

研究課題名(英文)Bottom-Up Fabrication of Vertical Nanowire Spin-LEDs 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) 2,900,000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pn接合NWに、スピン偏極キャリア注入を可能とする強磁性体ナノ構造と磁気トンネル接合(MTJ)電極を積層した縦型NWスピLEDの実現を目指し、主にInAs系NW中の電子散乱過程・輸送現象のメカニズム理解、強磁性体MnAsナノ構造及びCoFe/MgO系MTJ電極の磁区構造・磁化方向制御技術の確立、InAsP/InPヘテロ接合NWにおける量子ドット効果の実証、磁化方向制御した平坦な単磁区MTJ電極をNW上に形成するためのNW埋め込み・頭出しプロセスの検討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LED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に関する成果が多数得られた。当初計画の通り、国内・海外研究協力先との連携を鋭意推進することで、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当初目標で設定する素子実用化が近づいたと強く感じる。また実用化に傾倒した結果のみならず、NW中の電子散乱過程に関して、より普遍性の高いモデル化に向け、擬一次元メソスコピック系物性物理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 vertical spin-nanowire-light-emitting diodes (LEDs), in which vertical semiconductor pn-junction nanowires (NWs) are used with ferromagnetic nanostructures and magnetic tunnel junction (MTJ) electrodes. Such vertical spin-NW-LEDs 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 the experimental results mainly relating to quasi-one-dimensional mesoscopic characterization of electron scattering and magnetotransport phenomena, control of magnetic domains and magnetization directions in ferromagnetic MnAs nanostructures and CoFe/MgO-MTJ electrodes, a quantum dot effect in vertical InAsP/InP heterojunction NWs, and device fabrication processes to form flat MTJ electrodes with single magnetic domains and well-controlled magnetization directions on buried insulating layers and exposed NWs.

研究分野：半導体ナノエレクトロニクス

キーワード：縦型ナノワイヤ ヘテロ接合ナノワイヤ 選択成長 縦型スピLED発光ダイオード ボトムアップ形成

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 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 More Than Moore 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、新しい電界・光誘起磁性の発見、スピン MOSFET、熱電変換スピン流素子等、次世代高機能エレクトロニクス・量子情報技術に向け、魅力的な研究が東北大学・東京大学・東京工大学・IBM・カリフォルニア大学等国内外で盛んである。その中で、スピン偏極キャリア注入により発光の左右円偏光を制御し、量子コンピューティングの情報担体として大いに期待されるスピン発光ダイオード (LED) の開発は、希薄磁性半導体や半導体量子ドット等により精力的に行われてきた。[Y. Ohno *et al.*, *Nature*, **402**, 790 (1999); S. Chakrabarti *et al.*, *Nano. Lett.*, **5**, 209 (2005); N. Nishizawa *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **114**, 1783 (2017)] 従来のナノテクノロジー分野では、薄膜堆積後の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ている。その中で、半導体技術ロードマップ (ITRS) と後継の国際ロードマップ (IRDS) で Si-LSI の次世代技術と予測され、2000 年頃から急速に研究が盛んになった直径数 10~100 nm 程度の縦型細線、半導体ナノワイヤ (NW) が、縦型 FET・ロジック回路等の従来の半導体エレクトロニクス応用に加え、ピエゾ発電素子・ガラス基板上的 NW-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より、これまで以上に注目を浴びている。[S. Xu *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **5**, 366 (2010); J. H. Choi *et al.*, *Nat. Photon.* **5**, 763 (2011); J. Wallentin *et al.*, *Science* **339**, 1057 (2013)]

### 2. 研究の目的

以上の背景の下本研究では、独自の半導体 NW 技術による新奇 NW 磁気エレクトロニクスを提案する。3 年間の限られた期間内では、量子構造を内包する<111>B 方位の垂直自立型 pn 接合半導体 NW に強磁性体ナノ構造と磁気トンネル接合 (MTJ) 電極を積層した縦型 NW スピン LED の実現に絞り、本代表者独自の強磁性体/半導体ヘテロ接合 NW のボトムアップ型作製技術の確立と基礎物性物理の評価及び、プロトタイプ素子の試作と特性評価を最終目標とする。種々の半導体ウェハ上で位置・サイズ制御可能なボトムアップ型作製技術の開発と、高アスペクト比の垂直自立型半導体 pn 接合 NW に、スピン偏極キャリア注入を可能とする強磁性体ナノ構造と MTJ 電極を積層した垂直自立型 NW スピン LED の実現を目的とする。

### 3. 研究の方法

知見が豊富な GaAs (111)B 及び Si (111) 基板上で位置・サイズ制御した化合物半導体 (InAs, InP, GaAs 系) NW に強磁性体 MnAs ナノ構造を積層した縦型強磁性体/半導体ヘテロ接合 NW の作製を行う。電子線描画で非晶質 SiO<sub>2</sub> 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) 選択成長により、母体テンプレートとなる垂直自立型半導体 NW を形成 (図 1(b)) 後、独自に開発してきたエンドタキシと呼ばれる特殊な結晶成長様式により、強磁性体 MnAs ナノ構造を積層・挿入して縦方向ヘテロ接合 NW を作製する。[雑誌論文(6)] 強磁性体を複合する母体の半導体 NW として主に、InAs 及び InP-NW を用いた。

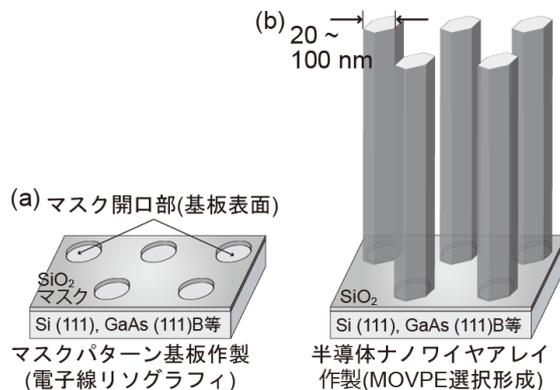


図 1: 母体テンプレートとなる垂直自立型半導体 NW の MOVPE 選択成長

MnAs/InAs ヘテロ接合 NW の磁区構造・磁化方向評価を目的として、MOVPE 選択成長した縦型 NW を根元から機械的に剥離後、別の SiO<sub>2</sub>/Si (111)基板上に横倒し、磁気力顕微鏡 (MFM) 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行った他、さらに擬 1 次元メゾスコピック系物性物理の解明を目的として、別基板に横倒した NW 上に電極を形成し、海外研究協力者であるドイツ・ギーゼン大学・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・角度依存磁気抵抗効果及びそれらの測定温度依存性等、基礎物性評価を実施した。また本研究で用いる強磁性体 MnAs ナノ構造における磁区形成過程の詳細な評価を目的として、別の Si (111)基板上に AlGaAs をバッファ層として選択形成した MnAs ナノ構造を用いて、磁区・磁壁とナノ構造の面積・厚さとの関係を MFM により評価した。

また、NW 内部に真に量子ドットが形成されたかの実験的検証を目的として、これまで知見のある InAsP 量子ドットを内包する InP-NW を MOVPE 選択成長により作製し、顕微フォトルミネセンス (PL) 測定を行った。顕微 PL 測定により 1 本の NW の光学的評価を実施するため、NW アレイの周期を 5 μm とした。さらに pn 接合 NW スピン LED の実現に向け、Zn ドープによる p-InP-NW を作製し、通常の閃亜鉛鉱型立方晶と共にウルツ鉱型六方晶構造が混在する NW における光学物性を評価した。以上については、国内研究協力者である北海道大学・本久順一教授グループとの学内連携の下、実施した。

さらに、ナノデバイスプロセス確立を目的として、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<sub>4</sub> 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。

また MTJ 電極作製では、CoFe 系磁性体薄膜の磁化特性が下地基板の結晶方位に依存することが知られているため、CoFe 薄膜パターンの形状・方向、CoFe 層厚に依存した磁区構造評価・磁化方向制御に関する実験を行った。実際に CoFe 単膜を GaAs (001)、(110) 方位基板、非晶質 HSQ 絶縁膜上にマグネトロンスパッタ法により堆積し、室温で MFM による評価を行った。さらに GaAs (001) 基板上に、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。なお、本研究で作製した CoFe 膜の固相組成は Co<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub> 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・赤堀誠志准教授グループとの学外連携の下、実施した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 縦型強磁性体/半導体ヘテロ接合 NW 及び強磁性体ナノ構造の MOVPE 選択成長と評価

InAs-NW 中に作製した MnAs ナノ構造の磁化方向制御に関して、MFM による印加磁場方向・強度依存性評価を行った。構造評価から InAs <111>B 方向と MnAs の c 軸 (磁化困難軸) が平行との知見を得ており、これまで NW の <111>B 方向と垂直な a 軸 (磁化容易軸) 方向の磁化が確認されたが、アスペクト比 1.3 強の (<111>B 方向に伸長した) MnAs ナノ構造では、<111>B 方向と平行に磁化した単磁区を確認し (図 2)、印加磁場方向による磁化反転も確認した。ナノ構造の形状磁気異方性に起因すると考えられ、形状・アスペクト比による磁化方向制御の可能性を示した。[雑誌論文(3, 4, 6)の他、学会発表]

半導体 NW の擬 1 次元メゾスコピック系物性物理に関する実験的・理論的報告は、日本国内では極めて稀で、ほとんどが欧米を中心とした海外研究機関によるものである。[例えば、Ch. Blömers *et al.*, *Nano. Lett.*, **11**, 3550 (2011); M. J. L. Sourribes *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **121**, 024304 (2017)] 本研究の MnAs/InAs ヘテロ接合 NW でこれまで観測された負の磁気抵抗効果等、基礎物性の理解を深めるため、種々の追加実験を行ってきた。主に、母体の InAs-NW の磁気抵抗効果・磁気輸送特性評価に関しては、普遍性の高い系統的なメカニズム構築・モデル化に向け、当初計画の通り海外研究協力先に滞在し、さらに試料数を追加して鋭意評価実験を進めてきた。例えば、InAs-NW 表面での電子散乱過程に関しては、NW チャネルの電流方向と印加磁場方向の成す角に依存した電気抵抗において、角度に依存する有効磁場強度によるローレンツ力で曲げられる電子の軌道半径の増減から、電気抵抗に寄与する電子の後方散乱の度合いに依存した電気抵抗の増減を解析する等、多くの興味深い基礎物性物理の知見を得た。しかしその後追加測定した試料で、本研究で構築した電子の散乱モデルからは想定外の測定結果が観測される等、予想以上にモデル構築に手間取っており、さらに協議を継続しながら、得られた多くの測定結果を解析している。[学会発表(1, 3, 5), 雑誌論文投稿準備中]

次に、Si (111) 基板上に MOVPE 選択成長した強磁性体 MnAs ナノ構造を用いて、磁区・磁壁とナノ構造の面積・厚さとの関係性を評価した。面積 30,000nm<sup>2</sup> 以下で単磁区であり、それに比べ比較的大面積で 2 つの磁区を持つナノ構造では、ブロッホ及びネール磁壁を持つと考えられる観察結果を得た。また図 3 に、単磁区のナノ構造における磁化反転の過程を MFM により観察した結果を示す。走査電子顕微鏡の反射電子像により基板上で

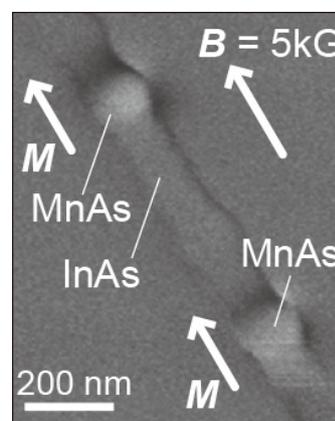


図 2: MnAs/InAs-NW 中の MnAs ナノ構造の形状による磁化方向制御 [雑誌論文(4)]

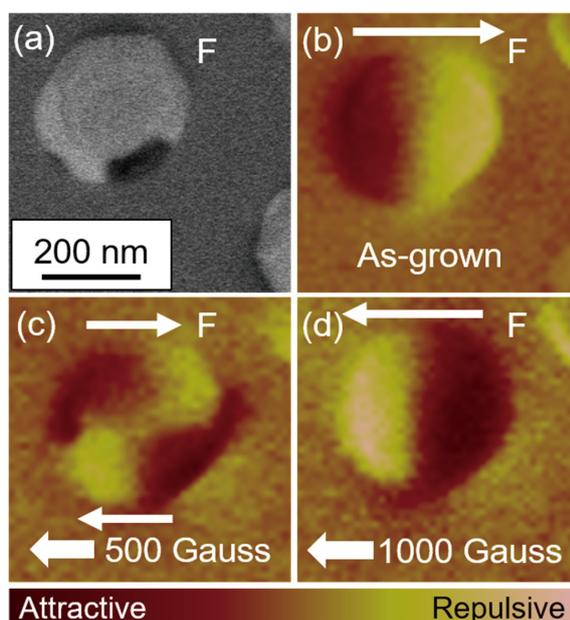


図 3: Si (111) 基板上に MOVPE 選択成長した MnAs ナノ構造の磁区構造における外部印加磁場方向・強度依存性 [雑誌論文(2)]

位置を特定した MnAs ナノ構造 F (図 3(a)) に対して、その磁区構造の外部印加磁場方向・強度依存性を評価した結果、外部印加磁場方向と強度の変化に伴い、印加磁場無しで自発磁化を示す単磁区 (図 3(b): 白色矢印は磁化方向) から、磁化反平行の 2 磁区状態 (図 3(c)) を経て磁化反転 (図 3(d): 細い白色矢印は磁化方向) する過程の観測に成功した。[雑誌論文(1, 2)の他、学会発表]

### (2) 量子ドット内包半導体 NW テンプレート構造の MOVPE 選択成長と評価

次に、母体となる InP-NW アレイの周期(密度)・高さ・直径を成長温度・供給ガス V/III 比等の成長条件により制御して、InAsP 量子ドットを内包するヘテロ接合 NW を作製した。低温で顕微 PL 評価した 90%以上の NW から、内包された InAsP 量子ドットに起因するマルチピークを観測した。これらのピークは、量子ドットにおける量子効果に起因した励起子 (X) 及びバイエキシトン (XX) 効果によるものと考えられ、光相関測定により X 及び XX からの PL スペクトル積分強度の励起光強度依存性を評価した結果、図 4 の通り X 及び XX からの発光であることが実証され、InP-NW 中に InAsP 量子ドットが形成されていることが明らかとなった。[雑誌論文(5)の他、学会発表]

MOVPE 選択成長の成長温度・供給ガス V/III 比・不純物 (Zn) ドーピングにより、NW の成長モード (結晶構造) が変わることが、先行研究で明らかにされているが、[K. Ikejiri *et al.*, Nano. Lett., **11**, 4314 (2011); (Correction) Nano. Lett., **12**, 524 (2012); Nano. Lett., **12**, 4770 (2012)] 本研究では p 型 NW に対する PL 発光特性を評価した。ノンドープ及び Zn ドープ p-InP-NW に対して低温で顕微 PL スペクトルを評価した結果、この 2 タイプの NW の PL 発光ピークは共に、通常の閃亜鉛鉱型立方晶のバンドギャップエネルギー ( $E_g$ ) 1.421 eV と、ウルツ鉱型六方晶の InP で予想される  $E_g=1.505$  eV の間に位置することが判明し、閃亜鉛鉱型とウルツ鉱型の混在による Type-II 型量子井戸が InP-NW 内部に形成されたことに起因している可能性が高い。また PL 発光ピーク波長の励起光強度依存性から、Zn ドープ p-InP-NW で極めて大きなブルーシフトを観測した。先行研究では、フェルミ準位の NW 表面でのピンニングによる表面バンドベンディングに起因するものであるが、今回の 100 meV 以上の大きなブルーシフト量はこの効果だけでは説明できず、現時点では、ドナー-アクセプタペア発光との相乗効果によるものと考えている。[学会発表(4)]

### (3) CoFe/MgO-MTJ 電極の作製と評価

初めに、MTJ 電極として使用する CoFe(10 nm)/MgO(1 nm)/CoFe(5 nm)積層膜に全く加工を施さず、4 K の低温及び 300 K の室温で M-H 磁化率測定を行った結果、外部印加磁場の掃引方向に依存したキックも見られたが、明瞭なヒステリシスループを確認した。CoFe 膜の保磁力は 500 Oe 前後であった。次に、MTJ 電極としてのパターンニングを想定して、 $100\ \mu\text{m} \times 2.0\ \mu\text{m}$  程度の Line & Space の周期パターンを作製し M-H 磁化率測定を行った。Ar イオンエッチング及びリフトオフ等、作製プロセス方法に依存して保磁力や飽和磁化が変わるとの知見を得ており、実際の素子作製の際のナノデバイスプロセスにおける指針を得た。

先行研究により、CoFe、CoFeB 等の CoFe 系磁性体薄膜の磁化特性は一般的に、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、M-H 磁化率曲線の結晶方位依存性に関する報告のみで、[例えば、A. T. Hindmarch *et al.*, Phys. Rev. Lett., **100**, 117201 (2008); H. Q. Tu *et al.*, IEEE Trans. Magn., **51**, 2005104 (2015)] CoFe 系薄膜の磁区構造の直接的な観察・変化を報告した例はほぼ皆無である。従って本研究では MFM により、CoFe 単膜パターンの形状・方向・膜厚に依存した磁区構造評価・磁化方向制

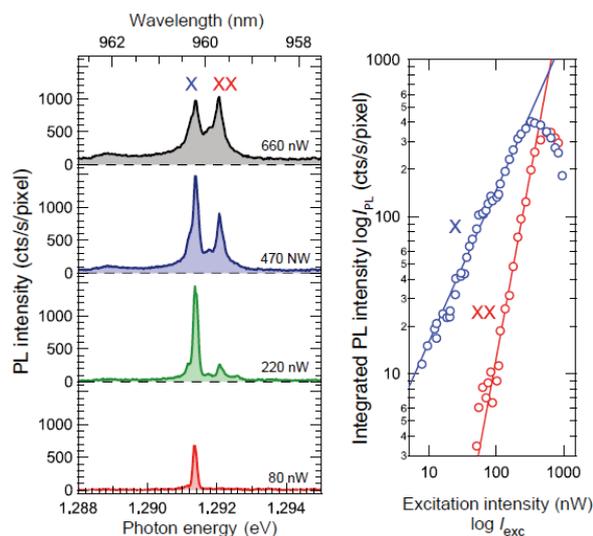


図 4: InAsP 量子ドットを内包した InP-NW からの顕微 PL スペクトル: 量子ドットに起因する励起子・バイエキシトン発光 [雑誌論文(5)]

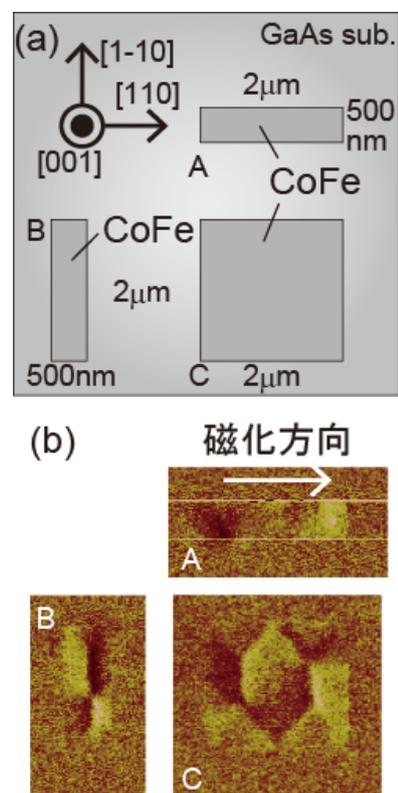


図 5: GaAs (001) 基板の上に堆積した CoFe 単膜の磁区構造におけるパターン形状・方位依存性 [国際会議発表投稿準備中]

御に関する実験を行った。結晶基板として GaAs (001)、(110)方位基板を、また NW を非晶質絶縁膜で埋め込み、頭出し後、その上に MTJ 電極を形成するプロセスを想定して、非晶質 HSQ 絶縁膜上にも膜厚 5, 10, 20 nm の CoFe 単膜を堆積した試料を 3 種類作製し、GaAs (001)方位基板上の試料から実験を開始した。初めに、通常のパターンニング無しの CoFe 薄膜 (膜厚=5, 20 nm) を、外部磁場を全く印加せず as-depo 状態のまま室温で MFM 測定を行った。磁気的なコントラストを確認したものの、明瞭な磁区構造は得られず、10, 30 Gauss 程度の弱い外部磁場を順次印加した場合も、その様子に明確な変化は確認されなかった。続いて、GaAs 基板の結晶方位に合わせて、前頁図 5(a)の通り 500 nm から 2  $\mu$ m の範囲でアスペクト比を変え、形状異方性を有する CoFe 単膜パターン (膜厚=10, 20 nm) をリフトオフにより作製した。図 5(b)は、膜厚=20 nm の試料に対して外部磁場を全く印加せず as-depo 状態のまま室温で MFM 測定を行った結果であり、自発磁化による明瞭な磁区構造を確認した。特にアスペクト比 1 で比較的サイズの大きい等方的な 2  $\mu$ m  $\times$  2  $\mu$ m パターン (C) では還流磁区が確認されたが、[110]方向にほぼ平行なアスペクト比 4 の形状異方性パターン (A) では単磁区、[1-10]方向にほぼ平行なパターン (B) では 2 磁区を確認した。一方、膜厚=10 nm の試料では、アスペクト比 1 のパターンで同様の結果を示すものの、[110]、[1-10]方向に平行な形状異方性パターンでは共に単磁区であり、CoFe 膜厚依存性を確認した。実験で確認された[1-10]方向の単磁区、2 磁区構造、[110]方向の単磁区構造をそれぞれ仮定した全エネルギー計算の結果、[110]方向に伸長したパターンでは膜厚=10, 20 nm 共に単磁区が安定だが、[1-10]方向に伸長したパターンでは、膜厚 10 nm で単磁区、20 nm で 2 磁区が安定であるとの知見を得ており、MFM 観察結果と良好一致を示した。以上の結果は、CoFe 膜パターン電極の磁区構造及び磁化方向制御に対して極めて重要な知見であり、素子設計及び試作への有益な指針が得られた。[国際会議投稿準備中]

#### (4) まとめと展望

従来の半導体スピントロニクス技術はいずれも薄膜堆積後のトップダウン型微細加工によるが、原理的に加工損傷の無い結晶成長手法のみによるボトムアップ型ナノ構造集積という視点の研究は皆無で、本代表者が他に先駆けて着想し開発する独自の技術である。本研究種目の趣旨に合致した極めて挑戦的で萌芽期の研究課題を設定したため、最終目標である「量子構造を内包する<111>B 方位の垂直自立型 pn 接合半導体 NW に強磁性体ナノ構造と MTJ 電極を積層した縦型 NW スピン LED のプロトタイプ素子の試作と特性評価」には至っていないが、その実現に向けた種々の要素技術について、多くの重要な成果が得られたと言える。また、研究推進に当たっては鋭意学内外連携を進め、種々の実験を効率的に実施することができた。ただ、NW の磁気輸送特性評価等では、想定外の実験結果が得られたことから、継続して測定を計画・推進中であるが、異なるサイズ・ドーピング濃度の NW 等、測定する NW の種類・試料数をさらに追加することで、より信頼性・普遍性の高いモデル化を試み、擬 1 次元メゾスコピック系の複雑な物理現象の解明を目指す。今後、学術面では、遅れている国際共著雑誌論文の出版等が期待できる他、実用面では、本研究を通じて得られた種々の要素技術を結集して、最終目標である縦型 NW スピン LED の実現が期待できる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

※全て査読有。以下、特に関係の深い主要なものを抜粋して掲載

- (1) R. Horiguchi, S. Hara, M. Iida, K. Morita: "Selective-Area Growth of Magnetic MnAs Nanodisks on Si (111) Substrates Using Multiple Types of Dielectric Masks", *J. Cryst. Growth*, Vol. 507, pp. 226 - 231 (2019)  
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.11.015>
- (2) R. Horiguchi, S. Hara, M. Iida: "Magnetic Domain Structure and Domain Wall Analysis of Ferromagnetic MnAs Nanodisks Selectively-Grown on Si (111) Substrates for Spintronic Applications", *J. Appl. Phys.*, Vol. 124, No. 15, pp. 153905-1 - 153905-7 (2018)  
<https://doi.org/10.1063/1.5045241>
- (3) R. Kodaira, K. Kabamoto, S. Hara: "Shape Control of Ferromagnetic MnAs Nanoclusters Exhibiting Magnetization Switching in Vertical MnAs/InAs Heterojunction Nanowires", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 56, No. 6S1, pp. 06GH03-1 - 06GH03-6 (2017)  
<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.06GH03>
- (4) K. Kabamoto, R. Kodaira, S. Hara: "Magnetization in Vertical MnAs/InAs Heterojunction Nanowires", *J. Cryst. Growth*, Vol. 464, pp. 80 - 85 (2017)  
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.11.044>
- (5) S. Yanase, H. Sasakura, S. Hara, J. Motohisa: "Single-Photon Emission from InAsP Quantum Dots Embedded in Density-Controlled InP Nanowires", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 56, No. 4S, pp. 04CP04-1 - 04CP04-6 (2017)  
<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.04CP04>
- (6) R. Kodaira, S. Hara, K. Kabamoto, H. Fujimagari: "Synthesis and Structural Characterization of Vertical Ferromagnetic MnAs/Semiconducting InAs Heterojunction

[学会発表] (計32件)

国際会議21件 (内、招待講演2件)、国内会議11件 (内、招待講演0件)

※以下、国際会議発表から特に関係の深い主要なものを抜粋して掲載

- (1) S. Hara, M. T. Elm, P. J. Klar: “Selective-Area Growth and Transport Characterization of Vertical MnAs/InAs Heterojunction Nanowires”, **(Invited Paper)** the 10th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC 2018), Paris, France, July 8-13, 2018, H5-10
- (2) R. Horiguchi, M. Iida, K. Morita, S. Hara: “Analyses of Magnetic Domains in MnAs Nanoclusters Grown by Selective-Area MOVPE”, the 19th International Conference on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX), Nara, Japan, June 3-8, 2018, 5B-3.6
- (3) P. Uredat, M. T. Elm, R. Kodaira, R. Horiguchi, P. J. Klar, S. Hara: “Electrical Transport Properties of Single MnAs/InAs Hybrid Nanowires Grown by Selective-Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, the 2017 Material Research Society (MRS) Fall Meeting, Boston, Massachusetts, USA, November 26-December 1, 2017, NM03.07.06
- (4) J. Motohisa, H. Kameda, M. Sasaki, S. Hara, K. Tomioka: “Photoluminescence of Zn-Doped InP Nanowires: Mixing of Crystal Structures, Donor-Acceptor Pair Recombination, and Surface Effects”, the 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS 2017), Matsue, Japan, July 31-August 4, 2017, TuP-33
- (5) M. T. Elm, R. Kodaira, R. Horiguchi, K. Kabamoto, P. J. Klar, S. Hara: “Structural Characterization and Magnetotransport Properties of MnAs/InAs Hybrid Nanowires Grown by Selective-Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, the 2016 Material Research Society (MRS) Fall Meeting, Boston, Massachusetts, USA, November 27-December 2, 2016, NM1.2.02
- (6) R. Kodaira, K. Kabamoto, S. Hara: “Shape Control of Ferromagnetic MnAs Nanoclusters and Their Magnetization in Semiconducting InAs Nanowires”, the 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), Kyoto, Japan, November 8-11, 2016, 11B-10-4
- (7) S. Yanase, H. Sasakura, S. Hara, J. Motohisa: “Single Photon Emission from InAsP Quantum Dots Embedded in Density-Controlled InP Nanowires”, the 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2016), Tsukuba, Japan, September 26-29, 2016, K-5-02
- (8) K. Kabamoto, R. Kodaira, S. Hara: “Magnetic Domain Structures of MnAs/InAs Heterojunction Nanowires”, the 18th International Conference on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XVIII), San Diego, California, USA, July 10-15, 2016, 5A-2.4

[図書] (計1件)

- (1) S. Hara: "Ferromagnetic MnAs/III-V Hybrid Nanowires for Spintronics", Novel Compound Semiconductor Nanowires - Materials, Devices, and Applications, Part II, Chapter 6, pp. 177 - 220, edited by F. Ishikawa and I. Buyanova, ISBN: 978-981-4745-76-5 (Hardcover), ISBN: 978-1-315-36440-7 (eBook), Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, 30 September 2017  
<http://www.panstanford.com/books/9789814745765.html>

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：クラール ピーター・ジェンス

ローマ字氏名：(KLAR, Peter Jens)

研究協力者氏名：エルム マティアス・トーマス

ローマ字氏名：(ELM, Matthias Thomas)

研究協力者氏名：本久 順一

ローマ字氏名：(MOTOHISA, Junichi)

研究協力者氏名：赤堀 誠志

ローマ字氏名：(AKABORI, Masashi)