JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	領域選択形成したＩｎＡｓナノワイヤ／強磁性体複合構造によるスピンデバイス
Author(s)	赤堀，誠志
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書：1-6
Issue Date	2015-06-03
Type	Research Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/12832
Rights	
Description	研究種目：基盤研究(C)，研究期間：2012～2014，課題番号：24560368，研究者番号：50345667，研究分野：ナノ構造プロセス・物性評価

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ６ 月　 ３ 日現在

機関番号：１３３０２
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2012～2014
課題番号：２４５６０３６８

研究課題名（和文）領域選択形成したＩｎＡｓナノワイヤ／強磁性体複合構造によるスピンデバイス

研究課題名（英文）Spin devices having InAs nanowire / ferromagnetic metal hybrid structures formed by selective-area growth

研究代表者

赤堀　誠志（Akabori, Masashi）

北陸先端科学技術大学院大学・ナノマテリアルテクノロジ-センター・准教授

研究者番号：５０３４５６６７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　4,100,000円

研究成果の概要（和文）：領域選択形成InAsナノワイヤのスピンデバイス応用を目指して、(112)B基板上での成長、ウェットエッチングによる50 nm径InAsナノワイヤの形成、ナノワイヤトランジスタの作製・評価を行った。また、強磁性体電極作製技術・スピン物性評価技術として、CoFe-InGaAs系非局所スピンバルブデバイスの作製・評価、MnAs/InAs/GaAs(111)B成長と伝送線路モデルデバイスの作製・評価を行い、スピンデバイス応用に向けて有望な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：For the application of selective-area-grown InAs nanowires to spin devices, we carried out growth on (112)B substrates, formation of 50-nm-thick InAs nanowires by wet etching, and fabrication and characterization of nanowire transistors. Also as the technologies of ferromagnetic electrode formation and spin characterization, we carried out fabrication and characterization of CoFe-InGaAs non-local spin-valve devices, growth of MnAs/InAs/GaAs(111)B, and fabrication and characterization of transmission-line-model devices. As a result, we successfully obtained knowledge for spin device application.

研究分野：ナノ構造プロセス･物性評価

キーワード：選択成長　MBE　InAs　ナノワイヤ　FET　スピン　MnAs

１．研究開始当初の背景

国際半導体技術ロードマップ(ITRS)では、チャージではなくスピンを情報媒体とするスピンデバイスを重要な次世代(Beyond CMOS)デバイスの一つとして位置付けている。代表的な半導体スピンデバイスは、InAs・InGaAs・InSb・InGaSb など大きなスピン軌道結合を有する半導体と強磁性体金属(FM)との複合構造からなるスピン電界効果トランジスタ(スピン FET)であり、研究代表者の現所属を含め、世界各国の研究機関において、実現に向けたスピン軌道結合評価・制御や FM から半導体へのスピン注入に関する実験的研究が、1990 年代後半から精力的に進められている。スピン FET においては、1 次元細線構造を採用することにより、スピン軌道結合と弾性散乱によるスピンのデコヒーレンスが抑制されると期待されており、その端緒となる 2 次元電子ガスの微細加工による FM 未複合細線構造に関する実験的研究が近年報告されるようになった。しかしながら、研究代表者の知る限り、1 次元細線と FM との複合構造に関する実験的研究はほとんど報告されていない。

本研究で取り扱う InAs ナノワイヤ(NW)含め、半導体 NW は、構造の長手方向がエピタキシャル成長方向と一致している、ナノメートルスケールの断面寸法を有する 1 次元細線構造である。半導体 NW を伝導チャネルとした電界効果トランジスタ(NWFET)は、次世代(More Moore)デバイスの一つとして、前述の ITRS 等でも取り上げられており、NW 形成位置および方向の制御が NWFET に関する重要課題と考えられている。NW 形成法に着目すると、それらの多くは(111)や(001)上の有機金属気相エピタキシー(MOVPE)や分子線エピタキシー(MBE)をベースとした気相-液相-固相(VLS)法により行われており、反応場となる金属液滴の寸法により断面方向への成長が抑制されている結果、寸法制御性の飛躍的向上が可能となっている。ただし、閃亜鉛鉱型の III-V 半導体 NW の場合、多くは基板面外の〈111〉B に伸長した構造であるため、NW の並列接続や通常のプレーナー型リソグラフィーの適用が困難であった。研究代表者は、これらの困難を解決する新たな NW 形成法として、これまでの選択成長 NW に関する研究の経験を基に、(110)マスク基板を用いた選択成長による面内〈111〉B 方向への NW 形成法を着想し、平成 22-23 年度の科学研究費補助金・若手研究(B)により、InAs NW 面内形成と並列 NWFET の試作に関する研究を進めている。これまでに、直径約 300 nm・長さ約 1 μm・歩留まり約 10%程度ではあるが、(110)マスク基板上での MBE 選択成長 InAs NW の面内形成と、並列 NWFET 試作・特性評価を行い、出力・伝達特性や電界効果移動度の温度依存性等を得ることに成功している。

２．研究の目的

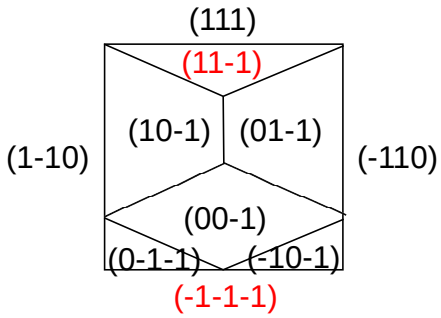
以上の背景の下、本研究では、MBE ベースの領域選択成長により形成可能な InAs NW と FM とを複合化し、スピン FET への展開可能なスピン注入型の NW スピンデバイスを実現する。これまでの研究成果により得られた半絶縁性 GaAs(110)マスク基板上の MBE 領域選択成長による InAs NW 面内形成技術を発展させ、直径 100 nm 以下・長さ 3 μm 以上を有する高アスペクト比 InAs NW の面内形成技術を確立する。高アスペクト比 NW の面内形成後、2 つの異なる方法を用いて InAs NW と FM との複合化の検討を行う。一つは、電子線リソグラフィー(EBL)やスパッタ等の標準的なデバイスプロセスにより Fe 系 FM との複合化を行う ex-situ 法であり、もう一つは、MBE により NW と MnAs 系 FM との複合化を直接行う in-situ 法である。何れの方法においても複合構造を多極デバイス化し、非局所配置によるスピン蓄積の電気的計測を行うことによって、NW/FM 複合構造の材料・構造・プロセスと電気伝導・スピン蓄積との関連性についての知見を獲得し、NW スピンデバイス物理の解明を進めていく。そして将来的には、高いスピン注入効率・長いスピンコヒーレンスを有する NW スピンデバイスに展開していく。

３．研究の方法

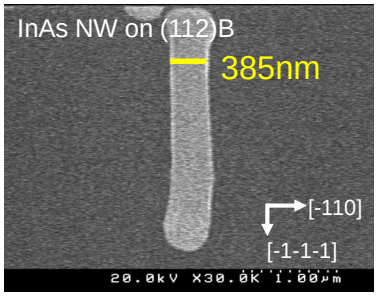
研究項目は大きく分けて、InAs NW 形成、ex-situ 法による複合構造形成、in-situ 法による複合構造形成、電気的計測の 4 項目である。まず、高アスペクト比 NW 形成を目指した EBL・MBE 技術の高度化、ex-situ 法の要素技術として前処理を含めた Fe 系 FM 成膜の基本検討を進めるとともに、極低温・強磁場下の電子・スピン輸送特性評価のための超伝導マグネット付クライオスタット・ロックイン増幅システムの再構築を並行して行う。続いて、ex-situ 法による複合構造・スピン注入デバイスの形成および非局所配置によるスピン蓄積の電気的計測を行いつつ、in-situ 法の基礎検討として InAs NW/MnAs の MBE に着手する。最終的には、ex-situ 法の最適化を進めつつ、in-situ 法による InAs NW/MnAs 複合構造・スピン注入デバイスの形成と計測を進め、ex-situ 法と in-situ 法の相互比較によって NW/FM 複合構造と電気伝導・スピン蓄積との関連性についての知見を獲得する。

４．研究成果

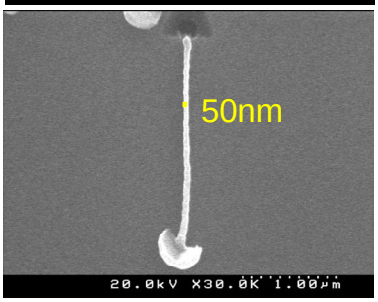
InAs NW 形成に関しては、図 1(a)のように面内に 1 つの〈111〉B 方向を有する (112)B マスク基板上において、(111)B 上の垂直成長 NW の形成条件を用いて、面内配向 NW 形成の改善を試みた。NW 形成後の電子顕微鏡写真を図 1(b)に示す。面外の〈111〉B 方向への傾いた NW とともに、狙い通りの１つの面内〈111〉B 方向への NW 形成が確認できた。



(a)

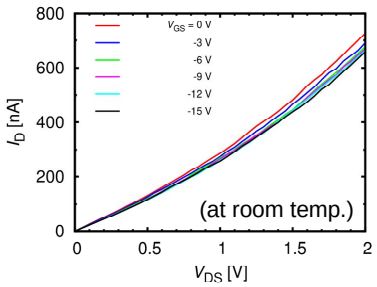


(b)

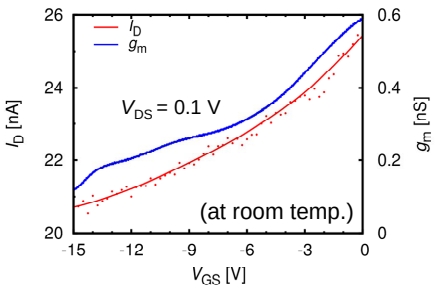


(c)

図 1　(a) (112)B 面近傍の低指数面、(b) (112)B マスク基板上の MBE 選択成長、(c) ウェットエッチによる NW 狭窄



(a)



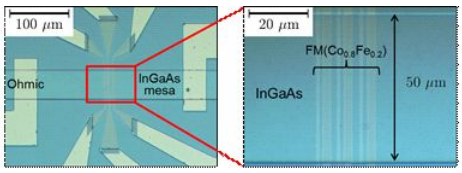
(b)

図 2　ウェットエッチ狭窄 InAs NWFET の (a) 出力特性、(b) 伝達特性

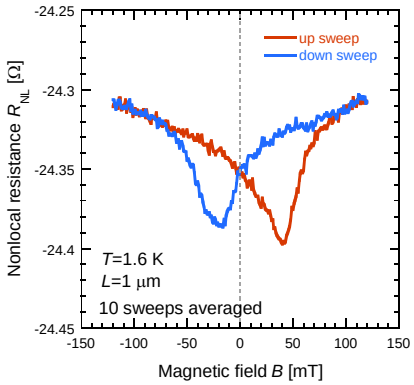
しかしながら、NW 長さ~1-2 μm、直径~300-400 nm、収率~20 %であり、成長条件を変えても改善は見られず、高アスペクト比・高均一性・高収率を得るのは難しいことがわかった。そこで、アスペクト比・電気的特性の向上を目指し，ウェットエッチを用いた面内配向 InAs NW の狭窄を試みた。ウェットエッチ後の電子顕微鏡写真を図 1(c)に示す。NW 径が 50 nm 程度まで狭窄できていることがわかる。このように狭窄した NW をチャネルとした NWFET の出力特性および伝達特性を図 2(a)(b)に示す。狭窄によるオフ特性の向上を期待したものの、変調は限定的であり、電界効果移動度に関してはエッチングしないものと比べて劣化した。これらの結果は、NW の上下でストイキオメトリーのずれが生じ、As が枯渇しやすい NW 下部(基板側)で In リッチになり、メタリックな伝導を示しているものと推測される。

ex-situ 法による複合構造形成に関しては、上述のように NW 形成の進捗が思わしくなかったため、InGaAs 系 2 次元電子ガスを利用して研究を進めた。図 3(a)(b)に作製した CoFe-InGaAs スピンバルブデバイスと得られた非局所スピンバルブ特性を示す。詳細解析により、平均自由行程・スピン軌道緩和長より十分長いスピン拡散長が得られ、スピン FET 応用に向けて重要な 1 ステップを示すことができた。この他、前処理を含めた FM 堆積技術が要素技術となるため、原子層堆積(ALD)による極薄 Al2O3・MgO の形成に注力し、基本的な成膜条件を得るに至った。

in-situ 法による複合構造形成についても、NW で進めることは難しかったため、プレーナー上での検討を行った。スピンデバイス応用を見据え、半絶縁性 GaAs(111)B 基板上に InAs 厚膜を成長し、さらに MnAs 薄膜の連続成長を試みた。まず、得られた試料を X 線回折により評価し、図 4(a)の φ 測定から GaAs・InAs の 3 回対称性とともに NiAs 型

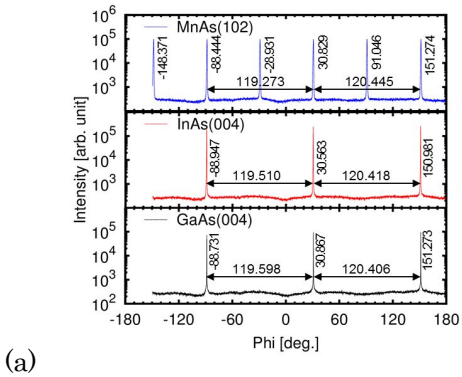


(a)

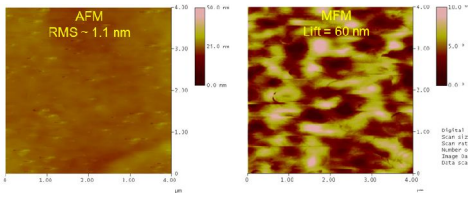


(b)

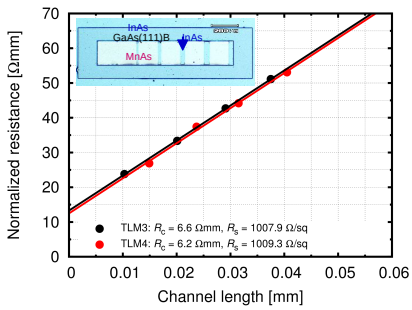
図 3　(a) ex-situ 法による CoFe-InGaAs スピンバルブデバイス、(b) 非局所スピンバルブ特性



(a)

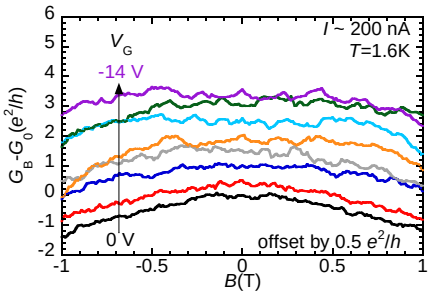


(b)

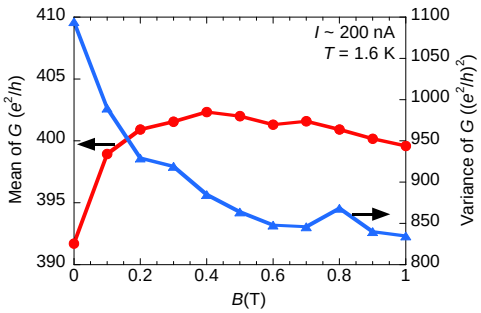


(c)

図 4　MnAs/InAs/GaAs(111)B 試料の
(a) X 線回折φ測定結果、
(b) 原子間力・磁気力顕微鏡像、
(c) TLM 測定結果



(a)



(b)

図 5　並列 InAs NWFET の
(a) コンダクタンス変化、
(b) 平均化したコンダクタンス・分散

MnAs の 6 回対称性を確認した。また図 4(b)に示す磁気力顕微鏡により、MnAs が磁気構造を有することを確認した。続いて、ウェットエッチング技術による MnAs 微細加工の検討を進め、伝送線路モデル(TLM)デバイスを試作し、図 4(c)に示す基礎的な電気的評価を行った。その結果、MnAs-InAs 接合が良好なオーミック接合(コンタクト抵抗: 6 ohm-mm)であることを確認し、InAs NW コアと MnAs シェルの複合構造形成への展開には至らなかったが、スピンデバイス応用に向けて有望な知見を得た。

InAs NW の電気的計測に関しては、再構築した超伝導マグネット付クライオスタット・ロックイン増幅システムを用いて並列 InAs NWFET のスピン輸送特性評価を行った。図 5(a)はコンダクタンスの振る舞いを示しており、揺らぎが大きく、スピン軌道結合の存在を示唆する、弱反局在を明確に見ることは難しかった。図 5(b)は広いゲート電圧範囲で平均化したコンダクタンス・分散を示している。零磁場においてコンダクタンスはディップを示したが、分散はピークを示し、スピン軌道結合が存在している可能性が示唆された。ただし、均一性・収率やメタリック伝導領域が存在する点等を考慮すると、スピン物性に関する定性的な議論においても、明確な結論を得るにはさらなる評価が必要不可欠であると思われる。

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

1) S. Hidaka, T. Kondo, M. Akabori, and S. Yamada: “Verification of electrical spin injection into InGaAs two-dimensional electron gas from CoFe electrode by four-terminal non-local geometry”, AIP Conf. Proc., Vol. 1566, pp. 329-330 (2013). [査読有]
2) M. Akabori and S. Yamada: “Magneto-transport properties of InAs nanowires laterally-grown by selective area molecular beam epitaxy on GaAs (110) masked substrates”, AIP Conf. Proc., Vol. 1566, pp. 219-220 (2013). [査読有]
3) S. Hidaka, M. Akabori, and S. Yamada: “High-efficient long spin coherence electrical spin injection in CoFe/InGaAs two-dimensional electron gas lateral spin-valve devices”, Appl. Phys. Express, Vol. 5, pp. 113001-1-3 (2012). [査読有]

〔学会発表〕（計 12 件）

1) （招待講演）赤堀誠志：「In(Ga)As 系 2DEG・ナノワイヤにおける伝導電子のスピン物性」、応用物理学会応用電子物性分科会研究例会、2015 年 6 月 23 日、首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス(東京都千代田区).

2) Md. E. Islam, C. T. Nguyen, M. Akabori: “Contact properties of MnAs/InAs grown on GaAs(111)B by molecular beam epitaxy”, the 5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, 2015 年 6 月 16-19 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市).
3) C. T. Nguyen, Md. E. Islam, M. Akabori: “Molecular beam epitaxial growth of MnAs/InAs/GaAs(111)B heterostructure”、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 11-14 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県相模原市).
4) グエン・コン・タン、赤堀誠志：「面内配向 InAs ナノワイヤのウェットエッチ狭窄」、平成 26 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、2014 年 11 月 7-8 日、富山大学五福キャンパス(富山県富山市).
5) C. T. Nguyen and M. Akabori: “In-plane oriented InAs nanowire field-effect transistors formed by combination of selective area molecular beam epitaxy and wet-etch thinning process”, 2014 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, 2014 年 7 月 1-3 日, 金沢市文化ホール(石川県金沢市).
6) 赤堀誠志、村上達也、山田省二：「領域選択分子線エピタキシーによる GaAs(211)B マスク基板上への面内配向 InAs ナノワイヤの形成」、第 74 回応用物理学会学術講演会、2013 年 9 月 16-20 日、同志社大学京田辺キャンパス(京都府京田辺市).
7) 赤堀誠志、村上達也、山田省二：「GaAs 上の領域選択分子線成長による面内配向 InAs ナノワイヤの試作と電気的評価」、電子情報通信学会技術研究報告、2013 年 8 月 8-9 日、富山大学五福キャンパス(富山県富山市).
8) M. Akabori, T. Murakami, and S. Yamada: “In-plane oriented InAs nanowire formation by selsctive area molecular beam epitaxy on GaAs (211)B substrates”, the 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, July 1-5 (2013), Wroclaw, Poland.
9) 赤堀誠志、山田省二：「GaAs(110)上の選択成長により形成した InAs ナノワイヤの電子輸送特性」、日本物理学会 2012 秋季大会、2012 年 9 月 18-21 日、横浜国立大学(神奈川県横浜市).
10) 日高志郎、近藤太郎、赤堀誠志、山田省二：「強磁性電極/高 In 組成 InGaAs-2 次元電子系接合における非局所スピン注入のゲート電圧依存性」、日本物理学会 2012 秋季大会、2012 年 9 月 18-21 日、横浜国立大学(神奈川県横浜市).
11) M. Akabori and S. Yamada: “Magneto-transport properties of InAs nanowires laterally-grown by selective area molecular beam epitaxy on GaAs (110) masked substrates”, the 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, July 29 - August 3 (2012), Zurich, Switzerland.
12) S. Hidaka, T. Kondo, M. Akabori, and S. Yamada: “Verification of electrical spin injection into InGaAs two-dimensional electron gas from CoFe electrode by four-terminal non-local geometry”, the 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, July 29 - August 3 (2012), Zurich, Switzerland.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
http://www.jaist.ac.jp/ms/labo/akabori.html

６．研究組織

(1)研究代表者
赤堀　誠志（AKABORI MASASHI）
北陸先端科学技術大学院大学・ナノマテリアルテクノロジーセンター・准教授
研究者番号：50345667

(2)研究分担者
（　　）

研究者番号：

⑶**連携研究者**
山田 省二（YAMADA SYOJI）
北陸先端科学技術大学院大学・ナノマテリアルテクノロジーセンター・教授
研究者番号：00262593