

研究報告書

「ナノ・スピンモーターの開発」

研究タイプ: 通常型(5年型)

研究期間: 平成21年10月～平成27年3月

研究者: 廣畑 貴文

1. 研究のねらい

本研究では電子スピンと磁気モーメントの相互作用を利用して、高効率のナノスケールのモーターを開発することを目指す。具体的には、半導体中に注入されたスピンが生成するスピン伝達トルクを利用して強磁性体ナノドットの磁気モーメントを回転させることにより、ナノモーターを作製する。蓄積されたスピントルクによる磁気モーメントの反転は、電気伝導として検出・利用され始めているが、その回転・変調を実現した上でのナノモーターとしての利用は全く行われていない。これは全く新しいモーター駆動機能の創発であり、GHz 領域まで連続的な回転が見込まれる世界最高速のモーターとなり得る。

ナノ・スピンモーター機能創発のためにヨーク大学と東北大学各々における金属・半導体スピントロニクス知見を活用し、強磁性金属ナノ細線とナノドットを両端に接触させた半導体ナノ細線からなる面内配置型スピンモーターを作製する。このスピンモーターでは、強磁性スピン注入子からトンネル障壁層を透過する電荷流を伴わずに、バリステックにスピン流のみが流れ込む。このスピン流は、高橋と前川が理論的に提案しているように[1]、トンネル障壁の有無にかかわらず強磁性層からなるスピン検出子によりスピン電圧(電位差)あるいはスピン流(電流)として検出できると期待される。これらに注入子界面ポテンシャル制御もしくは半導体上ゲート電圧印加を行うことで、注入スピン回転制御と強磁性体ナノドットによる検出技術を確立することを目指す。ここで、最先端の超高真空成膜(ボトムアップ)と電子線描画及びイオンミリング(トップダウン)技術の組み合わせによる素子作製と、原子レベル断面観察技術によるフィードバックを併せた、新たなナノスケール・スピントロニクス素子作製手法を確立する。このようなナノ・スピンモーターは従来のスピントロニクスでは注目されてこなかったが、将来のナノシステム作製における非常に重要な基幹技術となると期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

現在のナノロボティクスにおいて、微細化された高効率な駆動系の組み込みが重要な課題である。その解決策として本研究では、電子スピンを利用したスピンモーターの作製を提案した[特許出願 1]。3端子トランジスタ構造において、注入された電子スピンの方向をゲート電圧印加により回転・変調し、検出子の強磁性体ナノドットの磁気モーメントを回転させモーター駆動する。この回転は数 10 nm 離れて設置する強磁性体に漏洩磁場を通じて伝達することで伝達ロスを低減することが期待される。

本研究遂行にあたり、年度ごとに以下の5つの研究テーマを設定した。

(A) 面内スピンバルブ素子の作製

(B) 電圧制御型ゲートの組み込み

- (C) 電圧制御型スピンモーターの動作確認
- (D) ゲート電極組み込み
- (E) ゲート電極制御型スピンモーターの動作確認。

3年目を終了した段階でテーマA~Cを達成し、中間報告を行った。特に、テーマAではFeとAs原子が完全に分離した理想的な界面を世界で初めて実現した。テーマBとCでは、理想的な界面での共鳴準位を用いたスピン偏極の変調を目指したが、計算上も実験的にも動作しないことが判明した。その後2年間でゲート電極の組み込みに置き換えてのスピン流の増幅[特許出願2]とモーター動作の確認を行った。

このようなナノスケール永久磁石の電氣的制御は新たな試みであり、期待される高周波応答性から安定した高回転モーターという要求に応じられるものと思われる。同時に本研究提案の素子は電氣的検出に置き換えることで、容易に3端子スピントランジスタに应用可能である。スピントランジスタは、20年近く前に提案されてきたにもかかわらず、いまだに実現されていない。これらの技術を利用して高周波応用、ロジック回路作製、スピンメモリへの組み込みなどが期待される。

(2) 詳細

研究テーマA「面内スピンバルブ素子の作製」

1) 面内スピンバルブ素子の作製手法の確立

東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設の大野研究室に既存の超高真空成膜装置を利用して、単結晶GaAs(001)基板の上に2次元電子ガス(2DEG)層をエピタキシャル成長させた。その後、ヨーク大学電気学科でさきがけ本研究にて設置された超高真空成膜装置を用いて、GaAs基板の上にエピタキシャルFe層を5nm成長させ、3nm厚のAu層でキャップした。この試料にレジストを塗布し、フォトリソグラフィー装置を使って線幅100 μm のGaAs電極をパターンニングし、硝酸もしくはアンモニア水溶液を用いて化学的に削り出した。引き続き、再びフォトリソグラフィー装置を用いて線幅10 μm のFe電極をパターンニングし、Arイオンミリング装置で描画された電極周囲の領域を100nm程度の深さまでミリングした。電流の短絡を防ぐために、削り出した箇所に熱硬化樹脂膜を基板表面と高さがほぼ等しくなるように塗布し硬化させた。再度この基板の上にレジストを塗布し、電子線描画装置を用いてFe電極上に線幅5~8 μm の電極をパターンニングし、Ti/Auを成膜して伝導特性測定用電極とした。この際、強磁性電極間距離は、GaAs 2DEG中でのスピン拡散長[2]を考慮して、500nmから10 μm の範囲で系統的に変化させた。以上により、3端子及び4端子面内スピンバルブ素子を作製した。

上記の通り作製した面内スピンバルブ素子をヨーク大学ナノセンターにおいて断面透過型電子顕微鏡(TEM)観察することで、その界面を評価し成膜過程を最適化した。JEOL JEM-2200FSを用いて、原子レベルの分光解析を行い、また原子間距離の乱れなどを綿密に評価することで、界面での結合状態を正確に把握した(図1参照)。この結果、清浄な界面を形成する試料作成方法を確立することに成功した[論文発表3]。

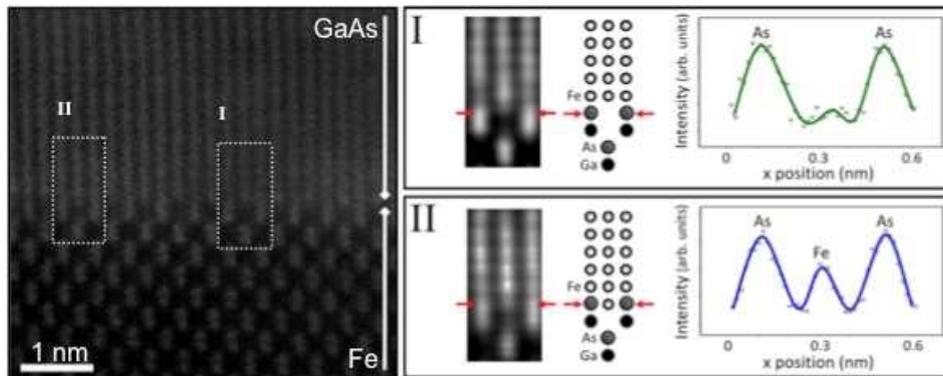


図 1 GaAs 基板[110]方向の断面 TEM 像:I) Fe/As 完全分離界面と、II) Fe-As 混合界面。

2) スピン偏極電流注入・変調・検出技法の確立

上述の最適化された3端子面内スピバルブ素子を用いて、GaAs 基板中へのスピン注入・検出を実現した[図 2a)参照]。こうした素子においては、強磁性ナノ細線からスピン偏極電子を非磁性ナノ細線に注入し、蓄積された電子スピンをもう一方の強磁性ナノ細線を用いて検出する。その際に、非局所測定を行うことにより、電子の流れを伴わないスピン流を非磁性体中に生成できるという大きな利点を有する。3端子素子の中央 Fe 電極からスピン偏極電流を GaAs 電極に注入し、電気伝導特性も測定した。その際に、GaAs メサ面直方向に磁場を印加し注入された電子スピンをラーマー回転させることで、Hanle 効果を測定した。図 2b)及び c)に示す通り、検出子側の電位差が垂直磁場に応じて Lorentz 型に変調することが分かった。

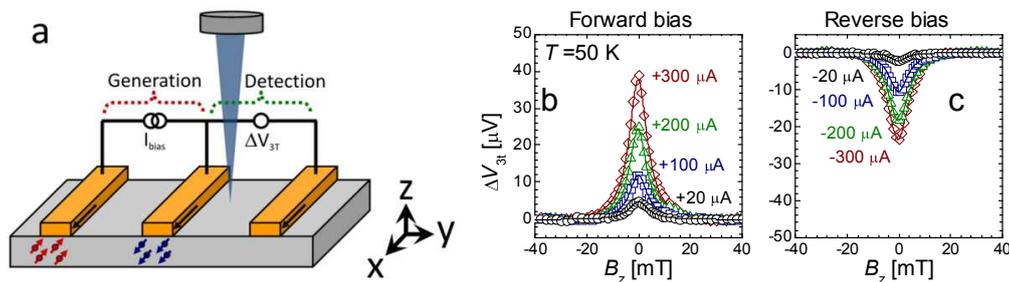


図 2 GaAs に注入されたスピン偏極電子の Hanle 効果の a) 測定模式図と結果[b) 順・c) 逆バイアス]。

そこで、注入されたスピン偏極電子の緩和時間を Hanle 効果の式(1)から見積もった[論文発表 3]。

$$\Delta V = \frac{\Delta V(0)}{1 + \left(\frac{g\mu_B B_z}{\hbar} \tau_s \right)^2} \quad (1)$$

ここで、 V : 電圧、 g : g 因子 ($g = -0.44$)、 μ_B : Bohr 磁子、 B_z : 印加磁場、 τ_s : スピン緩和時間である。図 3 から分かるように、スピン緩和時間は 15 ns 程度と見積もられ、先行研究[3]とほぼ同様の値が得られた。以上から我々の素子において、スピン偏極電流の電氣的な注入・検出と、垂直磁場印加による変調が可能であることが分かった[論文発表 3]。

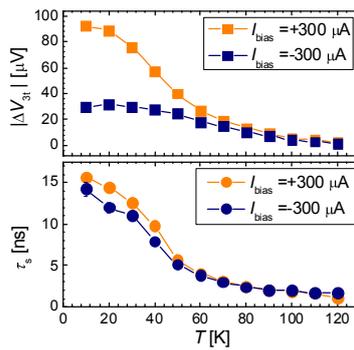


図 3 Hanle 効果とスピン緩和時間の見積もり。

また電流・電圧特性から、Brinkman-Dynes-Rowell モデルを用いて見積もった Fe/GaAs 界面のショットキー障壁高さは、60K 以下で 0.2 eV であり理論的に予測される値 \sim 0.6 eV よりもはるかに小さい。これは Fe-As 混合界面が混在(\sim 15%)しているためと考えられ、Fe/GaAs 完全分離界面の形成が重要である。

研究テーマ B 「電圧制御型ゲート電極の組み込み」

図 1 の断面 TEM 像から得られた原子間距離を用いて、Fe/GaAs 界面における上・下向きスピンの伝導特性を計算した[論文発表 3]。図 4 に示す通り、理想的な界面においてはフェルミ面近傍に界面共鳴準位(Interface resonance state, IRS)が現れず、IRS を介した電子伝導が存在しない。このため GaAs 中に注入される電子のスピン偏極率の反転は生じないということが明らかとなった。これに対して混成界面の場合には、IRS がフェルミ面を横切っており、スピン分極率の反転が見込まれる。これは過去の報告例[3]とも一致する。しかしながら、混成界面を介した電子伝導ではスピン分極の反転特性に再現性がなく、素子として利用することは極めて困難である。従って、安定したスピン注入を実現するためには Fe/GaAs 完全分離界面が必要となることが確認された。なお、本計算は名古屋大学物理工学科の井上先生、筑波大学物理工学系の本多先生との共同研究である。

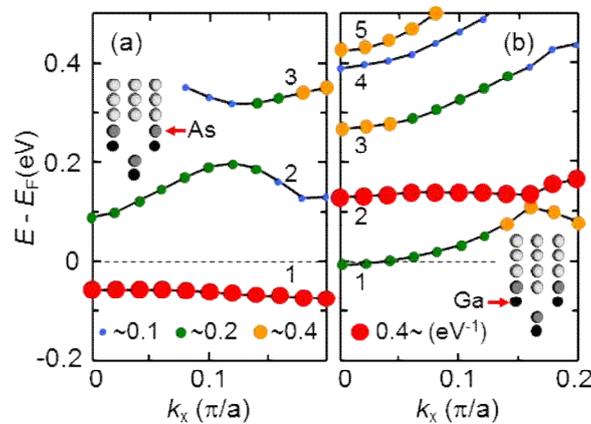


図 4 a) 完全分離した Fe/GaAs 理想界面[図 1-I])と、b) Fe-As 混合界面[図 1-II])のエネルギー分散の計算結果。

研究テーマ C 「電圧制御型スピンモーター動作確認」

3 端子素子の中央 Fe 電極からスピン偏極電流を GaAs 電極に注入し、磁気光学カー効果を用いた偏光回転角で注入されたスピン偏極電流の GaAs 電極内分布を観測した(図 2 参照)。この結果、図 5 に示すとおりスピン偏極電流は注入時の電圧に依存せず、単調に拡散することが分かった。これらの結果は、完全に Fe 層と GaAs 最表面 As 層が分離した理想的な界面構造について、スピン状態密度にはピークが表れないという我々の計算結果と一致する。従って、理想的な Fe/GaAs 界面では電圧制御型のスピンモーター駆動は実現しないことが実験的にも確認された。

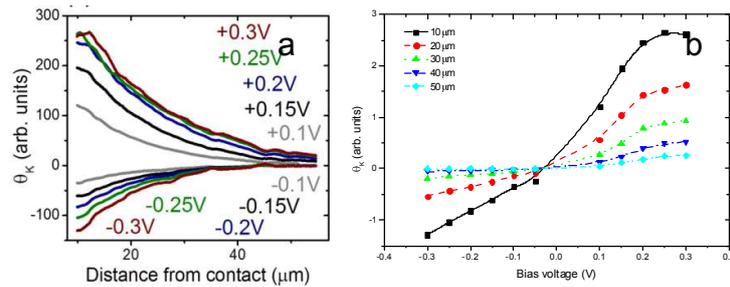


図 5 a) カー回転角変化の注入子からの距離依存性、及び b) カー回転角変化のバイアス電圧依存性。

研究テーマ D 「ゲート電極組み込み」

当初、上述の理想的な Fe/GaAs(001)界面を用いたナノ・スピンモーターを作製する計画であったが、東日本大震災とそれに続く人事異動のために共同研究先である東北大学電気通信研究所での GaAs 基板作成が困難となった。そこで $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ を強磁性体に、Cu を非磁性体に用いた、図 6a) のような面内スピンバルブ構造を作製した。このような全金属ナノ・スピンバルブ素子ではゲート電極の組み込みがサイズの的に困難であるため、内部を流れるスピン偏極電流の増幅を目指した[論文発表 1]。図 6a) に示すように非磁性体ナノ細線の形状を直角三角形に加工することで、一方向のスピン流(図 6a においては左から右の流れ)のみを散乱させることに成功した。直角三角形の底辺が 100 nm で高さが 60 nm の場合には、直線の場合に比べて 7 倍以上の増幅を世界で初めて実現した。

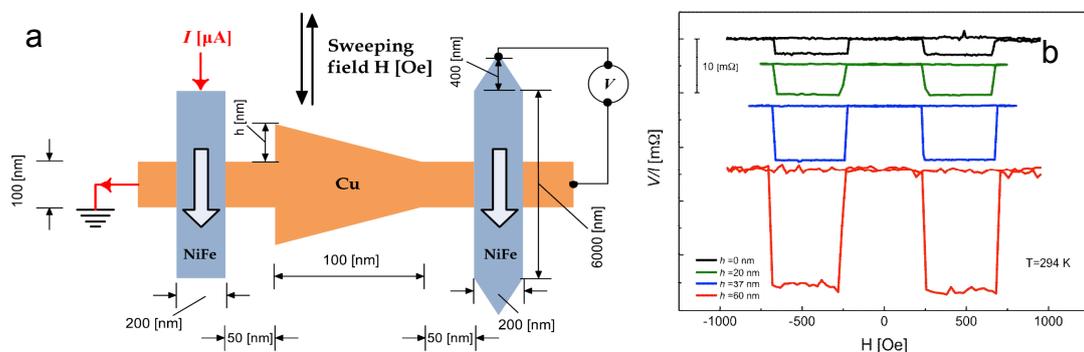


図 6 a) 面内スピンバルブ増幅素子の模式図、及び b) 非局所スピン流信号の増幅。

研究テーマ E 「ゲート電極制御型スピンモーターの動作確認」

以上の結果を踏まえて、図 7a)に示すような全金属ナノ・スピนมーターを作製した。馬蹄形を分割した強磁性体ナノ細線では、内部の磁気モーメントが円弧に沿って存在するため、左右の半馬蹄形電極から交互に電流を注入することで、反対向きのスピン偏極電子を中央非磁性体ナノ細線に注入できる。このような素子に外部磁場を印加した結果を図 7b)に示す。印加磁場に応じて明瞭な磁区構造の変化が観測された。これらの磁区構造を用いてナノ・スピนมーター動作を実証中である。

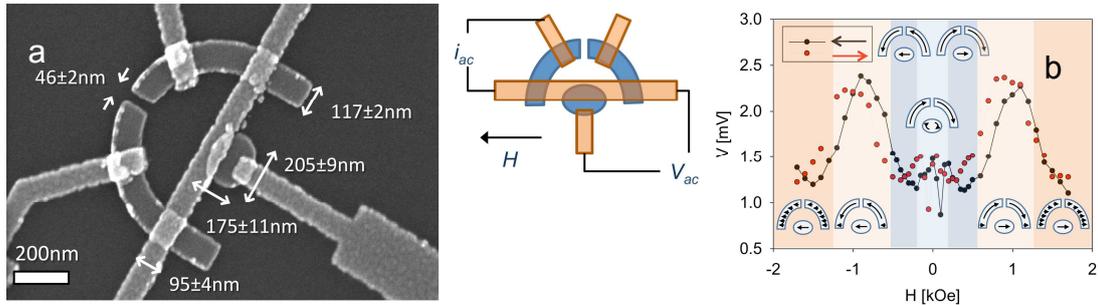


図 7 a) 全金属ナノ・スピนมーターと(b) 非局所スピン流信号の磁場依存性。

参考文献

- [1] S. Takahashi and S. Maekawa, *Physical Review B* **67**, 052409 (2003).
- [2] J. M. Kikkawa and D. D. Awschalom, *Nature* **397**, 139 (1999).
- [3] S. A. Crooker *et al.*, *Science* **309**, 2191 (2005).

3. 今後の展開

以上の通り、再現性よくスピン偏極電子を GaAs 基板中に注入する技術を世界で初めて確立した。さらに、本研究では基本概念を全金属ナノ・スピนมーターにて実現したが、この技術を応用して 4 端子面内スピンバルブ素子を作製中である。この際に、図 8 の模式図のように、検出子側の強磁性体をナノ細線からナノ円板に形状変更する。面内スピンバルブに生成されるスピン偏極電子がナノ円板に与えるスピン伝送トルクにより、強磁性ナノ円板検出子の磁気モーメントを回転させることを目指している。ここに、電磁場を印加するゲート電極[特許出願 2]を追加する予定であり(図 8 参照)、ゲート電極を用いて GaAs 基板中を流れるスピン偏極電子を回転させる計画である。本研究をさらに発展させることにより強磁性共鳴より十分に低い数 MHz 程度が実現可能と考えられ、期待される高周波応答性から安定した高回転モーターという要求に応じられるものと期待される。また強磁性絶縁体を用いた高効率化[特許出願 4]並びに磁気モーメントの反転過程を利用した高回転化[特許出願 5]についても検討する予定である。

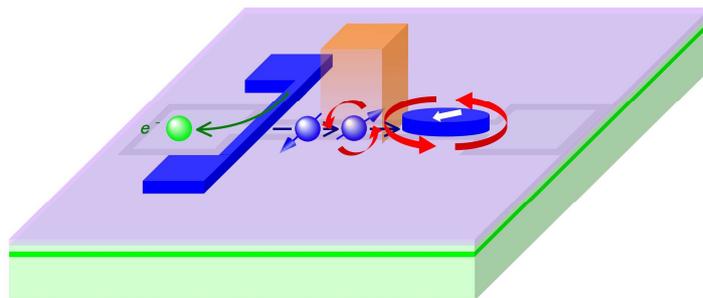


図 8 ナノ・スピนมーターの模式図。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

当初計画した 5 つの研究テーマのうちの 3 つを中間報告の時点で達成し、残る 2 つのテーマも本研究終了までにほぼ達成することができた。また、本研究に関連して特許を 5 件出願することができた。従って概ね計画通りに研究を進めることができていると考えている。獲得した知見及び真空成膜装置など購入した装置は今後の研究で引き続き活用して行く計画である。本研究課題で取り組んだ高周波ナノ・スピンモーターは幅広い応用可能性を秘めており、分野としての今後さらなる発展が期待される。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回(H26年度以降は年1回)の領域会議、及びH26年度終了成果報告会での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

半導体中に注入されたスピンの生成するスピン伝達トルクを利用し、強磁性体ナノドットの磁気モーメントを回転させることによりナノ・スピンモーターを作製することを目標としている。回転・変調を実現した上でスピントルクによる磁気モーメントの反転をナノ・スピンモーターとして利用することは世界的にこれまで行われていない。これは全く新しいモーター駆動機能の創発であり、GHz 領域まで連続的な回転が見込まれる世界最高速のモーターとなり得る極めて挑戦的課題である。本研究遂行にあたり、年度ごとに以下の 5 つの研究テーマが設定されている。(A) 面内スピンバルブ素子の作製 (B) 電圧制御型ゲートの組み込み (C) 電圧制御型スピンモーターの動作確認 (D) ゲート電極組み込み (E) ゲート電極制御型スピンモーターの動作確認。

3 年目を終了した段階でテーマ A~C が達成されている。特に、テーマ A では Fe と As 原子が完全に分離した理想的な界面を世界で初めて実現した。原子間距離の乱れなどを綿密に評価することで、界面での結合状態を正確に把握し清浄な界面を形成する試料作成法を世界に先駆けて確立したことは今後のナノテクノロジーをリードする有力な手法になろう。テーマ B と C では、理想的な界面での共鳴準位を用いたスピン偏極の変調を目指し、計算上も実験的にも動作しないことを明らかにした。その後の 2 年間でゲート電極の組み込みに置き換えてのスピン流の増幅と全金属ナノ・スピンモーターを作製しモーター動作の確認を行った。馬蹄形を分割した強磁性体ナノ細線では、左右の半馬蹄形電極から交互に電流を注入することで、反対向きのスピン偏極電子を中央非磁性体ナノ細線に注入できる。このような素子に外部磁場を印加した結果、印加磁場に応じて明瞭な磁区構造の変化が観察された。これらの磁区構造を用いてナノ・スピンモーター動作を現在実証中である。

当初計画した 5 つの研究テーマはいずれも独創的な構想力と高いナノ技術と原子構造レベルでの解析力が要求される極めて挑戦的課題であるにもかかわらず、研究終了時までに目標をほぼ達成したものと高く評価できる。本研究を通じ、世界トップレベルの論文多数のほか、特許を 5 件出願したことも本研究のレベルの高さを証明している。

本研究課題で取り組んだ高周波ナノ・スピンモーターは高い独創性と構想力、世界レベル

の高真空製膜技術と原子レベルの構造解析力なくしては実現できないものである。現時点で高周波ナノ・スピンモーターが世界に先駆けて実現される直前にあり、これが実現すると、高周波応用、ロジック回路作製、スピンメモリへの組み込みなども可能になるだけでなく、将来は、ナノ医学、ターゲティング分子薬剤、分子分割など基幹ナノ技術として我が国のイノベーションをおこす可能性を秘めている。「さきがけ」で生まれた研究で、我が国の重要な基幹的基礎研究の成果として今後も継続的に支援することを強く要請したい。

尚、廣畑研究者は本さきがけ研究推進中に所属のヨーク大学の教授に昇進しただけでなく、地域の大学連合プロジェクトのリーダー、さらに磁気に関する国際組織の理事を務めるなど、すでに世界レベルで活動している我が国の重要な研究人財であり、本さきがけ研究での活動と成果がその飛躍の契機になっていることを付記しておく。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. R. M. Abdullah, A. J. Vick, B. A. Murphy and A. Hirohata. Spin-current amplification by a geometrical ratchet (Fast Track Communications). *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014, **47** (48), 482001(1)–482001(5).
2. A. Hirohata and K. Takanashi. Future perspectives for spintronic devices (Invited Review). *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014, **47** (19), 193001(1)–193001(40).
3. L. R. Fleet, K. Yoshida, H. Kobayashi, Y. Kaneko, S. Matsuzaka, Y. Ohno, H. Ohno, S. Honda, J. Inoue and A. Hirohata. Correlating the interface structure to spin injection in abrupt Fe/GaAs(001) films. *Physical Review B*. 2013, **87** (2), 024401(1)–024401(5).
4. L. R. Fleet, H. Kobayashi, Y. Ohno and A. Hirohata. Atomic interfacial structures in Fe/GaAs films. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011, **47** (10), 2756–2759.
5. L. R. Fleet, H. Kobayashi, Y. Ohno, J.-Y. Kim, C. H. W. Barnes and A. Hirohata. Interfacial structure and transport properties of Fe/GaAs(001). *Journal of Applied Physics*. 2011, **109** (7), 07C504(1)–07C504(3).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 5件

1.

発 明 者: 廣畑 貴文

発明の名称: スピンモーター及びスピン回転部材

出 願 人: 独立行政法人科学技術振興機構・ユニヴァーシティー オブ ヨーク

出 願 日: 2012/8/9

出 願 番 号: 特願 2012-177339

2.

発 明 者: 廣畑 貴文

発明の名称: スピン偏極トランジスタ素子

出 願 人: 独立行政法人科学技術振興機構・ユニヴァーシティー オブ ヨーク

出 願 日: 2012/8/14

出 願 番 号: 特願 2012-179763

3.

発明者：廣畑 貴文

発明の名称：スピナルブ素子

出願人：独立行政法人科学技術振興機構・ユニヴァーシティー オブ ヨーク

出願日：2012/11/8

出願番号：特願 2012-246581

4.

発明者：廣畑 貴文

発明の名称：スピン制御機構及びスピンデバイス

出願人：独立行政法人科学技術振興機構・ユニヴァーシティー オブ ヨーク

出願日：2013/10/31

出願番号：特願 2013-227153

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- | |
|--|
| 1. A. Hirohata, Wohlfarth Memorial Lecture on “Nano-spintronic devices,” Magnetism 2014 (2014/4/8, Manchester, UK). |
| 2. A. Hirohata, Royal Society Industry Fellowship (2013/2/5). |
| 3. L. R. Fleet, K. Yoshida, H. Kobayashi, Y. Kaneko, S. Matsuzaka, Y. Ohno, H. Ohno, S. Honda, J. Inoue and A. Hirohata, Transport and structural properties of the abrupt Fe/GaAs(001) interface (Invited), Energy Materials Nanotechnology Fall Meeting (2013/12/8, Orlando, FL, USA). |
| 4. A. Hirohata, Nano-spintronics (Invited), Quantum Science Symposium Asia (2013/11/25, Tokyo, Japan). |
| 5. L. R. Fleet, K. Yoshida, H. Kobayashi, Y. Kaneko, S. Matsuzaka, Y. Ohno, H. Ohno, S. Honda, J. Inoue and A. Hirohata, Transport and structural properties of the abrupt Fe/GaAs(001) interface, 12 th Joint MMM-Intermag Conference (2013/1/18, Chicago, IL, USA) – Best Poster Award. |