

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づく
ナノデバイス・システムの創製」
研究課題「スピン量子ドットメモリ創製のための
要素技術開発」

研究終了報告書

研究期間 平成13年12月～平成18年11月

研究代表者：猪俣浩一郎
((独)物質・材料研究機構、フェロー)

1 研究実施の概要

研究の構想

本研究は新しい原理に基づく超大容量不揮発性スピン量子メモリの創製を目的としており、その基本コンセプトは、選択トランジスタを不要とする強磁性トンネル接合 (MTJ) 素子をマトリックス状に配列させたクロスポイントアーキテクチャにある。本チームではそのための要素技術開発を目指した。具体的にはスイッチ機能をもつトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子、低電力書込み、および高速読出しを可能にする材料・デバイス技術の研究開発である。本メモリアーキテクチャを現行の MRAM と比較して図 1 (a) に示す。(b) は本研究で目指す、スイッチ機能をもつ TMR 素子の電流-電圧曲線の概念図である。

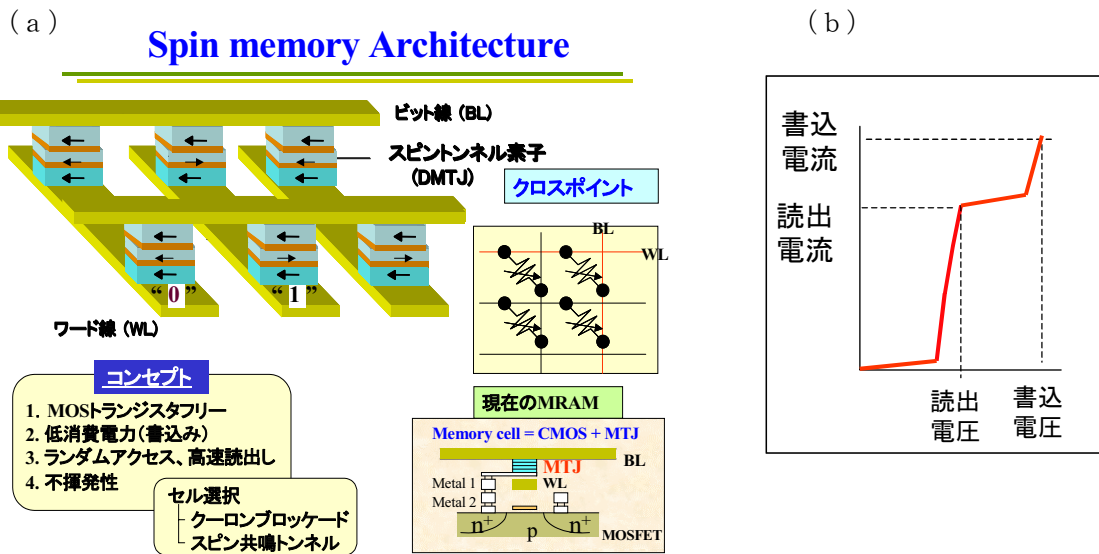


図 1 (a)スピン量子メモリアーキテクチャと(b)スイッチ機能をもつ MTJ 素子の模式的電流-電圧特性

研究の実施内容と成果

開発すべき要素技術をブレークダウンして下記のような研究課題を設定した。

- 1) スイッチ機能付きトンネル磁気抵抗効果素子開発に関する研究
 - 1-1) クーロンブロッケード(CB)を利用したスピン単一電子素子開発に関する研究
 - 1-2) スピン共鳴トンネル効果素子開発に関する研究 (平成 16 年 10 月から)
- 2) ハーフメタルの開発に関する研究
- 3) 自己差動読出し・スピン注入書込み技術の開発に関する研究
- 4) 反平行結合素子に関する研究
- 5) 新デバイス創製に関する研究 (平成 15 年 4 月から)
 - ・非局所スピン注入による磁化反転とスピンホール効果の理論的研究

期の途中から始めた上記二つの研究課題は、目標達成および世の中の状況変化に対応すべく設定したものである。以下、課題別に実施内容の概要を述べる。

- 1-1) クーロンブロッケード(CB)を利用したスピン単一電子素子開発に関する研究

スイッチ機能をもたせるための強磁性ナノ粒子の CB 発現、それに伴う TMR の電圧制御、およびそれらの室温動作を目標とし、次のような研究を行った。(1) Co ナノ粒子が分散したグラニューラー薄膜を用いた TMR の電圧制御の研究、(2) Co ナノ粒子の自己形成過程の研究、(3) 上記研究成果の組合せによる自己形成ナノ粒子を用いた TMR の電圧制御の研究、(4) 微小素子作製のための微細加工技術に関する研究、(5) 室温動作のための研究、(6) 超常磁性問題の克服に関する研究。その結果、微小素子試料において Co 磁性ナノ粒子に基づく明瞭な CB とクーロン階段を観測し、それに伴う TMR の振動的振舞いを見出した。これは、CB 現象を通じてトンネル抵抗や TMR を電圧制御できることを示している。CB の ON/OFF により一桁以上の抵抗変化を実現し、当初計画のスイッチ機能を有する TMR 素子が可能であることを実証した。室温動作に関しては、種々の検討に基づく机上の設計では実現可能なレベルの低抵抗トンネル障壁 (MgO) と、1 nm 級のナノ粒子の組合せで可能なことを得たが、実証するまでには至らなかった。原因は 1 nm 級のナノ粒子の均一配列が困難なこと、および障壁層の不均一性などに問題がある可能性が考えられる。一方、研究過程で Co ナノ粒子中のスピンの緩和時間が著しく増大し、バルクの場合の約 1 万倍となることを見出した。併せて低温ではあるが、Au ナノ粒子を用いてスピン蓄積に起因すると考えられる 10% を越す TMR の観測に成功した。この発見は、非磁性ナノ粒子のスピン蓄積による TMR を利用することで、超常磁性の問題を回避できるテラビット級スピン量子メモリの可能性を示唆している。これによって室温動作も期待できる。

1-2) スピン共鳴トンネル効果素子開発に関する研究 (平成 16 年 10 月から)

この研究開発は、上記スピン単一電子素子の室温動作を期間内に示すことが困難と思われたので、対策として平成 16 年 10 月にスタートさせた。もし理想的なスピン共鳴トンネル効果デバイスを創り出せれば、原理的にトンネル電流を電圧で制御しかつ TMR のエンハンスが期待できることから、スイッチ機能を備えた TMR 素子を開発できる可能性がある。また、磁性超薄膜の量子準位間隔は 1eV 程度と大きいことが予想されるので、室温動作も可能である。材料系としてはエピタキシャル成長多層膜を作製できること、および s 電子が優先的にトンネルできる電子構造であることを想定し Fe/MgO 系を選択、以下の二つの系について Fe 超薄膜中にスピン依存量子井戸を発現させることを試みた。

(1) 二つの MgO バリアで Fe 超薄膜を挟んだエピタキシャル二重トンネル接合素子

(2) Cr と MgO バリアで Fe 超薄膜を挟んだ一重トンネル接合素子

上記 (2) を採用した理由は、Cr のバンドが Fe の少数スピンバンドに類似し、多数スピンバンドに対してはエネルギーギャップを形成するため、Cr と MgO バリアとの間で多数スピン電子の量子閉じ込めが期待できるためである。結果は、両者において明瞭なスピン依存量子井戸の観測に成功し、それは室温でも観測できた。特に、(2) では MgO (001) 基板/Cr/Fe 超薄膜/MgO/Fe エピタキシャルトンネル接合をスパッタ法で作製し、Cr 層のフラット化および MgO バリアの (001) 配向の高度化をはかることで、Fe 超薄膜の膜厚が 0.6 nm~1.2 nm (設計値) のとき、多数スピンバンドの量子井戸形成に伴う明瞭な TMR のエンハンス、および電流 (I) -電圧 (V) 曲線の変調を世界で初めて、しかも室温で観測した。これにより期待通り、この接合がスイッチ機能を備えた TMR 素子になり得ることを実証できた。

2) ハーフメタルの開発に関する研究

高速読み出しのためには大きな信号電圧を得る必要があり、巨大 TMR が期待されるハーフメタルの開発に関する研究を行った。ハーフメタルはスピントロニクス of キーマテリアルであり、開発できればインパクトは極めて大きい。材料は構造が安定でありかつキュリー点の高い Co 基フルホイスラー合金 (L₂₁ 構造) に着目し、Co₂MnGe、Co₂MnSi、Co₂(Fe_xCr_{1-x})Al (CCFA) および Co₂Fe(Al_xSi_{1-x}) (CFAS) について研究を行った。薄膜作製には超高真空スパッタ装置を用い、イオンミリングとリソグラフィを用いて微細加工し TMR 素子を作製した。

基板加熱温度および薄膜作製後の熱処理温度を変えて薄膜の構造、磁性および TMR 特性を調べた。フルホイスラー合金には $L2_1$ 規則相のほかにも $B2$ (CsCl 型)、および $A2$ (完全不規則な bcc 構造) が存在し規則-不規則変態を起こすこと、 $A2$ が存在すると TMR が大きく低下すること、基板加熱よりも成膜後熱処理の方が表面ラフネスの小さい膜が得られることなどがわかった。その中で、CCFA においてホイスラー合金を用いて世界で初めて TMR を観測するとともに、不規則構造の $B2$ でも巨大 TMR が得られる可能性を見出した。この発見は非常に重要であり、ハーフメタル特性をフルホイスラー合金で得る可能性が高いことを示唆している。研究する中で CCFA では $A2$ の存在を避け難いことも判明した。一方、CFAS では熱処理条件によって X 線的には $A2$ のない $B2$ または $L2_1$ を得ることができることを見出すとともに、 MgO バリア上に $B2$ または $L2_1$ 構造を作製することに成功した。その結果、CFAS/ MgO /CFAS エピタキシャルトンネル接合素子を作製し、室温で 220% の巨大 TMR を得た。この値はハーフメタル材料としては世界最高値であり、低温での TMR から求めたスピン分極率は 80% を超える。これにより夢のハーフメタルは現実的となった。

3) 反平行結合素子に関する研究

二つの強磁性層が非磁性層を介して反平行に結合した反平行結合 (SyAF) フリー層は、磁束が外部に漏れにくく、ビット間の磁氣的干渉が解消されるので大容量メモリ素子として有効であると予想し、いろいろな角度から次のような研究を行った。(1) 計算機シミュレーションによる磁化過程の予測、(2) MFM による磁区構造の観察、(3) イオンミリング法による微細素子作製技術の開発、(4) GMR および TMR 素子作製とその磁化反転および磁気抵抗特性の研究、(5) 熱揺らぎ耐性に関する研究、(6) スピン注入磁化反転に関する研究。その結果、SyAF は単磁区を形成しやすく、アスペクト比 $k = 1$ でも単磁区になることを発見した。その結果を受けて作製した SyAF をフリー層とする $k = 1$ の TMR 素子において、磁化反転磁場は素子サイズに依存せず、その傾向は反平行結合が強い程が強いことを見出した。この素子サイズに依存しない磁化反転磁場は従来の常識を覆す画期的な結果である。また、SyAF フリー層は従来の単層フリー層に比べて熱揺らぎ耐性に優れることを明らかにした。さらに、SyAF に対してもスピン注入磁化反転が可能であること、その磁化反転電流密度は単層膜よりも実質的に小さくなることを発見した。一方、Ru スペースを用いることで従来より一桁以上小さな $1 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ の電流密度での磁化反転にも成功した。以上の結果、SyAF は大容量メモリ素子のキー材料になることが判明した。

4) 自己差動読出し・スピン注入書き込み技術の開発に関する研究

将来の大容量 MRAM、引いてはスピン量子メモリ開発を想定し、自己差動読出し・スピン注入書き込み型メモリ素子およびその検出法の開発を行った。この技術は原理的に出力を倍増できるとともに、ノイズに強いという特徴をもつ。研究は (1) 自己差動素子の作製技術およびその評価装置の設計・試作、(2) 低アスペクト比 ($k = 1$) のメモリセルを目指した MTJ 素子構造の検討：反平行結合 (SyAF) フリー層の有効性の検証、(3) 低抵抗自己差動増幅素子の作製とスピン注入書き込み・自己差動読出しの実現、を目標に行った。結果は、CMP プロセスの採用による自己差動素子の作製技術確立および自己差動読出しに成功するとともに、SyAF フリー層の熱揺らぎ耐性が高いことを検証し、その大容量メモリ素子としての有効性を確認した。さらに、スピン注入書き込みを実現するため、メモリ素子の困難軸方向にアシスト磁界を印加する方法を考案し、電流密度を $2 \times 10^6 \text{A/cm}^2$ に一桁低減することに成功した。この成果を受けて、 MgO バリアを用いた低抵抗自己差動増幅素子およびスピン注入書き込み・自己差動読出し用素子を試作した結果、目標のスピン注入書き込み・自己差動読み出しを実証できた。また、TMR 素子に対してスピン注入による繰り返し書き込み実験を行い、 10^4 回以上の読み出し/書き込み特性を確認し、スピン注入磁化反転が高い実用性を有することを検証した。

5) 非局所スピン注入に関する理論的研究

非局所スピン注入による磁化反転とスピホール効果の理論的研究を行った。強磁性体 (F1) と非磁性体からなる系に非局所的スピン注入を行うと、非磁性体中に電荷流の伴わない純粋のスピン流とスピン蓄積を生成できる。本研究ではこの非磁性体にパーマロイなどの微小な強磁性体 (F2) を接触させると、F2 がスピンの吸収体として働き大きな純粋スピン流が F2 に流出し、この非局所スピン流により 10^6A/cm^2 の電流密度で F2 の磁化反転が可能であることを理論的に示した。特に、非磁性体が半導体や超伝導体の場合、その効果が顕著である。また、この純粋スピン流はホール電圧を誘起し、非局所スピホール効果が観測可能であることを予測した。これらの予測は実験でも検証された。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

現在の MRAM のメモリセルは一つのトンネル接合 (MTJ) 素子と一つの選択トランジスタ (CMOS) からなり、DRAM におけるキャパシタを MTJ で置換えた構造である。CMOS を用いる理由は MTJ にスイッチ機能がないからである。MRAM はまた書き込みに電流磁場を用いている。このような素子構造および書き込み法ではギガビット以上の大容量化は望めないと考え、構想として、スイッチ機能をもつ MTJ 素子を開発し、それをマトリクス状に配置した選択トランジスタフリーのクロスポイントアーキテクチャが将来の理想的な不揮発性メモリになるのではないかと考えた。これをユニバーサルメモリにするためには低電流で書き込み、高速で読み出す必要がある。前者に対してはスピン注入法を、後者に対しては大きな出力が期待できるハーフメタルの開発を考えた。また、出力向上策として出力の倍増が期待される自己差動検出法を開発することにした。さらに、大容量化すればメモリ素子間の磁氣的干渉が懸念されることから、それを解決するために磁束の漏れの少ない構造として反平行結合 3 層をメモリ層とする MTJ 素子を開発した。

本プロジェクトでは上述した各要素技術を開発するための研究を行い、それらをインテグレートとした技術開発は次のステップと位置づけた。要素技術開発は以下のように各グループで分担し、互いに関係する課題については随時情報交換と技術討論を行いながら協力的に進めた。全体のすり合わせは年 2 回の研究会 (非公開) の中で行い、梶村統括にもご出席頂いて意見を賜った。進める中でいくつかの計画変更も行った。そのひとつは、当初、スイッチ機能付き MTJ 素子としてクーロンブロッケード (CB) を利用したスピン単一電子素子の開発を想定したが、研究を進める過程で室温動作を期間内に実現することが困難と判断され、対策として新たにスピン共鳴トンネル素子の研究開発を加えることにした。これは期間中結晶配向した MgO バリアが世の中で登場し、これを利用すればエピタキシャル MTJ 素子を創れるので、スピン共鳴トンネル素子を開発できるのではないかと考えたことに始まる。二つ目は、当初、前川グループは高梨グループに所属し理論的サポートを担当していたが、より積極的に活動し広く理論的立場から将来のスピンエレクトロニクス分野の開拓を期待して、平成 15 年度に独立して頂いた。

各要素技術開発の分担は以下のとおりである。

当初計画

- 1) スイッチ機能付きトンネル磁気抵抗効果素子の研究開発
 - 1-1) クーロンブロッケードを利用したスピン単一電子素子開発に関する研究
高梨グループ、前川グループ
- 2) 高速読み出し技術に関する研究
 - 2-1) ハーフメタルの開発に関する研究
猪俣グループ

2-2) 自己差動読み出し・スピン注入書き込み技術の開発に関する研究
齊藤グループ

3) 低電力書き込み技術に関する研究

3-1) 反平行結合素子の磁化反転に関する研究 猪俣グループ

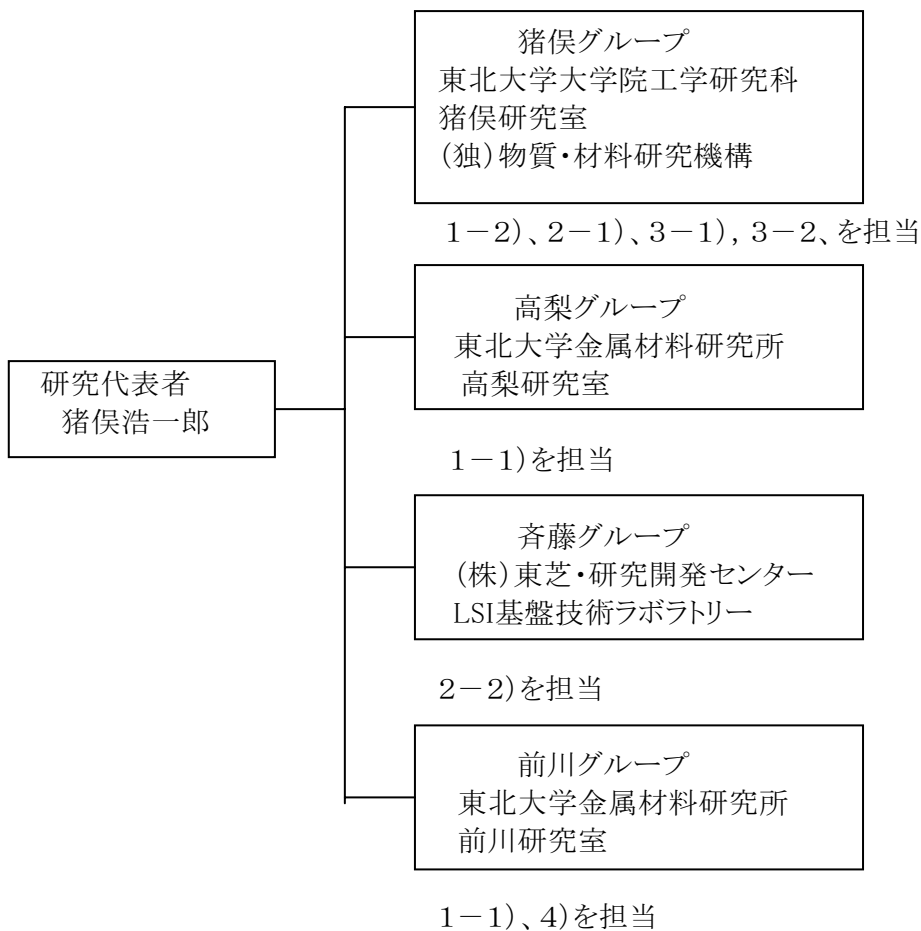
3-2) スピン注入磁化反転に関する研究 猪俣グループ
齊藤グループ

追加研究項目と担当

1-2) スピン共鳴トンネル効果素子に関する研究開発
(平成16年10月から) 猪俣グループ

4) 非局所スピン注入に関する理論的研究
(平成15年4月から) 前川グループ

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 クーロンブロッケイドを用いたスピン量子ドットメモリ素子開発に関する研究 (東北大学金属材料研究所 高梨グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

クーロンブロッケイドをスイッチング機能に利用したスピン量子ドットメモリ素子の開発に関して、ナノ粒子の創製、微小素子構造化、磁気伝導特性評価、TMR の電圧制御等の研究を行った。以下に、主要な成果を示す。

(1-a) Co-Al-O グラニューラー薄膜におけるスピン依存単一電子トンネル効果

Co-Al-O グラニューラー構造薄膜は、アモルファスの Al-O マトリックス中に Co ナノ粒子が分散した構造を有しており、これを用いた微小素子構造試料において TMR の電圧制御の研究を行った。**Fig. 1** は Co-Al-O グラニューラー薄膜の TEM 像の 1 例である。本研究で用いた Co-Al-O 薄膜は、反応性スパッタにより作製しており、膜成長時の相分離過程によりナノスケールのグラニューラー構造が自己形成される。**Fig. 2** に TMR の電圧制御のために、電子線リソグラフィおよび Ar イオンミリングによって作製した微小素子構造試料の模式図を示す。平均層厚 15 nm の $\text{Co}_{31}\text{Al}_{24}\text{O}_{45}$ グラニューラー薄膜の上部に Co 電極を、下部に Al 電極を配し、更に Co-Al-O 層と Al 下部電極の間にプラズマ酸化による約 1 nm の厚さの Al-O 層を挿入してある。この薄い Al-O 層は、Co ナノ粒子と Al 電極間のトンネル障壁が電流のボトルネックとなるように設けたものであり、クーロン階段の発現や TMR の電圧制御の明瞭な観測に必要なものである。多数の試料について測定の結果、Co-Al-O 層の設計層厚が 15 nm より薄い場合には、粒子を介したトンネル伝導（クーロンブロッケイド）が観測されなかったため、層厚に揺ぎがあり、伝導は局所的に生じていると考えられる。

Fig. 3 に、Co-Al-O 薄膜を用いたナノ構造試料の磁気伝導特性の測定結果を示す。Fig. 3(a) の上段は、4.2 K における I-V 特性と TMR のバイアス電圧依存性である。I-V 特性に階段状の変化、すなわちクーロン階段が生じており、Co ナノ粒子を介した電気伝導の観測に成功していることが分かる。また、クーロン階段が単一周期を有することから、Co 粒子を介して上下電極をつなぐ電流経路は一つであると考えられる。この観測結果において、特に注目される点は、I-V 曲線が外部磁場によって変化していることであり、大きさだけでなく形状も変化している。この変化から、TMR のバイアス電圧依存性が得られ、それを Fig. 3(a) 下段に示した。TMR がバイアス電圧によって振動しており、さらに符号の反転が振

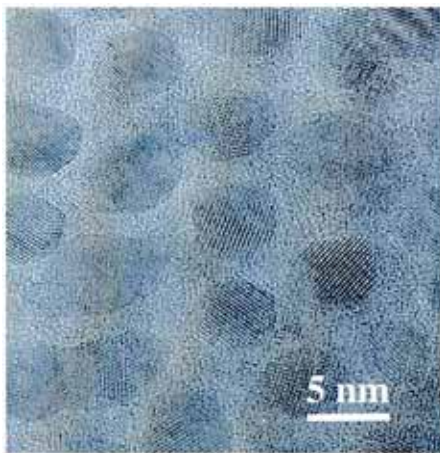


Fig. 1. TEM image of a Co-Al-O granular film.

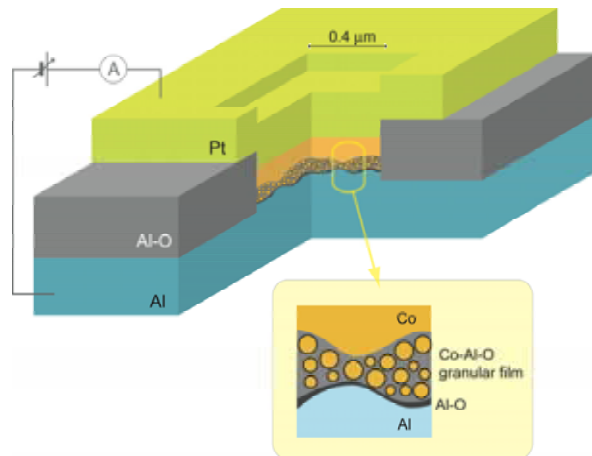


Fig. 2. Schematic illustration of a sample structure with a Co-Al-O granular film.

動とともに現れている。この符号反転は、磁気抵抗曲線（電気抵抗の磁場依存性）によっても確認しており、Fig. 3(b)にバイアス電圧がそれぞれ $V=0.05$ V, 0.125 V のときの磁気抵抗曲線を示す。 $V=0.125$ V のときに磁場印加によって抵抗が減少しているのに対し、 $V=0.05$ V では逆に増大していることが分かる。本実験は、スピン依存単一電子トンネル効果を世界で最初に明瞭に観測したものであり、TMR の大きさおよび符号がバイアス電圧によって制御できることを示す重要な成果である。なお、磁気抵抗曲線の原点シフトは、Coナノ粒子表面の酸化による交換磁気異方性であると考えられる。

TMR の振動は理論計算から予想されている現象であるが、TMR の符号反転は予想外の結果であった。そこでその解明のため、単一電子トンネル効果のオーソドックス理論に基づく解析を行った（前川グループ）。伝導の解析にスピン依存性を取り入れ、ナノ粒子中でのスピン蓄積効果の可能性を検討した。Fig. 4 は、計算に用いた試料構造のモデルと計算結果の1例である。粒子電極間のトンネル抵抗やキャパシタンスは測定結果をもとに決めた。また、ボトルネック層の効果として、Al に対応する非磁性電極とナノ粒子間の左側の接合抵抗を右側のそれより十分大きいとした。ナノ粒子の個数については、先に述べたように、Co-Al-O 層の層厚がクーロンブロッケイドの観測される最小値となっているため、1個と仮定した。（なお、2個以上の粒子を仮定した計算も行ったが、定性的な結果は変わらなかった。）Fig. 4(c)および(d)の I-V 特性と TMR はナノ粒子中のスピン緩和時間が無限大と仮定した場合の結果であり、実験で観測された TMR の振動および符号反転現象を再現している。Fig. 4(b)は、ナノ粒子中の各スピン状態に対する化学ポテンシャルの変化量を表しており、ナノ粒子中にスピンが蓄積され、そのことが I-V 特性や TMR の電圧依存性に大きな影響を及ぼしていることを示している。Fig. 5 は、ナノ粒子中のスピン緩和時間をパラメータとして、実験結果をフィットした結果である。得られたスピン緩和時間は約 150 nsec であり、CPP-GMR の実験から求められたバルク値（ ~ 10 psec）より約 4 桁大きい。このことは、ナノ粒子中においてスピン緩和時間が著しく増大することを示している。本結果は当初計画では予想していなかった新しい発見であり、また同時にナノ粒子がスピンエレクトロニクス全般において有用な材料であることを示す重要な結果である。スピン緩和時間が増大するメカニズムについては、更に研究が必要であるが、伝導電子準位の離散化やスピン波の励起エネルギーの離散化等、ナノ粒子のサイズ効果が直接関与していると考えられる。

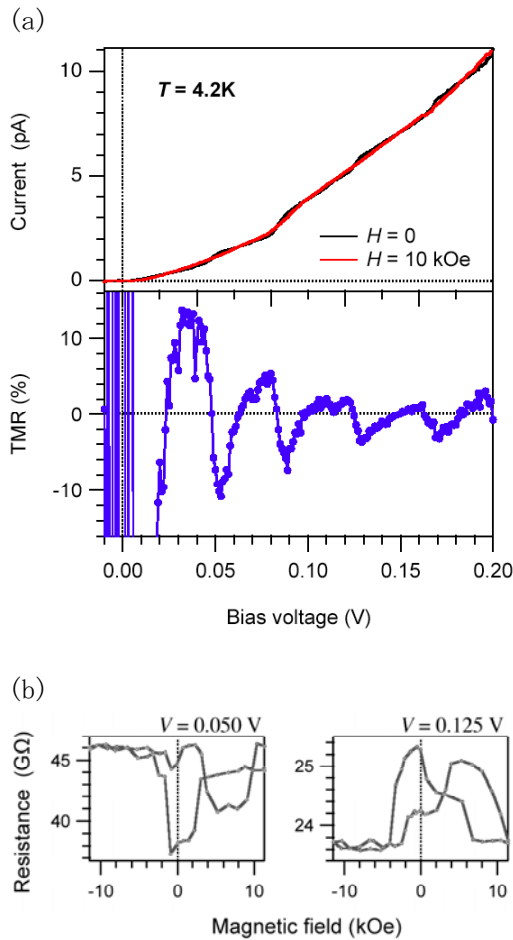


Fig.3 Magnetotransport properties of a nanopillar structure of Al/Al-O/Co-Al-O/Co at 4.2 K; (a): current and TMR as a function of bias voltage, (b): magnetoresistance curves at $V=0.05$ and 0.125 V.

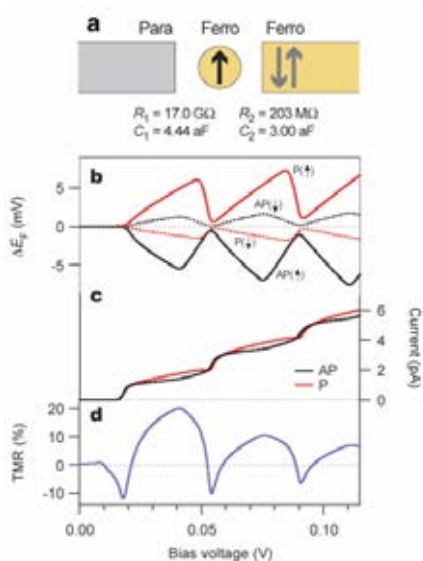


Fig. 4. Numerical simulation of spin dependent single electron tunneling; (a): model structure, (b): chemical potential for each spin state, (c) I-V curve, (d): TMR as a function of bias voltage.

[本成果の主要論文等]

“Inverse tunnel magnetoresistance associated with Coulomb staircases in micro-fabricated granular systems”, K. Yamane, K. Yakushiji, F. Ernult, M. Matsuura, S. Mitani, K. Takanashi and H. Fujimori *J. Magn. Magn. Mater.* **272-276**, e1091-e1093 (2004).

“Enhanced spin accumulation and novel magnetotransport in nanoparticles”, K. Yakushiji, F. Ernult, H. Imamura, K. Yamane, S. Mitani, K. Takanashi, S. Takahashi, S. Maekawa and H. Fujimori *Nature Mater.* **4**, 57-61 (2005).

(1-b) 2次元ナノ粒子集合体におけるスピン依存単一電子トンネル効果

スパッタ法で作製される Co-Al-O 等のグラニューラー薄膜は容易に作製できるが、粒径分布が広く、また、粒子の位置もランダムで制御できないため単一電子トンネル素子への利用には限界がある。そこで、半導体量子ドットのように、2次元の平面上に磁性ナノ粒子集合体を形成することを行い、それを用いてスピン依存単一電子トンネル素子の作製を試みた。この方法では、成長条件の最適化により粒径分布の抑制が期待され、また、原子レベルで平坦化されたトンネル障壁上にナノ粒子を形成することによって、電極とナノ粒子間の距離の制御も可能となる。**Fig. 6** は、分子線エピタキシー法を用いて作製した Fe ナノ粒子配列の STM 像である。Fe(100)単結晶電極上に平坦な MgO(100)トンネル障壁を形成し、その上に 0.5 nm の厚さの Fe を蒸着した。島状成長により、平均粒径約 3 nm のナノ粒子が形成されている様子が見られる。**Fig. 7** は、Fe ナノ粒子上に、さらに MgO(100)上部トンネル障壁層、Co 上部電極層を順に成長させ、スピン依存単一電子トンネル効果のための 2重トンネル接合構造としたものの断面の HAADF 像である。深さ方向の重なりのため、粒径の評価は出来ないが、Fe ナノ粒子が MgO(100)障壁上の同一平面に配列していることが分かる。

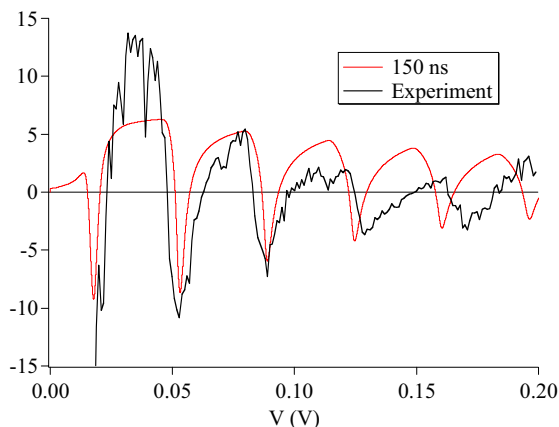


Fig. 5. Simulation result (red curve) of spin dependent single electron tunneling with the spin relaxation time of 150 nsec for a double junction structure of Al/Al-O/Co-nanoparticle/Al-O/Co, compared with the experiment (blue curve).

なお、試料全体が単結晶成長していることは、RHEED および TEM 観察時の回折像で確認した。

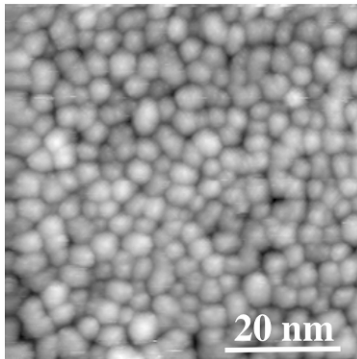


Fig. 6. STM image of Fe nano-particles grown on a MgO(100) barrier layer.

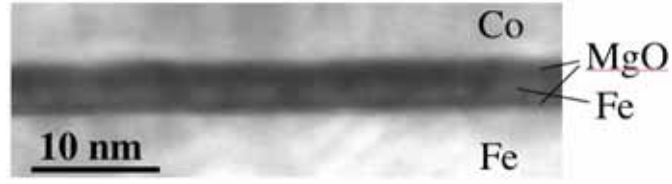


Fig. 7. HAADF image for a double junction structure of Fe/MgO/Fe-nanoparticles/MgO/Co(100).

Fig. 8 および Fig. 9 に、スピン依存単一電子トンネル効果の測定に用いた試料全体構造の模式図と測定結果をそれぞれ示す。Fig. 8 の微小素子構造試料は、Co-Al-O を用いて作製した試料と同様に、電子線リソグラフィおよびイオンミリングにより、 $0.4 \times 0.4 \mu\text{m}^2$ の微小ピラー形状に加工して作製した。4.2 K における I-V 曲線は、Fig. 9 に示したとおり、明瞭なクーロン階段を示している。また、TMR のバイアス電圧依存性に明瞭な振動が生じており、スピン依存単一電子トンネル効果の測定に成功していることが分かる。TMR の符号反転は観測されないが、ナノ粒子が Fe の場合には、その状態密度の特徴を反映して符号反転現象がほとんど起こらないことが理論計算より分かっている。また、Co-Al-O 薄膜を用いた試料と比較すると、電流値が約 3 桁大きく、低抵抗素子が得られている。MgO バリアが低抵抗であることも寄与していると考えられるが、面内の均一性の改善により、並列電流パスが実現して低抵抗化がなされている可能性がある。素子の低抵抗化は読み出し速度の向上につながり、その意味でも有用な結果である。

[本成果の主要論文等]

“Preparation of nanometer-scale iron dots on insulating layer”, F. Ernult, S. Mitani, Y. Nagano and K. Takanashi
Sci. Tech. Adv. Mater. **4**, 383–389 (2003).

“Spin-dependent single-electron-tunneling in epitaxial Fe nanoparticles”, F. Ernult, K. Yamane, S. Mitani, K. Yakushiji, K.

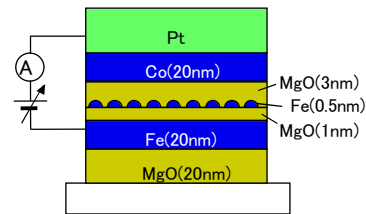


Fig. 8 Schematic illustration of a double junction structure of Fe/MgO/Fe-nano-particle/MgO/Co(100).

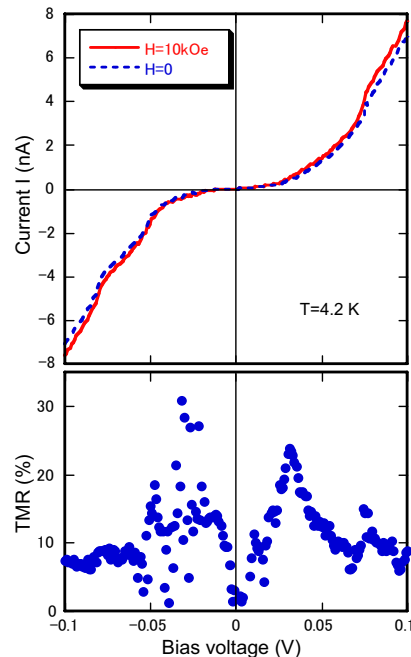


Fig. 9 Current and TMR as a function of bias voltage at 4.2 K for a Fe/MgO/Fe-nano-particle/MgO/Co(100) junction.

(1-c) 2次元ナノ粒子配列の構造制御

前記の2次元ナノ粒子集合体において、さらに規則配列や粒径の均一化を目指した研究を行った。**Fig. 10**は、Fe 下部電極/MgO 障壁/Fe ナノ粒子という構造において、Fe ナノ粒子の構造に及ぼすFe 下部電極層厚の影響を調べた結果である。Fig. 10(a)は、Fe 下部電極層の層厚を 8 nm とした場合の結果であり、ナノ粒子が1方向配列していることが分かる。Fig. 10(b)はFe 下部電極層の厚さを 20 nm とした参照試料であり、下部電極層の層厚が重要な役割を果たしていることを示している。実際、8 nm のFe 下部電極層の断面 TEM 観察により、その表面にピラミッド状の構造が生じていることも見いだしている。また、さらに重要な点は、平均粒径とその分布の減少である。下部電極層厚が 20 nm の場合には、平均粒径とその標準偏差はそれぞれ 3.1 nm と 1.3 nm であったが、下部電極を 8 nm とした場合には、それらは 2.1 nm および 0.4 nm まで改善している。シミュレーションによって見積った、実用素子として許容される粒径分布は±20%程度であったが、Fig. 10(a)の結果はほぼこれを満たしている。近年、コロイドを利用した磁性ナノ粒子の単分散化の研究が行われているが、本研究のようなドライプロセスによる磁性ナノ粒子の粒径制御の研究は例が少ない。高集積度のメモリ素子作製に関しては、ドライプロセスによる方法は重要であると考えられる。

[本成果の主要論文]

“Self-alignment of Fe nanoparticles on a tunnel barrier”, F. Ernult, S. Mitani, K. Takanashi, Y.K. Takahashi, K. Hono, Y. Takahashi and E. Matsubara
Appl. Phys. Lett. **87**, 033115-1-3, (2005).

(1-d) 非磁性ナノ粒子におけるスピン蓄積型 TMR と電圧制御

クーロンブロッケイドを利用したスピン量子ドットメモリの実現には、スイッチング効果の実証が不可欠である。当初は、磁性ナノ粒子を用いた研究を行ったが、磁性ナノ粒子を用いたメモリ素子には超常磁性の問題があり、その解決法として非磁性ナノ粒子を利用した新しいメモリ素子構造を提案し、その動作の実証を行った。これは、先に述べたナノ

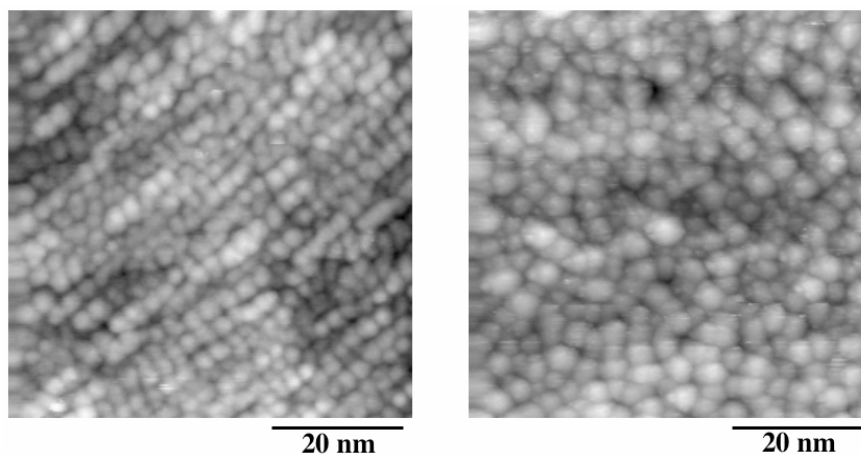


Fig. 10. STM images for Fe nanoparticles grown on MgO(100) barriers with different Fe bottom layers: (a) 8 nm and (b) 20 nm thick Fe bottom layers.

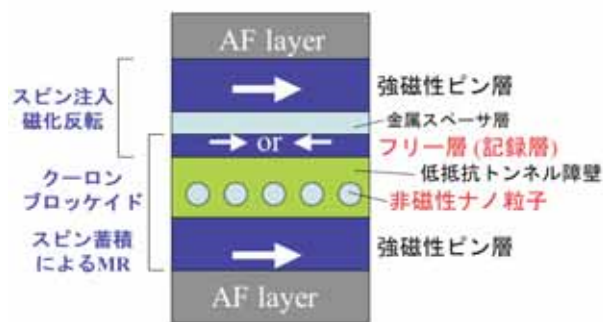


Fig. 11. Schematic illustration of a magnetic memory device using Coulomb blockade of nonmagnetic nanoparticles.

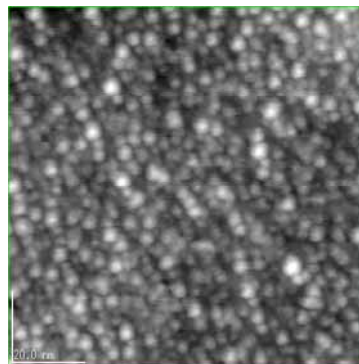


Fig. 12. AFM image (100x100 nm²) of Au nanoparticles grown on a MgO(100) barrier layer.

粒子中のスピン蓄積効果を利用しており、プロジェクト前半の成果に基づくものである。**Fig. 11** に非磁性ナノ粒子を用いたメモリ素子構造の模式図を示す。非磁性ナノ粒子のクーロンブロッケイドによりスイッチングを行い、非磁性ナノ粒子のスピン蓄積による TMR によって、記録層の磁化状態を読み出す構造になっている。上部の金属スペーサ層とその上の磁性層はスピン注入書込みのためのものである。

非磁性ナノ粒子を用いたメモリ素子構造の基本的動作を調べるために、まず、MgO バリア層上における Au ナノ粒子の成長について調べた。**Fig. 12** に、得られた Au ナノ粒子の 1 例として、MgO(100)バリア層上に 0.04 nm の Au を蒸着した場合の AFM 像を示す。ナノスケールの粒子の成長が見られ、数密度と蒸着量から見積もった平均粒径は 1.4 nm であった。

Au ナノ粒子を介するスピン依存単一電子トンネル効果を調べるために、Au ナノ粒子に関しても、Fig. 8 と同様の構造の微小素子試料を作製した。最適化された積層構造として、MgO/Fe 20 nm/MgO 1.5 nm/Au 0.01 nm/MgO 2.5 nm/Fe 5 nm/Co 3 nm を用いた。**Fig. 13** に、4.2 K での測定によって得られた磁気抵抗曲線を示す。バイアス電圧 $V=400$ mV において、クーロンブロッケイドが破れた状態で、約 10% の TMR が得られている。**Fig. 14** に試料のト

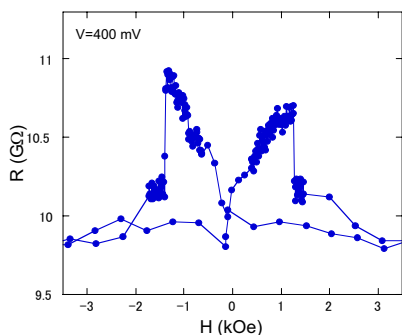


Fig. 13. Magnetoresistance curve of a double junction structure of Fe/MgO/Au-nanoparticles /MgO/Fe at 4.2 K.

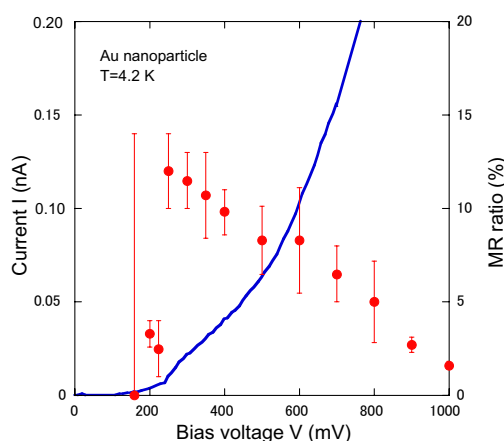


Fig.14. Current and TMR as a function of bias voltage for a double junction structure of Fe/MgO/Au-nanoparticles/MgO/Fe at 4.2 K.

ンネル抵抗と TMR のバイアス電圧依存性をまとめた。約 200 mV において、クーロンブロッケイドが破れて電流値が急増している。その前後の抵抗値の変化は約 1 桁に達しており、スイッチング効果の実証と言えるものになっている。また、電流値の急増に伴って TMR が発現していることも分かる。電流値の増加によって TMR が増加する現象は、スピン蓄積型 TMR に特有の現象であり、Au ナノ粒子のスピン蓄積が TMR の原因であることを示している。これまでに、スピン蓄積効果による電流値と TMR の正の相関が明瞭に観測された例はなく、本研究が初めてである。なお、TMR が発現する電流値から見積もった Au ナノ粒子中のスピン緩和時間は約 10 nsec である。この値は、Co ナノ粒子の場合と同様に大きい。仮に室温動作時にバルク値 (~10 psec) 程度にまで減少したとしても、数値計算の結果、バリア抵抗の最適化によりメモリ動作は可能であることが分かっている。

以上、本研究では、クーロンブロッケイドによるスイッチング効果の実証とともに、スピン蓄積型 TMR の観測にも成功し、非磁性ナノ粒子を用いたメモリー素子の基本動作を確認できた。

[本成果の主要論文等]

“磁気抵抗効果素子及び不揮発性ランダムアクセス磁気メモリ”，三谷誠司、薬師寺啓、エルヌフランク、高梨弘毅
特願 2006-218828

“Spin-dependent single electron tunneling and spin accumulation in metallic nanoparticles”，K. Takanashi, K. Yakushiji, F. Ernult, S. Mitani, MRS Fall Meeting, November 2006, Boston (Invited)

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究は、超常磁性の問題を解決した、非磁性ナノ粒子を用いたスピン蓄積型メモリ素子の基本動作を実証している。今後の素子構造最適化により室温動作も十分期待され、テラビット級の超高集積度スピンメモリの実現に対して一つの道筋を開拓したと考えられる。

さらに、本研究の主要成果はナノ粒子中のスピン緩和時間の増大という基礎的な知見であり、このことは MRAM 以外のスピントロニクス発展、例えばナノ粒子の量子コンピューティングへの応用などにも寄与すると期待される。

3. 2 スピン共鳴トンネル効果素子に関する研究開発（物質・材料研究機構、東北大学（兼務）、猪俣グループ）

(1) 研究実施内容及び成果

本研究開発は、上記スピン単一電子素子の室温動作を期間内に示すことが困難と予想されたこと、およびスピン共鳴トンネルも課題の機能を発現するシーズになり得るとの考えから、平成 16 年 10 月に研究をスタートさせた。すなわち、理想的なスピン共鳴トンネル効果デバイスを創り出せば、原理的に共鳴準位を利用してトンネル電流を電圧で制御し、かつ TMR のエンハンスが期待できることから、スイッチ機能を備えた TMR 素子を開発できると判断した。また、磁性超薄膜の量子準位間隔は 1eV 程度と大きいことが予想されるので、室温動作も可能と考えられる。磁性超薄膜の中に量子準位を形成させる必要があるため、その膜は単結晶膜であることが望ましいと考え、構造としてはエピタキシャル膜を作製できること、および s 電子が優先的にトンネルできる電子構造であることを想定し Fe/MgO 系を選択した。Fe は Δ_1 電子が s 電子的であり優先的にトンネルできる電子構造を有し、MgO と格子整合する。以下の二つの系についてスピン依存量子井戸の形成を試みた。

- (i) 二つの MgO バリアで Fe 超薄膜を挟んだエピタキシャル二重トンネル接合素子
- (ii) Cr と MgO バリアで Fe 超薄膜を挟んだ一重トンネル接合素子

(1-a) 二つの MgO バリアで Fe 超薄膜を挟んだエピタキシャル二重トンネル接合素子
 Fe の Δ_1 バンドはフェルミ準位において多数スピンバンドには存在するが、少数スピンバンドはエネルギーギャップをもち存在しない。そのため、平行磁化配列の場合、多数スピンバンドのみが量子井戸を形成し、それにとまなうスピン共鳴トンネル効果が予想される。成膜は本プロジェクトで導入した MBE 装置を用いて行い、MgO(001) 基板/Fe バッファ層/MgO/Fe 超薄膜/MgO/Fe からなる保磁力差型強磁性二重トンネル接合 (DMTJ) を作製した。蒸着はすべて E-ガンを用いて行い、基板の大きさは 10 mm 角、MgO 膜厚は 2 nm に固定し、中間 Fe 膜厚を変化させた。まず、エピタキシャル成長膜の作製条件を種々検討した。その結果、それぞれの膜を室温で成膜し、Fe バッファ層を 300°C、中間 Fe 層および上部 Fe 電極層を 200°C でポストアニリングした場合、最も品質のよいエピタキシャル成長積層膜が得られることを RHEED で確認した。作製した膜構成を図 1 (a) に示す。比較のため 同図 (b) に示すような一重トンネル接合も作製した。

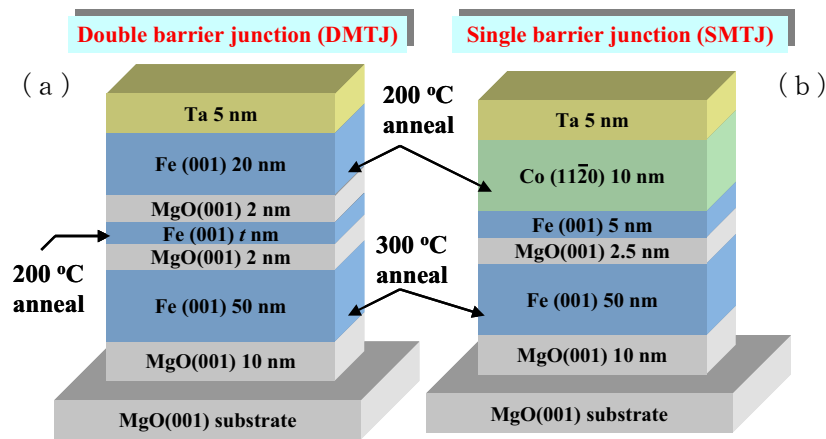


図 1 作製した二重 (a) および一重 (b) トンネル接合

次に、これらの膜を Ar イオンミリングと電子ビームリソグラフィを用いて 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ サイズに微細加工した。これらの素子について 4 探針法を用いて低温および室温で磁気抵抗を測定した。その結果、例えば中間 Fe 膜厚 1.5 nm のとき室温での二重トンネル接合の TMR は 110% と、一重接合の 130% に遜色ない TMR を得ることができ(図 2)、高品質の二重接合を作製できた。得られたコンダクタンスから微分コンダクタンスのバイアス依存性を求めた。すべての Fe 膜の磁化が平行の場合における、種々の中間 Fe 膜厚に対する結果を

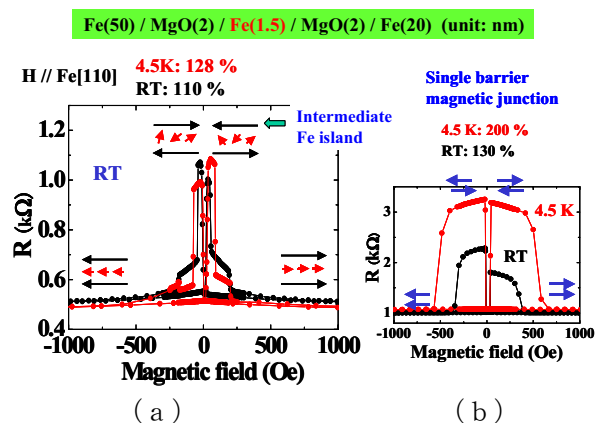


図 2 二重トンネル接合 (a) および一重トンネル接合 (b) の室温における TMR 曲線

図 3 に示す。測定温度は 4.5 K である。電圧が正の場合、Fe 膜厚が 1 ~ 1.5 nm に対して微分コンダクタンスの振動が観測され、振動周期は Fe 膜厚が薄くなるにつれて増大した。これは中間 Fe 層内に量子準位が形成したことを示している。すなわち、Fe 磁性層内にスピン

依存量子準位を形成させることに成功し、それに伴う明瞭なコンダクタンスの振動を世界で初めて観測した。尚、正の電圧は基板側から上部電極に向けて電子がトンネルする方向である。振動周期は約 0.1 eV と予想より小さく、また、負の場合に振動が観測されない。その理由は、MgO に挟まれた中間 Fe 層の上部界面層が酸化しているためと考えられる。この場合には Δ_1 バンド以外の量子準位を形成しない電子もトンネルに寄与することが考えられ、それによって量子準位の寄与が隠れてしまうことが予想されるからである。また、中間 Fe 層の磁化が上・下電極の磁化と反平行の場合には振動は観測されなかった。これは Fe のバンド構造に由来するものであり、フェルミ準位近傍の Δ_1 バンドが多数スピンのみしか存在しないため、平行磁化の場合にしか量子準位の形成が期待できないからである。振動現象は室温でも観測された。結果の一例を Fe 膜厚 1.2 nm の場合について図 4 に示す。振動振幅は温度の上昇とともに小さくなり、量子井戸形成と矛盾しない。

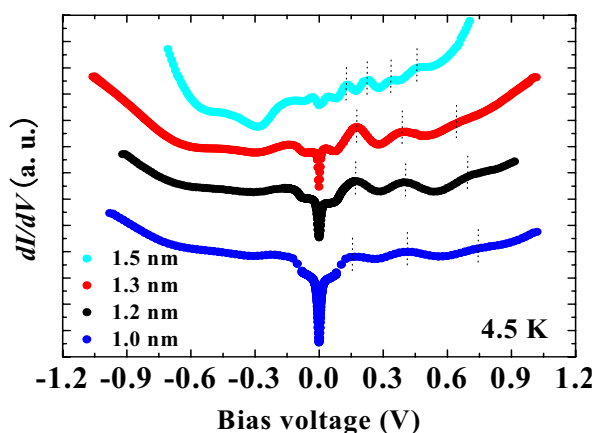


図 3 Fe 中間層膜厚をパラメータとした微分コンダクタンスのバイアス電圧による振動 (4.5K)

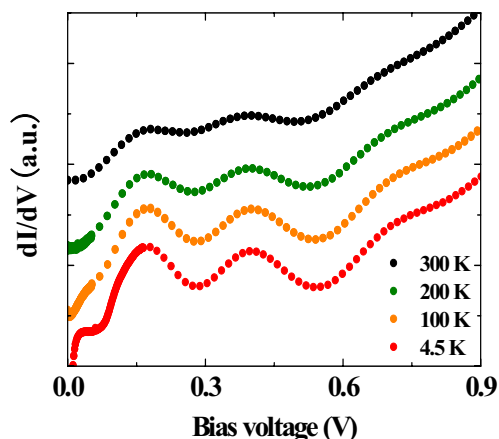


図 4 微分コンダクタンスのバイアス電圧による振動の温度変化

このように磁性層内に形成した多数スピン電子の量子井戸に伴うコンダクタンスの振動を室温でも観測できたが、その振幅は小さく TMR の振動の観測には至らなかった。その原因を調べるため断面 TEM 観察を行った。結果を図 5 に示すように、厚さは均一であるものの、Fe 中間層は期待したような連続膜ではなく直径 20~60 nm の島状になっており、それが原因と思われる。振動周期が 0.1 eV と比較的小さいのも 3 次元成長のためと考えられる。

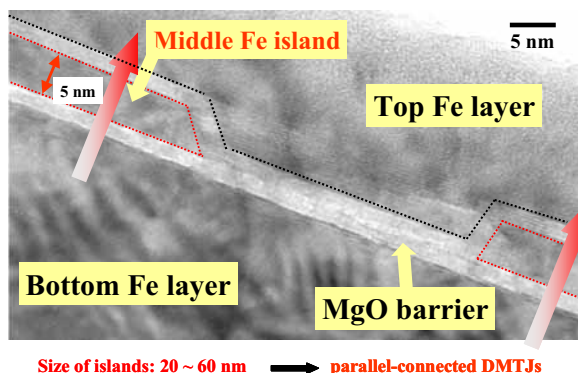


図 5 作製したエピタキシャル二重トンネル接合の断面 TEM 観察

このように Fe 超薄膜内にスピン依存量子井戸を形成させることに世界で初めて成功し、コンダクタンスの振動を室温でも観測できたものの MgO 上の Fe が島状成長するため、TMR の振動までは観測できなかった。

[本成果の主要論文等]

“Quantum Oscillation of the Tunneling Conductance in Fully Epitaxial Double Barrier Magnetic Tunnel Junctions, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata, Phys. Rev. Lett. **96**, 027208 (2006).

(1 - b) Cr と MgO バリアで Fe 超薄膜を挟んだトンネル接合素子

Cr の Δ_1 バンドは図 6 に示すように、Fe の少数スピンバンドと似ており、多数スピンバンドに対してはエネルギーギャップとして機能することが予想され、Cr/Fe 超薄膜/MgO エピタキシャル膜を作製すれば、Fe 超薄膜は Cr の上に連続膜として成長し、その多数スピンバンドが量子井戸を形成する可能性が高いと考えられる。スパッタ法を用いて MgO(001) 基板/Cr/Fe 超薄膜/MgO/Fe エピタキシャルトンネル接合を作製した。MBE でなくスパッタを用いたのは、より大きなエネルギーを与えられるため、2次元成長させやすいと考えたためである。成膜に当たり、特に Cr 層のフラットネスおよび MgO バリアの配向度が量子井戸観測のキーポイントと考え、まずそれぞれの成膜条件を最適化した。その結果、Cr 層を室温で成膜後 800°C でポストアニールすること、MgO を蒸着で作製すると (001) 配向度が向上することが X 線回折の結果わかった。中間 Fe 膜厚を変えて作製した種々の積層膜を (1-a) と同様な方法で微細加工し、10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ の素子を作製した。作製した膜構造および 800°C でポストアニールした Cr の上に成膜した Fe 薄膜の X 線回折像をそれぞれ図 7 および図 8 に示す。Cr は (001) 配向しておりラフネスも小さい。この上の Fe 超薄膜のラフネスも $R_a = 0.11 \text{ nm}$ と非常に小さく、格子定数の近い Cr と分離して明瞭な Fe のピークが観測されている。

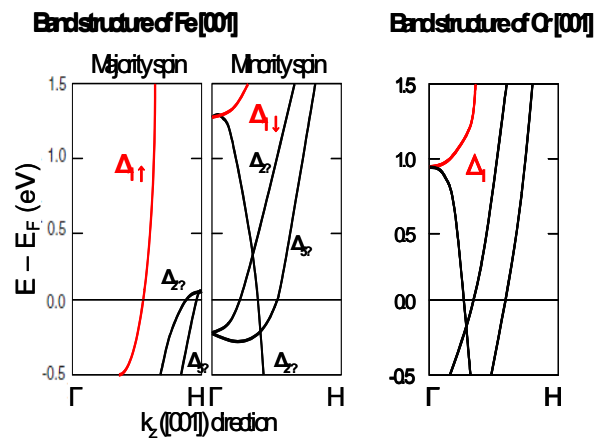


図 6 Fe および Cr のバンド構造

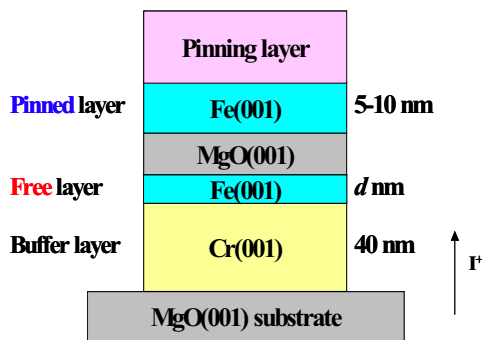


図 7 積層構造

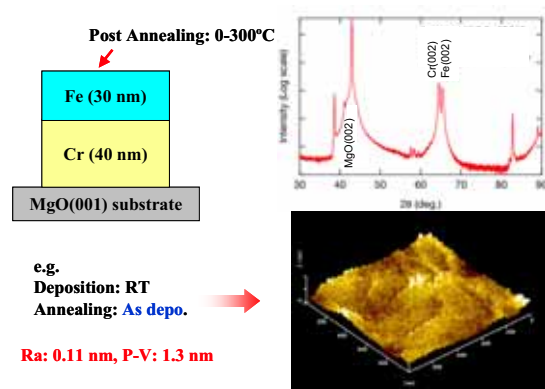


図 8 Cr の X 線回折像と表面ラフネス

次に作製した素子について4探針法を用いて電気特性を測定した。その結果、Fe 膜厚が 0.6 nm~1.2 nm (設計値) のときスピン依存量子井戸形成に伴うバイアス電圧に対するコンダクタンスと TMR のエンハンス、および電流 (I) -電圧 (V) 曲線の変調を観測した。それらはいずれも室温でも観測できた。図 9 は平行磁化におけるコンダクタンスのピーク電圧を Fe 膜厚に対してプロットしたものである。赤は実験、黒は計算である。数字は波動関数のノードを示している。実験は理論とよく一致している。各膜厚に対していずれもフェルミ準位から Cr のバンド端である約 0.9 eV の間に量子準位は 1 個しかなく量子準位間隔が広いことがわかる。これはスピン共鳴トンネルが室温でも十分観測可能であることを意味し、実際、それは実験でも観測された。量子準位間隔がこのように広いことは本目的のデバイスに好都合である。

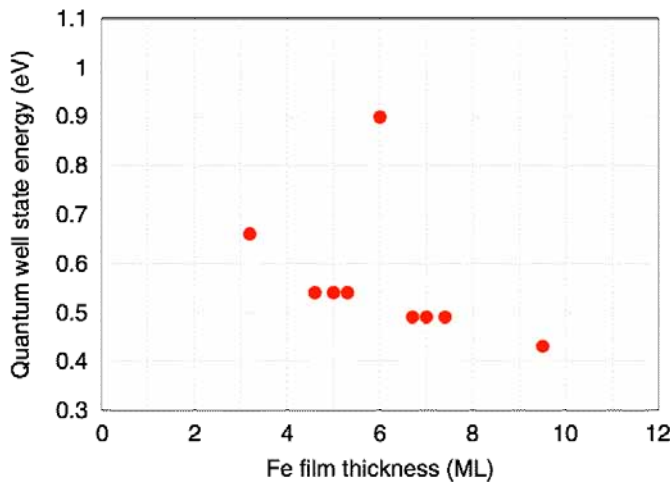


図 9 量子準位の Fe 膜厚依存性

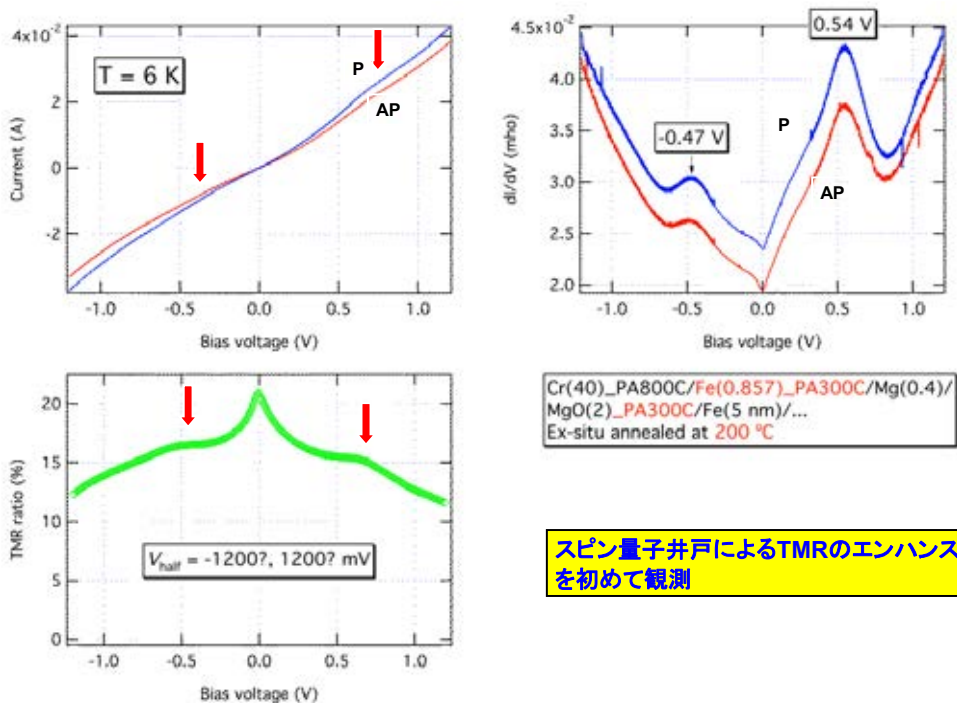


図 10 Cr/Fe/MgO/Fe 接合におけるコンダクタンス、TMR、トンネル電流の電圧依存性

図 10 に Fe 膜厚 0.857 nm (6 ML) に対するコンダクタンス、TMR および I-V 曲線のバイアス依存性を示す。コンダクタンスは 540 mV および -470 mV 近傍にピークを示し、対応する電圧で TMR の増大および I-V 曲線に変調が見られる (矢印)。また、負バイアス電圧での観測は (1-a) と異なっている。(1-a) において負バイアス電圧で観測されなかったのは、やはり Fe 層界面の酸化の問題であると考えられる。また、量子準位間隔が (1-a) より広いのは Fe 中間層が 2 次元成長しているためと考えられる。実際、断面 TEM 観察の結果それを確認している。このようなスピン依存量子準位に伴う TMR のエンハンスの観測は世界で初めてである。

[本成果の主要論文等]

“Fabrication and characterization of Cr/Fe/MgO/Fe(001) magnetic tunnel junctions with an ultra thin Fe electrode” T. NIIZEKI, N. TEZUKA and K. INOMATA, 10th MMM-Intermag Joint Conf. Jan. 10, 2007

(2) 研究成果の今後期待される効果

金属系で磁性層内にスピン依存量子井戸を形成させ、スピン共鳴トンネル効果を明確に観測したのは世界で初めてであり、まず学術的に大きな進歩である。特に b) に関しては微分コンダクタンスのみならず TMR のエンハンスが観測され、さらに I-V 特性にも変調が観測されており有望である。この研究は a) の結果を受けて最終年度から取り組んだため時間が不足した。さらに 1 年程度研究を続ければ、戦略目標であるスイッチ機能をもつ大きな抵抗変化を得る可能性が高いと判断しており、研究を継続する予定である。それを示せばサイエンスの面のみならず、スピン共鳴トンネル素子が新たなスピントロニクスデバイスとして期待できる。尚、今回得られた結果に関して、2007 年 1 月開催の INTERMAG-MMM Joint Conference で発表するとともに、権威ある雑誌への論文投稿を準備中である。

3. 3 ハーフメタル開発に関する研究 (東北大学、物質・材料研究機構、猪俣グループ)

(1) 研究実施内容および成果

一般に高速読み出しのためには大きな信号電圧が要求され、そのためにはメモリ素子となるトンネル接合 (MTJ) の TMR は大きいことが必要である。その究極がハーフメタルを用いた MTJ である。それは、ハーフメタルはスピン分極率 $P=1$ であり、無限に大きな TMR が期待されるからである。プロジェクト開始当時、MTJ は Al 酸化膜 (AlO_x) をバリアとし、磁性電極としては CoFe 合金が使われていた。この MTJ では TMR は室温で最大 70% に限られるため、本研究では巨大 TMR を得るべくハーフメタルの開発に当たった。当時ハーフメタルとしては CrO₂、Fe₃O₄、(La, Sr)MnO₃ などの酸化物と NiMnSb ハーフホイスラー合金が研究対象となっていた。しかし、これらはキュリー点が低かったり、構造制御が困難であったりすることから室温で巨大 TMR を得ることは困難と判断し、構造がより安定でありかつキュリー点の高い Co 基フルホイスラー合金 (結晶構造 L2₁) に着目し、研究を開始した。

(1-a) Co₂(Fe_xCr_{1-x})Al (CCFA) フルホイスラー合金

初めに着手した材料は当時理論的にハーフメタルとして知られていた Co₂MnGe および Co₂MnSi であった。2001 年当時はまだ十分な成膜装置を持ち合わせておらず、磁気特性は理論に近い値が得られるものの TMR を全く得ることが出来なかった。そのため 2002 年から研

究対象を $\text{Co}_2(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})\text{Al}$ (CCFA) に変更した。そのきっかけはこの年の INTERMAG 国際会議において、 $x = 0.4$ の材料がハーフメタルになることが理論的に示されたことである。この系は Mn 系よりも酸化し難いと思われるので、もしかしたらという思いがあった。早速 $x = 0.4$ のターゲットを作製し、導入した超高真空スパッタ装置を用いてスピバルブ型 MTJ を作製した。当時は微細加工装置がなかったため、複数のメタルマスクを交換して $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ の大きな素子を作製した。そのため試料を一旦チャンバーから外に出す必要があり、膜が大気に触れるという不利な条件であった。それにも拘わらず、しかも熱処理をしない室温成膜の状態において室温で 16% の TMR が得られ、フルホイスラー合金を用いて世界で初めて TMR を観測することに成功した。また、この CCFA は構造が $L2_1$ ではなく不規則構造の B2 であったことから、B2 でも巨大 TMR が得られる可能性を指摘した。この指摘は今でも正しく、フルホイスラー合金ではハーフホイスラー合金と異なり比較的容易に TMR が得られる原因となっている。結果をまとめて JJAP に投稿したところ、論文を見た日刊工業新聞社の記者が記事に載せた。それが広く世間の知るところとなり、フルホイスラー合金を用いた MTJ の研究が盛んになるきっかけにもなった。今から思えばこの値は小さなものであるが、その後の大きな一歩になったので記念としてその TMR 曲線を **図 1** に載せておく。ヒステリシス曲線は奇妙な形をしているが、これはマスク交換のため試料を大気に曝しているので交換結合が弱いからである。

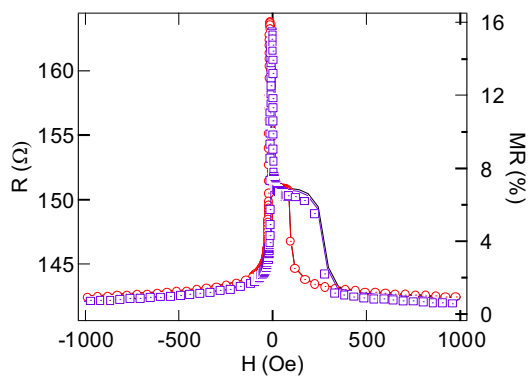


図 1 CCFA ($x=0.4$) を用いた初めて観測された室温での TMR 曲線

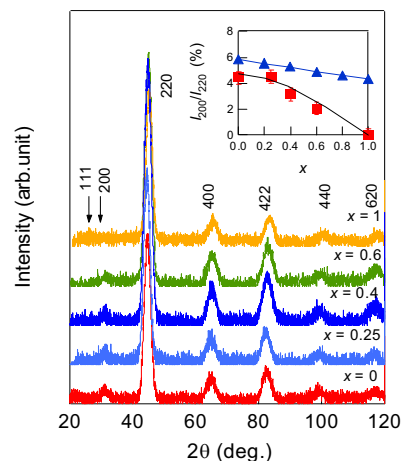


図 2 室温で作製した $\text{Co}_2(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})\text{Al}$ 薄膜の X 線回折像。挿入図は 200 の相対強度の x 依存性

このような悪条件の中でも初めて TMR が得られたことから、CCFA はハーフメタルとして有望と考え、その後超高真空スパッタ装置やイオンミリング装置など MTJ を作製する設備が整うのに合わせ、組成 (x) を系統的に変えて膜を作製し、その構造を X 線と NMR を用いて、磁化特性を VSM および SQUID を用いて評価するとともに、MTJ を作製し TMR 特性を調べた。基板は熱酸化 Si または $\text{MgO}(001)$ 単結晶を用いた。まず構造であるが熱酸化 Si 基板を用いて室温で成膜した場合、**図 2** に示す X 線回折像に見られるように、いずれの組成においても $L2_1$ を示す (111) 回折強度は観測されず、B2 構造を示す (200) 強度が x (Fe 量) の増大とともに小さくなり、 $x = 1$ では全く観測されない。これから CCFA では $L2_1$ 構造が得られず、 x の増大とともに A2 (全ての原子が不規則置換した bcc) 構造が増し Co_2FeAl では完全に A2 構造になることが判明した。一方、 $\text{MgO}(001)$ 基板を用いた場合には CCFA はエピタキシャル成長し、基板加熱温度や成膜後の熱処理条件によって全組成に渡り B2 構造が得られた。しかし、 $L2_1$ 構造は得られなかった。 MgO 基板を用い Cr をバッファ層とした場合の低温における磁化特性から磁気モーメントを見積もった結果を **図 3** に示す。破線はスレータポーリング曲線から予想される、 $L2_1$ 構造に対する理論値である。実験値は特に Cr リッチ組成で理論から大きく外れ、Fe リッチ組成ではほぼ理論に一致する。この外れは Cr が Co サイトを置換し、置換した Cr と正位置における Cr とが反強磁性結合するためと理解され

た。すなわち、スピン分極率が大きいと予想される Cr リッチ組成では A2 構造の出現が避けられない。X 線では B2 構造が見られるが A2 も混じっているものと推測される。これが以下に述べるように CCFA で大きな TMR が得られない原因になっていると判断している。

次に、B2 構造を得やすい MgO(001) 基板を用い Cr をバッファ層として作製した MgO(001)/Cr/CCFA/AlO_x/CoFe/IrMn/Ta からなる MTJ の室温および低温における TMR の組成依存性を図 4 に示す。バリアは AlO_x である。TMR は x = 0.6 で最大を示した。理論ではスピン分極率は x = 0 でほぼ 100%、x の増大とともに単調に低下するが、実験はそうっていない。しかし、x = 0.6 に対する低温の TMR = 80% から求めたスピン分極率は 60% であり、Co₂FeAl のスピン分極率同様、理論値 (B2 構造) の 9 割に当たる。すなわち、Fe リッチ領域では理論によく一致している。理論に反して Cr リッチ領域で TMR が低下しているのは、先に述べた A2 構造の存在によるものと思われる。

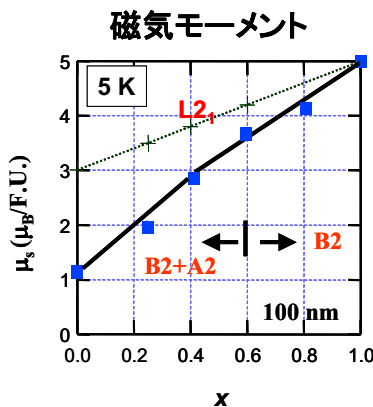


図 3 Co₂(Fe_xCr_{1-x})Al (CCFA) の磁気モーメントの組成依存性

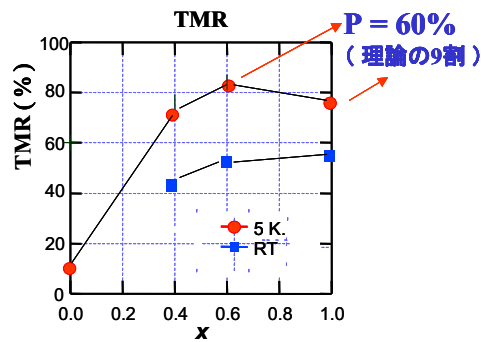


図 4 Co₂(Fe_xCr_{1-x})Al (CCFA) の TMR の組成依存性

尚、A2 と B2 の区別は NMR を用いるとよりわかりやすい。図 5 は熱処理条件を変えて作製した Co₂FeAl の A2 および B2 に対する ⁵⁹Co 核の NMR スペクトルである。より規則度の高い B2 では 8 個の最近接原子数を Fe と Al が占める割合の違いに対応して 8 個のピークが観測されるが、完全不規則構造の A2 ではブロードなピークが一つ観測されるのみである。完全な L₂₁ 構造では鋭い 1 本の主ピークが観測されるはずであるが、実際にはサテライトピークが観測され、完全な L₂₁ 構造を得ることは極めて難しい。そのサテライトピーク強度を解析することで、どのような site 不規則性がどの程度存在するかを知ることができる。尚、NMR 測定はポーランド科学アカデミーの Dr. Wojcik との共同研究で行った。

Local structure: NMR Studies

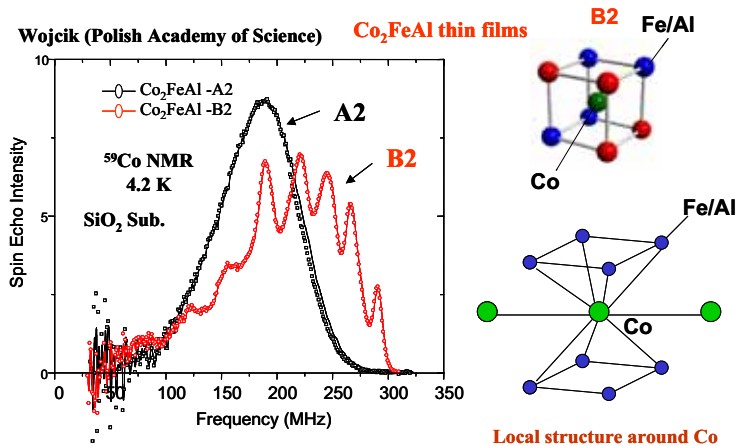


図 5 Co₂FeAl の A2 および B2 に対する ⁵⁹Co 核の NMR スペクトル

以上の結果は、A2 の存在をなくせれば大きな TMR が期待できるが CCFA ではそれが難しいこと、MgO(001) 基板上の Co_2FeAl はスピン分極率そのものは大きくない（ハーフメタルではない）ものの、規則度の高い B2 構造を得やすく、そのため理論に近い TMR が得られることを示している。このような結果から CCFA で巨大 TMR を得ることは困難と判断し、研究対象を Cr を含まない $\text{Co}_2\text{FeAl}_x\text{Si}_{1-x}$ (CFAS) に移行した。

(1-b) $\text{Co}_2\text{FeAl}_x\text{Si}_{1-x}$ (CFAS) フルホイスラー合金

この系を選択した理由は Co_2FeAl に関する上記事実のほか、 Co_2MnSi で L_{21} が得やすいことから Mn を Fe に変えた Co_2FeSi も L_{21} になりやすいのではないかと推測したことに始まる。それまでの理論では Co_2FeSi はハーフメタルではないと報告されていたが、実験がなかったのでやってみようと思ったのである。膜を作製してみると、期待通り Co_2FeSi は L_{21} 構造になり易いことが判明した。折りしもこの結果を得た直後、2005 年 4 月の INTERMAG において、 Co_2FeSi がこれまでの理論と異なりハーフメタルになるという理論予測が報告された。しかし、実験では Co_2FeSi は大きな TMR を示さず、得られるスピン分極率 (P) は理論予測と程遠く 0.5 程度であった。そこで上記 Al と Si の特徴を勘案し $x = 0.5$ を用いた実験を行ってみた。まず、MgO(001)/Cr 上に CFAS ($x=0.5$) を作製し構造と磁気特性を調べた。膜は室温で作製し、その後各温度で 1 時間真空中熱処理を行った。X 線回折の結果 CFAS は MgO 基板上にエピタキシャル成長するとともに単結晶膜になることがわかった。図 6 は L_{21} 構造に相当する (111) 回折線に角度を合わせて面内をスキャンしたときの X 線回折像である。熱処理温度 $T_a=400^\circ\text{C}$ では (111) 回折像が見られず B2 構造であるが、 $T_a=450^\circ\text{C}$ では弱いものの (111) ピークの 4 回対称のパターンが観測され L_{21} 構造ができ始めていることを示している。そして $T_a=500^\circ\text{C}$ ではその強度が増しており、Al を Si で置換することで期待通り L_{21} 構造が得やすくなっている。図 7 は熱処理温度に対する表面ラフネスと AFM 像である。400 ~ 500°C で熱処理した場合最小の表面ラフネス 0.2 nm 以下が得られており、この範囲での熱処理が TMR 素子作製に有効であることを示唆している。

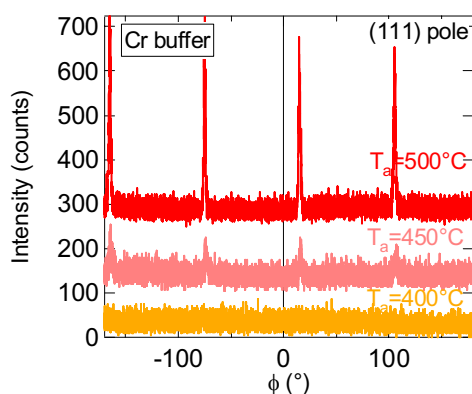


図 6 CFAS 膜の (111) 回折角度に合わせたときの X 線の面内スキャン像

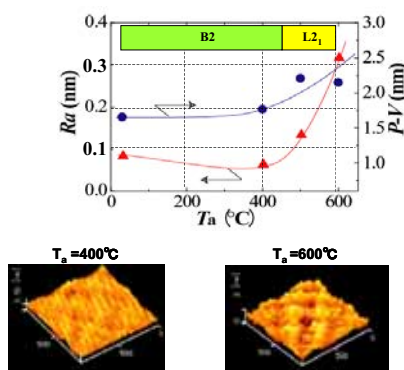


図 7 CFAS 膜の熱処理温度に対する表面ラフネスと AFM 像

次に TMR 特性について示す。これからは L_{21} 構造を得ることを目的に MgO バリアを用いてトンネル接合を作製した結果について述べる。まず、MgO(001)/Cr/CFAS ($x=0.5$)/MgO/CoFe/IrMn/Ta 接合素子（微細加工は Ar イオンミリングとフォトリソを用いて行い、素子サイズは $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ である。以下同様）を作製し 400°C で熱処理したところ、室温で 102% と初めて 100% を超える TMR を得た。尚、同様の構造を Al_{10x} バリアで作製した場合には室温 TMR は 70% であった。次に、より大きな TMR を得るべく上下電極に CFAS を用いることを検討した。作製した TMR 素子は MgO(001)/Cr/CFAS ($x=0.5$)/MgO/CFAS ($x=0.5$)/CoFe/IrMn/Ta である。下

部電極の CFAS は成膜後 400°C で熱処理し、全体の膜を作製してから再び磁場中で熱処理した。図 8 はこの熱処理温度に対する、MgO バリア厚さを変えた場合の室温における TMR および抵抗・面積 (RA) 積の値をプロットしたものである。TMR は MgO バリア厚さが 2 nm のとき 500°C で最大を示し、その値は室温で 174% である。これはハーフメタル材料を用いた値としては世界最高値である。興味深いことは、TMR が最大をとる温度近傍で RA は依然として増大していることである。これはこの大きな TMR が MgO/Fe 系のようなコヒーレントトンネルに基づくものではなく、CFAS の大きなスピン分極率に由来するものであることを示唆している。この MTJ 素子の TMR の温度変化を図 9 に示す。低温の TMR は 356% であり、これはスピン分極率 $P = 0.8$ に相当する。温度変化は他のホイスラー合金を用いた場合よりはるかに優れており、本材料の実用性を示唆している。この温度変化はさらに改善できる見込みである。尚、その後の研究で TMR はさらに増大し、現時点において室温で 220% の TMR を得ている。

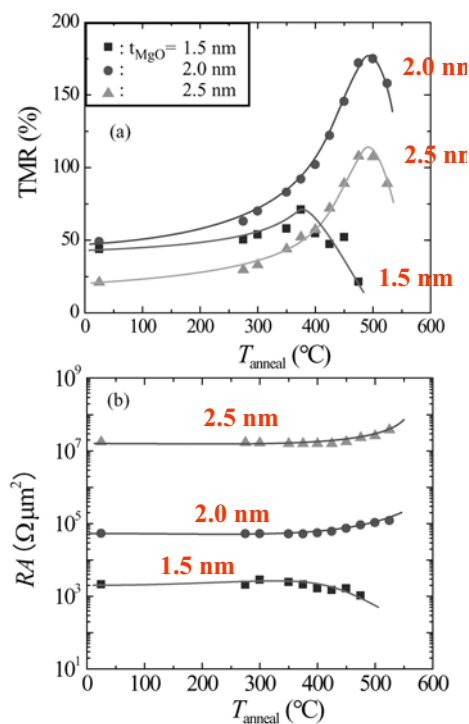


図 8 TMR および RA の熱処理温度特性

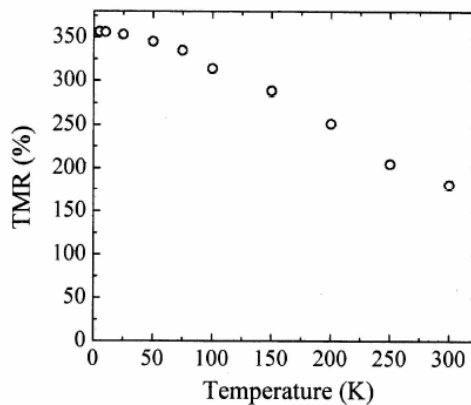


図 9 TMR の温度変化

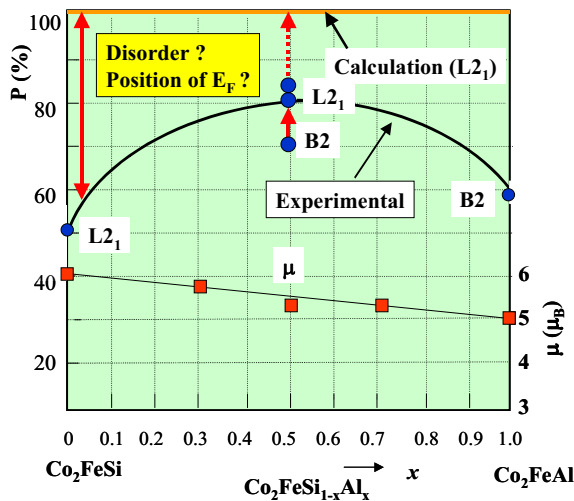


図 10 TMR から求めたスピン分極率の組成依存性

現在、同様の実験を組成 x を変えて進行中である。まだすべての組成にわたって TMR 特性を調べていないが、磁気モーメントおよび結晶構造を含めてスピン分極率の組成依存性を示すと図 10 のようになる。 $x = 0.5$ における P は B2 構造の場合 0.7、 L_{21} 構造の場合現在のところ 0.82 である。理論的には $P = 1$ が期待されるのでこの値は今後の研究によりさらに大きくなるであろう。尚、磁気モーメントは組成に対して線形的に変化しており、理論予測どおりである。

以上、CFAS は MgO バリアの上に L_{21} 構造をもって成長でき、温度特性も優れていることから、巨大 TMR を室温で発現するハーフメタル材料として非常に有望である。CFAS でなぜこのように大きなスピン分極率が得られるかについては、結晶構造と電子構造の両面から研究する必要がある。これらについては現在研究が進行中である。最後に、これまでのハー

フメタルを用いた室温における TMR の発展経緯を、他研究機関の報告を含め図 11 に示す。我々の CCFA を用いた最初の TMR 発現以来フルホイスラー合金が大きく注目され、CFAS 材料の開発により TMR は目を見張るほど急進展していることがわかる。

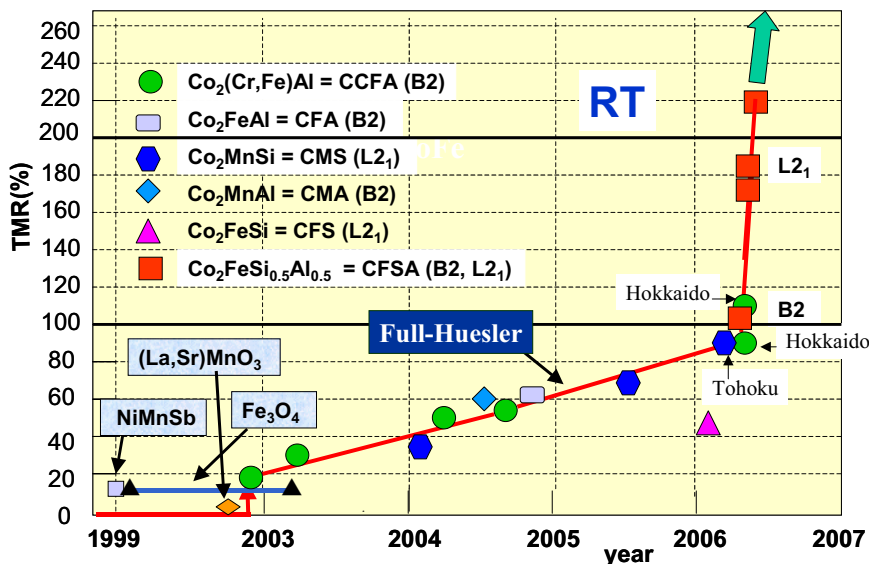


図 11 ハーフメタルを用いた室温 TMR の発展経緯

[本成果の主要論文等]

“Large tunneling magnetoresistance at room temperature using a Heusler alloy with the B2 structure” K. Inomata, S. Okamura, R. Goto and N. Tezuka, Jpn. J. Appl. Phys. **42** L419-L422. (2003)

“Tunnel magnetoresistance for junctions with epitaxial full-Heusler Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} electrodes with B2 and L21 structures”, N. Tezuka, N. Ikada, A. Miyazaki, S. Sugimoto, M. Kikuchi and K. Inomata, Appl. Phys. Lett. **89**, 112514 (2006).

“175% TMR at room temperature and high thermal stability using Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} full-Heusler alloy electrodes”, N. Tezuka, N. Ikada, A. Miyazaki, S. Sugimoto, M. Kikuchi and K. Inomata, Appl. Phys. Lett. in-press

(2) 研究成果の今後期待される効果

ハーフメタルは夢のスピンロニクス材料として長い間期待されてきたが、本研究の結果、夢は現実になりつつある。現時点で Co₂FeAl_xSi_{1-x} (CFAS) 合金の開発により他を圧倒する大きな TMR を室温で実現しているが、この材料は理論的には P = 1 であり、今後の研究により限りなく P = 1 に近いスピン分極率を実現できると確信している。室温ハーフメタルの開発は本プロジェクトの戦略目標を実現するばかりでなく、大容量 MRAM や HDD への応用、低電流スピン注入磁化反転の実現とそれを利用した様々なスピンロニクスデバイス創製などが期待される。また、半導体への高効率

スピン注入が可能になり、スピンFET(スピントランジスタ)を初め半導体スピントロニクス発展に寄与できる。一方、ハーフメタルでは非常に長いスピン緩和時間が期待されるので、それを対象とした新しい基礎科学が生まれるかもしれない。ホイスラースピントロニクスである。ハーフメタルのインパクトは計り知れない。

本成果を実用化に結びつけるべく NEDO の「ナノテク先端部材実用化研究開発」助成に申請していたが、それが採択された。今後 TMR の更なる増大を実現し、新しいスピントロニクスの創製を促進したい。

3.4 反平行結合フリー層に関する研究 (物質・材料研究機構、東北大学、猪俣グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

本戦略目標の大容量スピンメモリを創製するためには、二つの強磁性層が非磁性層を介して反平行に交換結合した3層膜 (Synthetic Antiferromagnet : SyAF) をフリー層とする MTJ を用いるのが好ましい。その理由は、ひとつには素子が小さくなった場合、メモリ素子間の磁氣的干渉が懸念されるが、SyAF ではメモリ素子内で磁極が閉じるのでそれを解消できる可能性が高いこと、二つ目には同じく素子が小さくなった場合に懸念される熱揺らぎ耐性の改善が期待されること、三つ目には本プロジェクトで提案している自己差動読み出し素子を作製し易いこと、などである。そのためには a) SyAF 素子の磁化反転挙動を明らかにすること、b) SyAF 素子のスピン注入磁化反転を実現すること、c) SyAF 素子の熱揺らぎ耐性を明らかにすること、が必要である。c) については齊藤グループのところで述べられる。

(1-a) SyAF 素子の磁化反転挙動

MTJ のフリー層は“1”、“0”を与えるメモリ層なので、その磁区構造は磁化方向が一様な単磁区でなければならない。磁性体を単磁区構造にするためには、反磁界に打ち勝つだけの一軸性の磁気異方性を付与する必要がある。そのためスピンメモリでは形状磁気異方性を利用し、フリー層のアスペクト比 k (素子長さ/素子幅) を適切な値にする必要がある。形状磁気異方性は $4\pi C(k)M_s t/w$ で与えられる。 $C(k)$ は形状に依存する反磁界係数であり、 k が大きくなる程大きくなる。 M_s 、 t 、 w はそれぞれフリー層の飽和磁化、膜厚および素子幅である。磁化反転に必要な磁場はこれに結晶磁気異方性 K_u の項が加わり、磁化反転磁場 (スイッチング磁場と呼ばれる) H_{sw} は次式で与えられる。

$$H_{sw} = 2K_u/M_s + 4\pi C(k)M_s t/w \quad (1)$$

フリー層はソフト磁性体なので K_u は小さく、サブミクロンサイズの素子では第2項の方が桁違いに大きい。そのため、スイッチング磁場はほとんど形状磁気異方性で決定される。従って、素子幅 w が小さくなればスイッチング磁場はそれに逆比例して大きくなることを避けられない。これはメモリを大容量化した場合、より大きな書込み電流が必要になることを意味する。少しでも書込み電流を小さくしようと思えば、(1)式からわかるように $M_s t$ 積を小さくすればよいが、あまり小さくすると熱揺らぎ耐性が低下するのでそれには限界がある。また、 k を小さくすることも有効であるが、小さくしすぎると多磁区構造になり、スイッチング磁場が増大する。SyAF では磁性体端部の磁極を打ち消すように非磁性層の上下の磁性体からの漏れ磁束が閉じる形になるので、反磁界を小さくできるとともに $k = 1$ の場合にも単磁区構造を形成できる可能性がある。以下、SyAF の特徴を明らかにするため $k = 1$ の素子についての実験結果を述べる。

SyAF 膜としては $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (10 nm)/Ru (0.6 nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (6 nm) を用いた。薄膜の作製は超高

真空マグネトロンスパッタ装置を用いて行い、電子線リソグラフィとイオンミリング装置を用いて微細加工素子を作製した。図1に示すように、保磁力はマイクロカー効果(MOKE)を用いて磁化曲線から求め、磁区構造はMFM(磁気力顕微鏡)を用いて調べた。Ruはその膜厚が薄い場合、非常に強い反強磁性結合をもたらすことがわかっている。図2に上記SyAF膜の磁化曲線を示す。素子サイズは $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ である。ある磁場範囲で磁化が一定になり、反強磁性結合素子に期待されるような予想通りの結果が得られている。

図3は長さが $2 \mu\text{m}$ で種々の k をもつ上記SyAF素子のMFM像である。比較のため $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (10 nm)単層膜のMFM像も示している。明らかに単層膜は $k \leq 2$ の場合多磁区構造であるのに対し、SyAF膜のMFM像は $k=1$ でも単磁区構造を示している。これはSyAFの層間交換結合が強く、反磁界に打ち勝っているためである。実際、Ru膜厚を厚くして交換結合の大きさを弱めると、 $k=1$ の場合単磁区構造が得られなくなる。また、磁性層の厚さを厚くした場合でも交換結合磁場が小さくなるので、単磁区構造を得にくくなる。

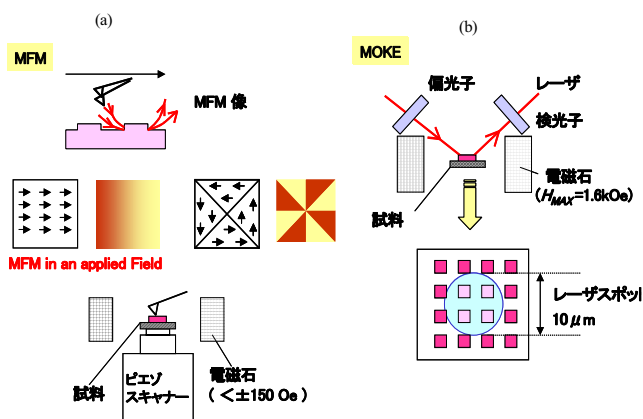


図1 MFMによる磁区構造の観測法とカー効果を用いた磁化曲線の測定法

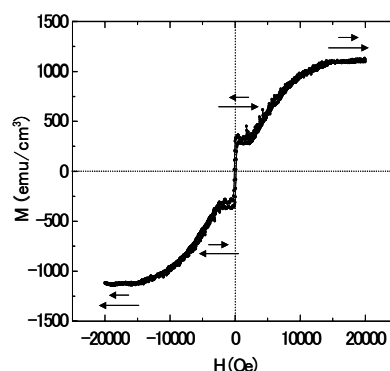


図2 SyAF膜の磁化曲線

次にMFMを用いて観察した磁化反転の様子を図4に示す。素子サイズはいずれも $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ である。図中矢印は印加磁場方向を表している。(a)は $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (10 nm)単層膜の磁場中でのMFM像であり、150 Oeの印加磁場中では単磁区構造を示し、磁場を徐々に減少させると50 Oe付近で磁区を形成し始める。更に磁場を減少させ、逆方向に印加していくと-150 Oeの印加磁場で単磁区構造となる。この結果から、単層膜の磁化過程は磁壁移動で起こっていることがわかる。(b)はSyAFの磁場中MFM像である。膜構成は $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (6 nm)/Ru(0.45 nm)/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (10 nm)である。100 Oeの印加磁場および残留磁化状態で単磁区構造をとっていることがわかる。磁場を逆方向に印加していくと、-30 Oe付近で単磁区構造を保ったまま磁化が回転し始め、-50 Oe近傍でほぼ回転し、-100 Oe付近で完全に磁化反転する様子が見られる。この結果から、SyAFでは磁化反転が一斉回転で起こり、磁化曲線の測定結果と一致している。

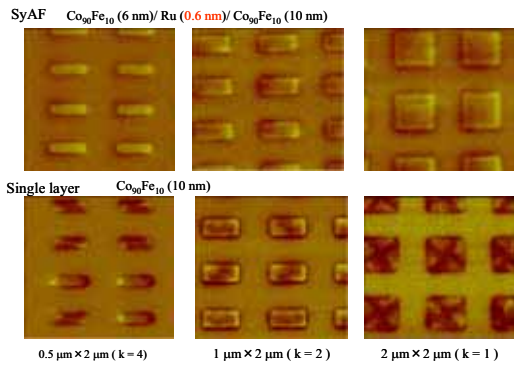


図3 MFMによる単層膜およびSyAF膜の磁区構造のアスペクト比依存性

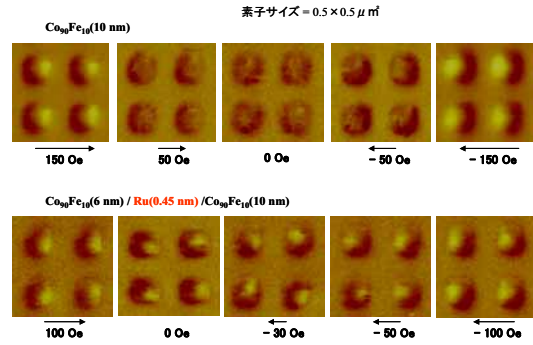


図4 MFMを用いて観察した単層膜およびSyAFの磁化過程

以上の結果を踏まえ、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(t_1)/\text{Ru}(d)/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(t_2)$ SyAF膜の保磁力 H_c の素子幅依存性を調べた。図5は $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(10\text{ nm})/\text{Ru}(0.45\text{ nm})/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(6\text{ nm})$ の H_c の素子幅依存性である。

(1)式からわかるように、一般に素子幅 w が小さくなるに連れて H_c は増大するが、 $k=1$ の素子は w に依存せず一定を示している。磁化過程に対する交換結合の大きさの影響を調べるため、Ru膜厚 d を変えて H_c の素子幅依存性を調べた結果を図6に示す。 d が大きくなると H_c の素子サイズ依存性が大きくなることからわかる。これは d の増大とともに交換結合の大きさが小さくなり、磁化反転の際、完全な反平行結合を保てなくなるためと考えられる。従って、 H_c の素子サイズ依存性をなくすためには、素子サイズが小さくなるに連れて増大する静磁エネルギーよりも交換結合の大きさを十分大きくしなければならない。

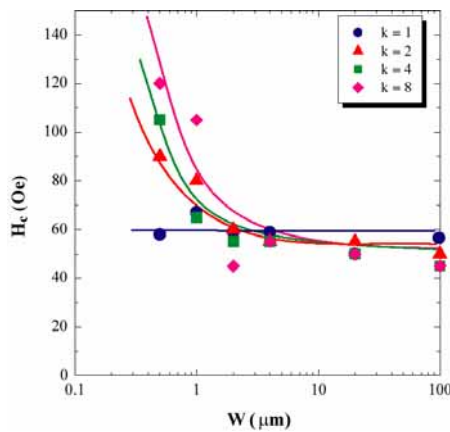


図5 SyAFの保磁力 (H_c) の素子幅依存性

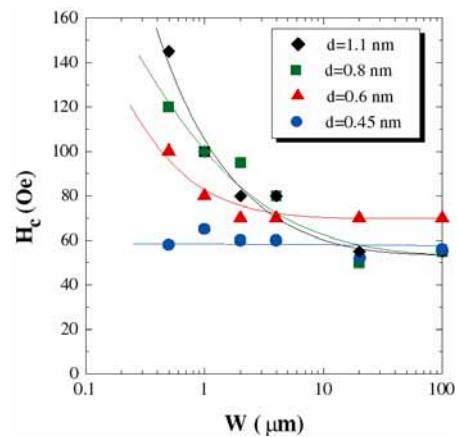


図6 Ru膜厚 (d) をパラメータとしたときのSyAFの保磁力 (H_c) の素子幅依存性

次にSyAF膜をフリー層とするMTJ素子を作製し、その磁化反転磁場 H_{sw} を調べた結果について述べる。トンネルバリアはAlを酸化した AlO_x 膜を用いている。図7は $k=1$ のSyAF $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(3\text{ nm})/\text{Ru}(0.5\text{ nm})/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5\text{ nm})$ と $k=2$ の単層膜 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(1.5\text{ nm})$ のスイッチング磁場および磁化曲線の角型比の素子幅依存性を比較して示したものである。単層膜では素子幅が $0.7\text{ }\mu\text{m}$ までは残留磁化が大きく高い角型比を示すが、 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 以下で急激に低下し、それとともに H_{sw} が増加している。このときのTMR曲線を見ると、素子幅 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ の素

子ではヒステリシスに複数のステップが現れ、磁化反転過程が複雑になっていることが予想される。すなわち、スイッチング磁場の増大は磁壁のピンニング効果が寄与していると考えられる。この結果は、単膜膜の場合 $k=2$ でも単磁区構造を安定化させることが難しく、 k をより大きくする必要があることを示唆している。それに対し、SyAF では H_{sw} および角型比が素子幅に依存せず一定であり、 $k=1$ でも単磁区が保持され、形状異方性がゼロになっていることを示唆している。

以上、反平行結合 (SyAF) 膜はアスペクト比が1でも単磁区を形成し、結果としてその保磁力は素子サイズに依存性せず、素子サイズが小さい場合のスイッチング磁場の低減に有効であることを実証した。また、SyAF は素子間のバラツキを低減する効果もある。

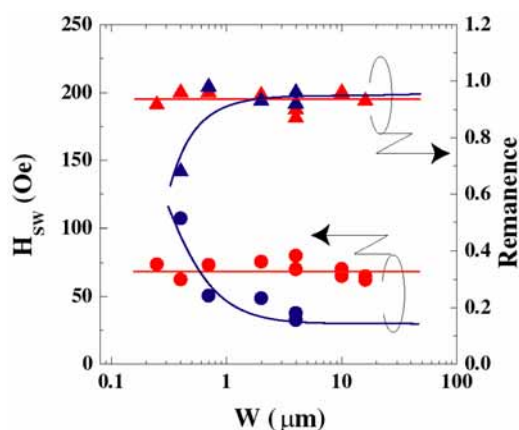


図7 SyAF および単層膜をフリー層とする MTJ の保磁力 (H_c) と磁化曲線の角型比の素子幅依存性

(1-b) SyAF 素子のスピン注入磁化反転

上述のように SyAF は素子が微細化しても磁化反転に必要な電流は増大せず、大容量メモリ素子として有効であることを実証した。しかし、素子が微細化する程磁化反転に必要な電流が原理的に小さくなるという、より大容量メモリに適した画期的な方法がある。それがスピン注入磁化反転 (Current-Induced Magnetization Switching, CIMS) 法である。これは磁性体から素子に直接電流を流し、これによってスピン偏極電子によるスピントルクがフリー層に働き磁化反転を行うものであり、磁化反転に必要な電流は素子体積に比例するため、素子が小さくなるほど電流は小さくて済む。CIMS は最初、理論的に提唱されたが、その後実験的にも検証され、現在は非常に多くの研究がある。Slonczewski により示された CIMS に必要な臨界電流 I_c を表す式を以下に示す。

$$I_c^\pm = \alpha e M_s V [H_{ext} \pm (H_{ani} + 2\pi M_s)] / \hbar \cdot g(\theta) \quad (2)$$

ここで、 \pm は電流の向き、 α はダンピング定数、 e は電子の電荷、 M_s は磁性体の飽和磁化、 V は磁性体素子の体積、 H_{ani} は異方性磁場、 H_{ext} は外部磁場、 $2\pi M_s$ は膜面垂直方向の反磁場、 $g(\theta)$ はスピン注入効率である。これから、臨界電流は素子体積に比例し、素子が縮小するほど磁化反転に必要な電流は小さくなる。これは従来の電流磁場による磁化反転とは逆の関係であり、スピン注入磁化反転はスケールアップが可能である。これが大容量スピンメモリに対して大いに期待される理由である。研究開始した 2002 年当時、実験は GMR 素子に向けられており、正、負の電流で磁化が互いに逆方向に反転することは検証されたものの、CIMS に必要な電流密度が 10^7 A/cm² と大きいということが指摘されていた。本研究ではこの CIMS が SyAF 素子に対しても可能かどうか、また、可能な場合電流密度は増えるのか、それとも減るのかに興味を持たれた。前者に対しては構造が単層膜に比べ複雑になるので必ずしも CIMS が起こるかどうかは自明ではないこと、後者に対しては体積が増大するので電流密度が増大するのではないかと懸念された。

実験はまず単層膜について行い、CIMS を観測するための技術開発を行った。スピン注入磁化反転を観測するためには素子サイズを 100 nm 程度に小さくする必要があり、そのためには微細加工技術を確立しなければならない。まず、超高真空マグネトロンスパッタ装置を用い、熱酸化 Si 基板上に Ta(3)/Cu(80)/Co₉₀Fe₁₀(10)/Cu(10)/Co₉₀Fe₁₀(2.5)/Cu(5)/Ta(3) (カッコ内の数字は膜厚、単位 nm) からなる多層膜を作製した。下部の Ta(3)/Cu(80) は

Co₉₀Fe₁₀ 膜のラフネスを改善するとともに、電極の抵抗を下げるために用いている。その上の Co₉₀Fe₁₀(10)は磁化固定層であり、スピン注入で磁化反転しないように膜厚を 10 nm と厚くしてある。Co₉₀Fe₁₀(2.5)はフリー層であり、スピン注入で磁化反転する磁性層である。Cu(10)はスピン注入磁化反転を観測するための GMR 効果を得るために用いており、二つの Co₉₀Fe₁₀ 層間の交換結合が無視できるように膜厚を 10 nm と厚くしている。上部の Cu(5)/Ta(3)は酸化防止とともに微細加工用マスクとしても機能している。薄膜は一軸異方性を付与するため、約 100 Oe の磁場中で作製されている。次に、微小素子を作製するため電子ビームリソグラフィとイオンミリング法を用いて微細加工を行った。微細加工法にはリフトオフプロセスのみで作製できるレジストマスク法を採用している。レジストにはエッチング耐性に優れたポジ型の ZEP520 を用いた。これにより位置検出用のマークを作製し、電極パターンの形成、電極間の絶縁を取るための SiO₂ の成膜などを経て、**図 8** (a) に模式的に示すような CPP-GMR ナノピラーを作製した。イオンミリングは下部磁性層の途中で止めており、これによって上下磁性層間の静磁結合を抑制している。同図 (b) は作製したナノピラーの SEM 像である。素子サイズは 110×270 nm² であり、ほぼ設計どおりである。同図 (c) は外部磁場を印加して得られた CPP-GMR 素子の磁気抵抗曲線である。ほぼ対称的な曲線が得られており、GMR = 0.52%、抵抗変化 $\Delta R = 0.02 \Omega$ である。(d) は素子に電流を流して得られた抵抗変化である。最初に反平行 (AP) 状態を作り出すために 150 Oe の外部磁場を印加する。この状態で電流を流し、図示のように 1 から記載した番号の順番通りに正、負に電流を変化させ、再び 1 に戻す。抵抗は 2 から 3 で急減し、6 から 7 で急増している。この急激な変化はフリー層の Co₉₀Fe₁₀(2.5) の磁化が反転し、それぞれピン層の Co₉₀Fe₁₀(10) に対し反平行 (AP) および平行 (P) 状態に変化したことに対応している。すなわち、スピン注入磁化反転が生じたことを示している。抵抗変化は $\Delta R = 0.02 \Omega$ であり、(c) と一致していることから磁化は完全に反転していると言える。このときの電流の大きさは AP → P の場合 2.6 mA、P → AP の場合 5.2 mA であり、電流密度に直すとそれぞれ $8.8 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ および $1.8 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ である。この大きさは (2) 式から求められる値とほぼ一致している。外部磁場の大きさをいろいろ変えて測定した、スピン注入磁化反転による R - I 曲線を **図 9** 示す。磁場が大きくなるにつれて AP から P への電流は減少し、P から AP への電流は増大している。この結果は Slonczewski のスピントランスファモデルによる (2) 式と一致している。

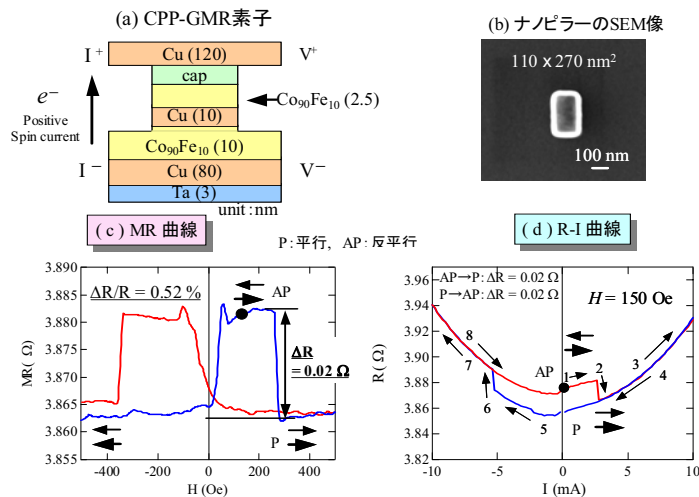


図 8 作製した CPP-GMR 素子の(a)断面図、(b)ナノピラーの SEM 像、(c)MR 曲線、(d)スピン注入による抵抗変化

上述のように、スピン注入磁化反転に必要な電流は 10^7 A/cm² 程度のオーダーになる。スピンメモリでは TMR 素子の絶縁破壊耐性などを考慮すると、スピン注入磁化反転の電流密度は 5×10^6 A/cm² 程度に低減する必要がある。電流密度を下げる方法としては、(2) 式から直ちに次のようなことが考えられる。

- ①磁化 M_s の小さい磁性体を適用する。
- ②ダンピング定数 α の小さい材料を用いる。
- ③スピン依存透過係数 g を大きくする。

スピン注入磁化反転に対する (2) 式から、電流

密度は磁化の 2 乗に比例するので磁化の小さい材料を選択することは有効である。しかし、磁化の小さい磁性体は熱ゆらぎ耐性も小さくなるので、

磁化を大きく下げるとは好ましくない。ダンピング定数については、実際の素子でどの程度制御できるかは不明である。したがって、今のところは素子構造を工夫して、スピン依存透過係数を増大させる方法が有効である。我々は Ru のスピントラップ機能を利用することを検討した。素子は単層膜のときと同じように、超高真空スパッタ装置を用いて作製した積層膜を、電子ビームリソグラフィと Ar イオンミリングを用いて微細加工した CPP-GMR ナノピラーであり、素子形状は 100×400 nm² である。薄膜は熱酸化 Si 基板上に作製し、その積層構造は Ta(3)/Cu(80) から成る下部電極上に、MnIr(10)/Co₉₀Fe₁₀(5)/Cu(6)/Co₉₀Fe₁₀(2.5)/Ru(6)/Co₉₀Fe₁₀(5) のスピントラップ型 (カッコ内は膜厚、nm) であり、上部に Cu(5)/Ta(2) 電極を設けている (図 10 (a))。両側の Co₉₀Fe₁₀(5) の磁化は同じ向きに固定されており、中央の薄い Co₉₀Fe₁₀(2.5) がフリー層となり磁化反転する。Ru/Co₉₀Fe₁₀ (上記下線部) を設けていることが従来と異なる素子構造である。電流は上部電極から下部電極に向けて流れる方向を正と定義している。図 10 (b) は外部磁場を印加して得られた室温における CPP-GMR 曲線を示しており、スピントラップ特性が得られている。MR 変化率は 0.57% である。図 10 (c) はスピン注入磁化反転で得られた臨界電流の外部磁場依存性を示し、挿入図は外部磁場がゼロのときのスピン注入磁化反転による抵抗変化である。抵抗変化 ΔR は図 10 (b) の GMR 曲線で得られたものと同じであり、スピン注入によって完全に磁化反転していることを示唆している。抵抗は正の電流で増大、負の電流で低下しているこ

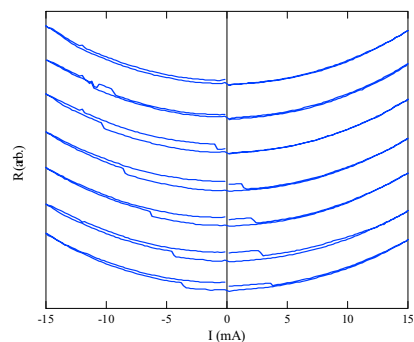


図9 外部磁場(H)を変えたときに得られるスピン注入磁化反転のヒステリシス

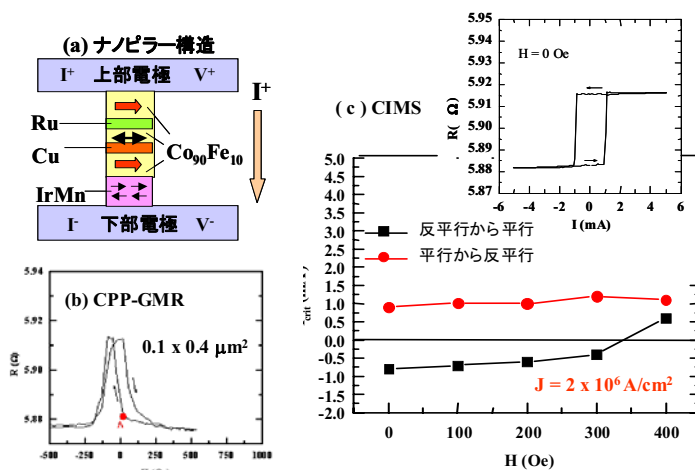


図10 作製した素子構造 (a)、CPP-GMR曲線 (b) およびスピン注入磁化反転電流の外部磁場依存性 (c)。挿入図はゼロ磁場におけるスピン注入による抵抗変化である。

とから、中央の $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ の磁化は固定された $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ の磁化に対して、正の電流で反平行 (AP) に、負の電流で平行 (P) に反転していることを示している。また、P から AP (図中●) に変化する臨界電流は外部磁場とともに増大し、AP から P (図中■) に変化する臨界電流は減少している。これはスピントランスファモデルと一致している。外部磁場ゼロにおける臨界電流密度は素子形状から計算し、 $J^{\text{AP} \rightarrow \text{P}} = -2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, $J^{\text{P} \rightarrow \text{AP}} = 2.3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ と求まる。これは新しい素子構造によって、従来よりも電流密度が一桁以上低下したことを示している。上記では Ru の膜厚を 6 nm としたが、これを最適化すると臨界電流密度は $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ に低減する。

次に、Ru/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ によって臨界電流密度が低下するメカニズムについて検討した。重要なことは、Ru は Co または CoFe 合金との界面で多数スピン電子を強く反射し、スピントルカタ機能をもつことである。すなわち、図 11(a) (電流が I^+ の場合) において、電子は F_3 から F_1 に向かって伝導するが、 F_3 の多数スピン電子は Ru/ F_2 界面で反射され、少数スピン電子が F_2 にトルクを与えその磁化を反転させるように働く。これに加え、Cu/ F_1 界面で反射した少数スピン電子が及ぼす従来のスピントルクが同じ向きに働く。その結果、磁化反転に必要な電流密度が低下することになる。同様に電流が I^- の場合、Cu を経由した F_1 からの多数スピン電子と Ru/ F_3 界面で反射した多数スピン電子が F_2 の磁化に対して同じ向きにスピントルクを及ぼす結果、磁化反転に対する電流密度が低下する。このように、Ru/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ を設けることでその界面においてスピントルカタ機能が働き、スピン反転を効果的にするのである。これは別の言い方をすれば、Ru のスピントルカタ機能によって系全体にスピン蓄積が生じたことで、臨界電流密度が低減したということになる。

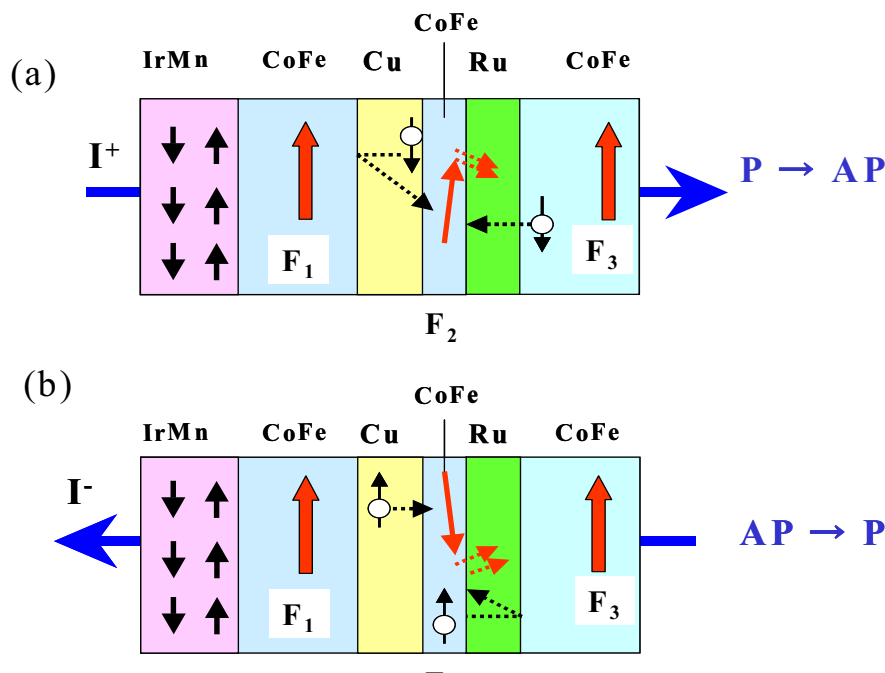


図 11 Ru 層による CIMS の電流密度低減のメカニズム

上記のようなメカニズムが正しいとすれば、スピントルカタ機能に寄与する Ru の膜厚がスピン拡散長 (12 nm) より厚い場合、磁化反転電流の低減効果は期待できないはずである。なぜなら、スピンは Ru 層内で緩和してしまいスピントルクが有効に働かないからである。実際、Ru 膜厚を 15 nm にすると磁化反転電流密度は $1.7 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ であり、電流密度低減効果は得られない。以上、従来の CPP-GMR スピンバルブ構造に対し、Ru/ $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ の 2 層を追加することでスピン注入磁化反転に必要な電流密度を一桁低減させ、 $1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ の電流密度

で磁化反転可能なことを明らかにした。

次に、SyAF フリー層のスピ注入磁化反転を調べるため、 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ru}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ をフリー層とする $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(t_1)/\text{Ru}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(t_2)$ CPP-GMR 素子を作製した。 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ の膜厚は $t_1 = t_2 = 2 \text{ nm}$ (Type 1), $t_1 = 1.5 \text{ nm}$, $t_2 = 2.5 \text{ nm}$ (Type 2), $t_1 = 2.5 \text{ nm}$, $t_2 = 1.5 \text{ nm}$ (Type 3) の 3 種類とした。いずれの場合もスピ注入磁化反転を観測することができた。一例を Type 1 に対して図 12 に示す。明瞭な磁化反転が観測されており、電流密度は反平行 (AP) から平行 (P) が $1.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、平行 (P) から反平行 (AP) が $-1.8 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ である。これは従来の素子に比べ半減している。さらに、膜厚を考慮するとスピ注入効率は約 3 倍向上している。このような効果は、先に示したように $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ru}$ 界面で多数スピ電子が反射し、少数スピ電子は透過するという考えで説明できる。

以上、SyAF フリー層のスピ注入磁化反転では実質的に 3 倍程度スピ注入効率が向上することを見出した。

[本成果の主要論文等]

“Size-independent spin switching field using synthetic antiferromagnet:” K. Inomata, N. Koike, T. Nozaki, S. Abe and N. Tezuka, *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 2667-2669.

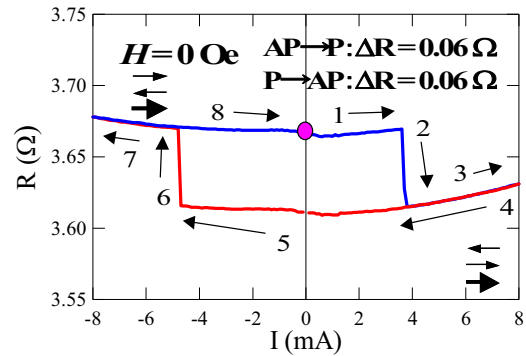
“Single domain observation for synthetic antiferromagnetically coupled bots with low aspect ratios”: N. Tezuka, N. Koike, K. Inomata and S. Sugimoto, *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 604-606.

“Magnetic switching properties of magnetic tunnel junctions using a synthetic ferrimagnet free layer”: T. Nozaki, Y. Jiang, H. Sukegawa, N. Tezuka, A. Hirohata, K. Inomata and S. Sugimoto, *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 3745-3748.

“Substantial reduction of critical current for magnetization switching in an exchange-biased spin-valve”, Y. Jiang, T. Nozaki, S. Abe, T. Ochiai, A. Hirohata, N. Tezuka and K. Inomata, *Nat. Mat.*, **3**, (2004) 361-363.

“Distinctive current-induced magnetization switching in a current-perpendicular-to-plane giant-magnetoresistance nanopillar with a synthetic antiferromagnet free layer”
T. Ochiai, Y. Jiang, A. Hirohata, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata, *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 242506-1-242506-3.

R-I curve



$$|I_c^{AP \rightarrow P}| = 3.6 \text{ mA} (= 1.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2)$$

$$|I_c^{P \rightarrow AP}| = 4.7 \text{ mA} (= 1.8 \times 10^7 \text{ A/cm}^2)$$

図 12 SyAF フリー層のスピ注入磁化反転

(2)研究成果の今後期待される効果

反平行結合素子をフリー層とする MTJ 素子はギガビット級大容量 MRAM のメモリ素子として必須の情勢になってきており、最近研究が増えてきている。それは本研究で示したように、①低アスペクト比でも単磁区を形成すること、②熱揺らぎ耐性に優れること(3.5で詳述)、③ビット間磁気干渉を避けられること、④スピン注入磁化反転が可能なこと、など多くのメリットがあるからである。先行して開発を進めてきた我々としては、この動向を静かに見守るとともに、磁化反転電流密度のより低減化を目指して研究を続ける。

3.5 自己差動読み出し・スピン注入書き込み技術開発に関する研究 (東芝、斉藤グループ)

(1)研究実施内容及び成果

(1-a) コンセプトと動作原理

本研究の目標は、将来の MRAM の大容量化、引いては本戦略目標のスピン量子メモリを想定し、自己差動読み出し・スピン注入書き込み型メモリ素子およびその検出法の開発であり、ユニバーサルメモリ実現のための要素技術を確認することにある。図 1 に本コンセプトの構造と原理図を示す。現状の MRAM では、参照セルを設けその電圧を選択セルの信号電圧と比較して、MTJ 素子の磁化が反平行(例えば”1”)か平行(例えば”0”)かを判別する。この場合、MTJ の信号出力は半分しか利用できないことになる。しかし、図 1 (b)に示したように上下に MTJ を積層し差動読み出しを行えば MTJ の信号出力をフルに利用することが可能となり、信号出力を倍増することができ超高速動作の不揮発メモリを実現できる。

一方、書き込みは図 1(c)に示したように素子サイズに対してスケラビリティを有するスピン注入書き込み法を目標とした。本素子の場合、電流分岐を行い上下の MTJ を同時にスピン反転する。このようなアーキテクチャが実現できれば、超高速不揮発 RAM のユニバーサルメモリが実現可能となる。

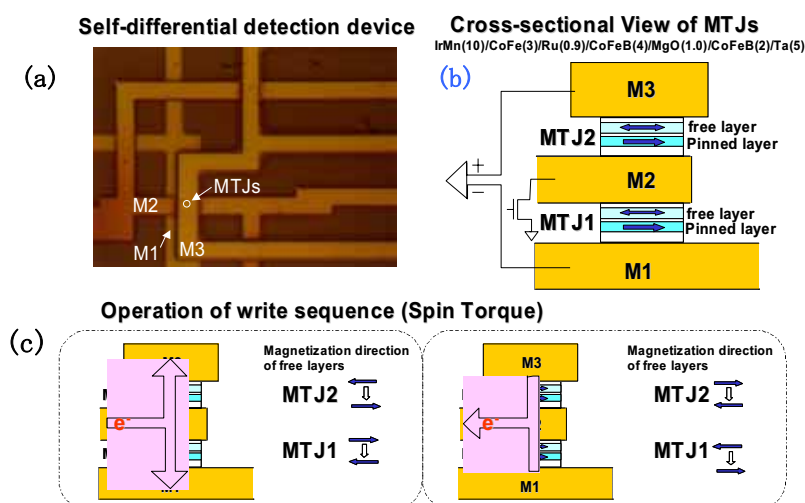


図 1 自己差動読み出し/スピン注入書き込み素子の構造と原理図

具体的には、以下の項目を設定し研究を行った。

(1) ユニバーサルメモリ実現のためのスペックの検討

- (2) 自己差動素子の作製技術およびその検出方法の研究: エッチバックプロセス及び、CMP プロセスの採用および自己差動評価装置の設計・試作
- (3) アスペクト比 $k = 1$ のメモリセルを目指した MTJ 素子構造の検討: 反平行結合 (SyAF) フリー層の有効性の検証
- (4) スピン注入書き込みの電流密度低減
- (5) 低抵抗自己差動増幅素子の作製とスピン注入書き込み・自己差動読出しの実現

以下、具体的な実施内容及び成果を示す。

(1-b) 高速読み出しメモリ実現のためのスペック

自己差動増幅読出し・スピン注入書き込み素子を用いて高速読み出しを実現するための MTJ スペックを計算した。計算は、自己差動読み出し (SDD) アーキテクチャおよび一つのトランジスタと一つの TMR 素子で 1bit を構成する 1T-1MTJ アーキテクチャに対して行い、必要な抵抗変化率 (MR 変化率) および TMR 素子抵抗のスペックを求めた。計算結果を図 2 に示す。ここで $TMR = (\text{抵抗変化の値} / \text{低抵抗の値}) \times 100$ と定義した。スピン注入磁化反転のように電流を直接素子に流して磁化反転を行なう場合、読み出し時の電流経路と書き込み時の電流経路が同一となるため、読み出し電圧と書き込み電圧のマーヅンを確保する必要がある。その場合、素子電圧が低い値で大きな読み出し出力 (MR 変化率) を得る必要がある。図 2 の MR 変化率は、トランジスタが安定動作する最低の電圧 (200mV) を素子に印加したときの MR 変化率のスペックである。図より、読み出し速度を 50 nsec から 5 nsec へと高速化するには MR 変化率を大きくしなければならない。しかし、SDD ではより小さな

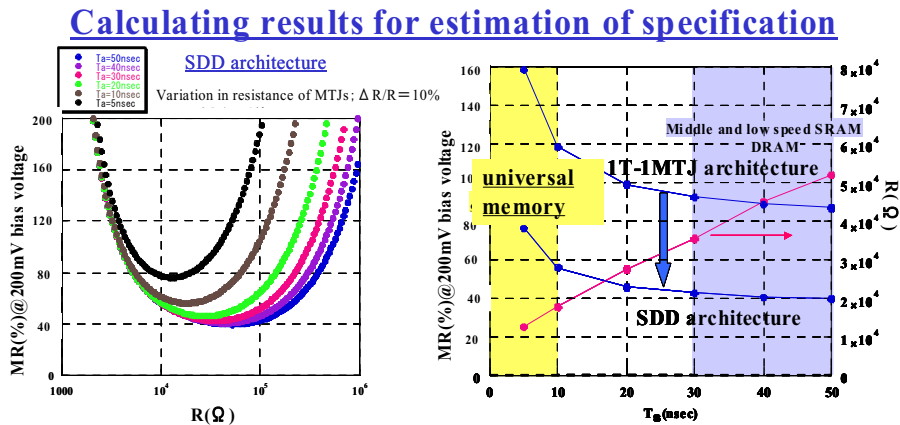


図 2 読み出し速度と TMR の関係

TMR で済む。例えば 5 ns の高速読み出しを得るためには、TMR は 1T-1MTJ アーキテクチャでは少なくとも 154% 必要であるが、SDD アーキテクチャでは 75% で済む。読み出し時の電圧は現在、スピン注入書き込み電圧および、読み出し電圧のマーヅンを取るため更なる低電圧化が進められている。どの程度まで低電圧化が可能かは、現在明らかではないが、100 mV になったと仮定すると、高速読み出し (5n sec) のためには 1T-1MTJ では少なくとも TMR=308%、SDD では TMR=150% が必要となる。

一方、スピン注入書き込み時の電流密度 (J_c) は、現在、トランジスタに流せる電流で制限されている。本 Pj 戦略目的である MOSFET を使用しないメモリ素子が実現すれば、 J_c の制限は緩和される。その緩和される条件は、トンネルバリアの信頼性に依存することになる。トランジスタに流せる電流量は、現状、1 Gbit メモリで 100 μ A 程度となる。

表1 Gbit 級スピン注入メモリスペック

スピン注入書き込み電流密度: $J_{CO} < 1 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$
トンネルバリア破壊電圧: $V_f > 1\text{V}$
MTJ抵抗: $RA \leq 20 \Omega \mu\text{m}^2$
MR=75% (200mVバイアス電圧時) for SDD architecture
MR=150% (100mVバイアス電圧時) for SDD architecture
接合面積 $\leq 0.08 \times 0.16 \mu\text{m}^2$
熱安定性 $K_u V / K_B T \geq 60$

以上の結果から、5 ns の高速読み出し (≥ 1 Gbit メモリ) を得るためのスペックを表 1 にまとめた。

(1-c) 自己差動素子の作製技術およびその検出方法の研究: エッチバックプロセスおよび, CMP プロセスの採用と自己差動評価装置の設計・試作

エッチバックプロセス及び, CMP プロセスの採用による自己差動素子の作製技術確立並びに自己差動出力の観測に成功した。自己差動素子作成プロセスフローを図 3 に示す。自己差動増幅素子実現のためには、図 3 (d) のメタル配線 (M2) 上のマクロおよびマイクロなラフネスの低減が必須となる。そこで、図 3 (c) でエッチバックプロセスを用い、MTJ の頭の

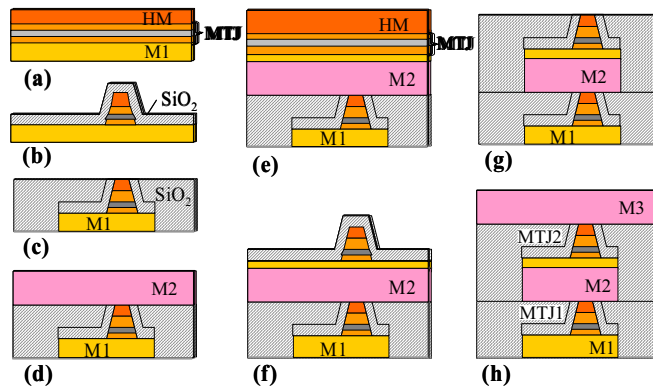


図3 自己差動素子プロセスフロー

Ta Cap および SiOx 層間絶縁膜のマクロな凹凸が最小になる条件出しを行なった。その後、M2 配線を成膜した後に (図 3 (d)) CMP (Chemical mechanical polishing) により M2 上のマイクロな凹凸を取り除いた。その結果、M2 上の平均粗さを M1 上のラフネスと遜色ない程度の $Ra=0.24 \text{ nm}$ に減少させることに成功し、上下 MTJ の TMR 値および抵抗値を同一の値にすることができた。

また、自己差動読み出しを可能とするための評価装置および評価ソフトの立ち上げを行なった。評価装置は、本研究の最終目標である自己差動読み出し・スピン注入書き込みをパルス測定で行うため、100MHz までの電流パ

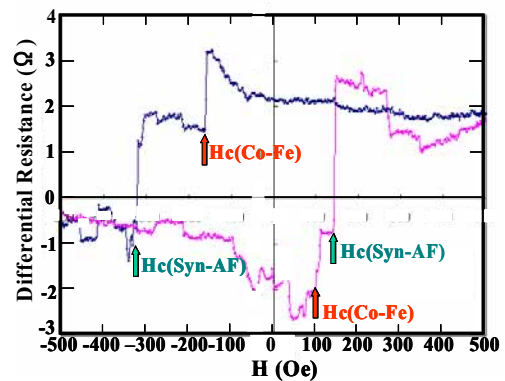


図4 自己差動読み出し結果

ルスが素子に印加できるように設計した。図4に、上記プロセスを用い外部磁場を印加して自己差動読み出しを行なった結果を示す。磁場を印加すると信号が正負に反転していること、上下 MTJ のフリー層の保磁力に相当する磁場で信号に飛びが観測されることから、自己差動読み出しが正常に動作していることが分かる。

(1-d) アスペクト比 $k = 1$ のメモリセルを目指した MTJ 素子構造の検討：反平行結合 (SyAF) フリー層の有効性の検証

本研究では SyAF フリー層の熱揺らぎ耐性が高いことを確認した。熱揺らぎ耐性を評価するため、電流磁界反転用 Word 線を別途設けた下記 MTJ 素子を作製した。MTJ の成膜は超高真空スパッタを用いて、微細加工は KrF ステップ、イオンリング/RIE を用いて行い、MTJ の上部に層間絶縁膜を介した Word 線を作製した。SyAF フリー層を有する MTJ は、Ta/Ru/CoFe(3)/Ru(0.95)/CoFe(5)/AlO(1)/CoFe(3)/IrMn(10) からなる。また、熱揺らぎ耐性の層間交換結合の強さ依存性を評価するため、Ru 膜厚の異なる試料を作製した。比較のため単層フリー層を有する Ta/Ru/CoFe(3)/AlO_x(1)/CoFe(3)/IrMn(10)、および Ta/Ru/NiFe(3)/AlO_x(1)/CoFe(3)/IrMn(10) も併せて作製した。MTJ の評価は外部磁場および Word 線に電流を流し電流磁界を利用して行なった。熱揺らぎ耐性定数は Sharrock の式を用いて保磁力の磁場および電流磁場スイープレート依存性を self-consistent に解析することにより求めた。

図5 (a) は SyAF フリー層と単層フリー層を有する $k = 1$ の MTJ に対して得られた

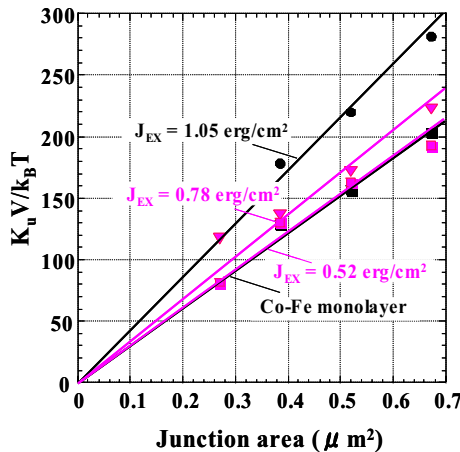


図5(a) 熱揺らぎ耐性の接合面積依存性

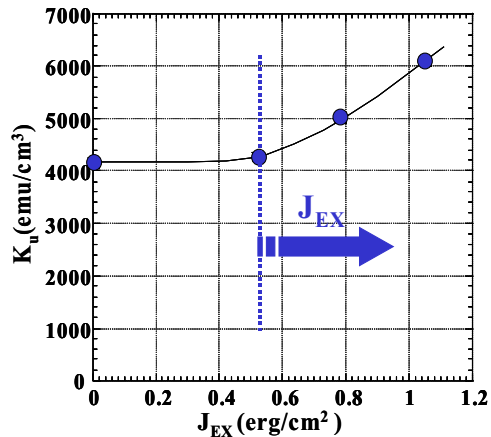


図5(b) 一軸異方性定数の層間の相互作用依存性

$K_u V / k_B T$ を、接合面積に対して示した結果である。図5 (b) は図5 (a) の平均値 (実線) から求めた平均の K_u 値の層間結合 (J_{EX}) 依存性である。平均の K_u は層間結合が大きくなると増大し、 $J_{EX} > 0.52 \text{ erg/cm}^2$ のとき、 $K_u V / k_B T$ は単層フリー層よりも SyAF free 層の方が明らかに大きくなり有利であることが分かった。

図6は SyAF フリー層 ($J_{EX} = 1.05 \text{ erg/cm}^2$) と単層フリー層を用いた $k = 1, 2, 3$ の MTJ に対する $K_u V / k_B T$ の接合面積依存性を示している。 $K_u V / k_B T$ は接合面積に比例しており、また k を大きくすると増大する。図6から、 $k \leq 2$ で熱揺らぎ耐性は SyAF フリー層の方が有利であることが明らかになった。これは、SyAF free 層の方が反磁界をキャンセルする構造のためそれによるポテンシャル障壁が下がっているためと考えられる。

以上、SyAF フリー層は低アスペクトメモリセルに対して有利であることが分かった。SyAF は単磁区構造をとりやすく、保磁力がスケールすることに加え、今回、熱揺らぎ耐性にも優

れていることが判明したことで、大容量メモリに有効であることを示している。

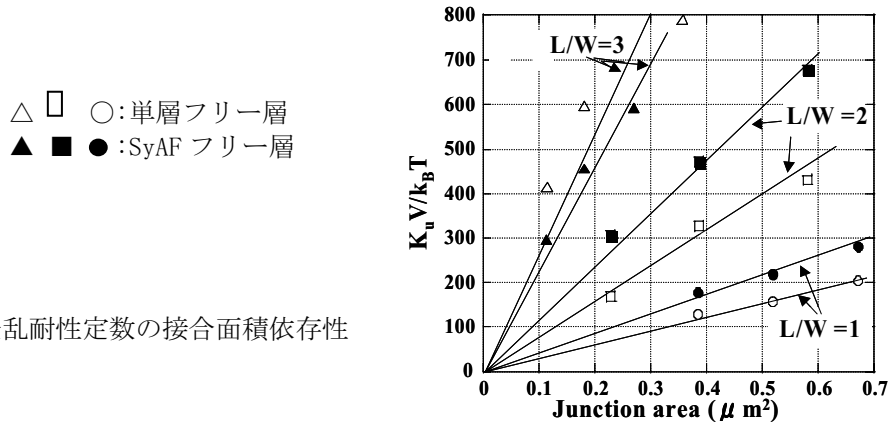


図6 熱擾乱耐性定数の接合面積依存性

(1-f) スピン注入書き込み電流密度の低減

現在のMRAMの書き込みは電流磁場を用いて行っているが、大容量化した場合には消費電力が大きすぎこの方法は採用できない。そのため、スピン注入磁化反転法に着目し研究を行った。応用的観点から見た場合の課題は電流密度の低減であり、通常のGMRやMTJ構造では 10^7A/cm^2 の大きな電流密度を必要としていた。 10^7A/cm^2 の電流パルスを用いるとトンネルバリアの破壊が生じてしまうため、まずは、電流密度を下げる方策を検討した。

また、小さなMTJ素子を作製する技術開発を行い、 O_2 プラズマを用いてレジストをシュリンクすることで、65 nmサイズ幅までMTJサイズを縮小することに成功した。さらに、6~17 $\Omega \mu\text{m}^2$ という低抵抗で60~105%の大きなTMRを有するトンネル接合素子の作製に成功した。ほかに、パルス電流を用いたスピン注入磁化反転の観測技術の開発も行なった。用いたMTJ構造は、 $\text{IrMn}(10)/\text{CoFe}(3)/\text{Ru}(0.95)/\text{CoFeB}(4)/\text{MgO}(1)/\text{CoFeB}(2-3)/\text{Ta}$ である。

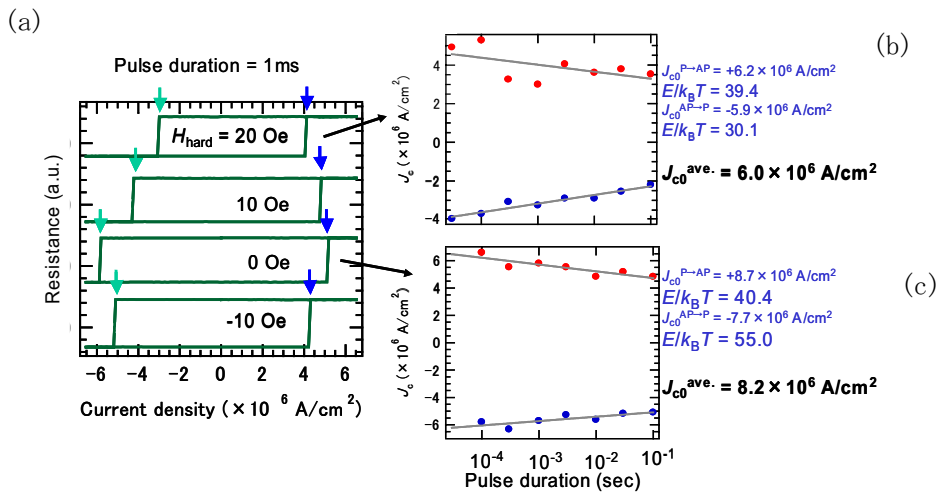


図7(a) スピン注入磁化反転の困難軸磁場依存性, (b) (c) 反転電流密度の書き込みパルス幅依存性

スピン注入磁化反転の電流密度低減方法としては、メモリ素子の困難軸方向にアシスト磁界を印加する方法を考案した。これに着目したのは、困難軸方向にアシスト磁界を印加すると静磁エネルギーが減少するため、スピン注入書き込みを行なうときのエネルギーバ

リアが減少しスピン反転電流密度が減少すると考えられること、および固着層とフリー層のスピンの初期角度が生じているとスピン注入効率が增大するという Slonczewski の理論予測を考慮したためである。スピン注入効率が增大するとスピン反転電流密度は減少する。

図 7(a) にスピン注入磁化反転の困難軸磁場依存性を示す。期待通り、困難軸磁場の値が大きくなるとスピン注入反転電流密度が減少していることが分かる。図 7(b) (c) はこの起源を調べるため反転電流密度の書き込みパルス幅依存性を測定したものである。上記測定は室温で行っているため熱揺らぎの影響が含まれている。パルス幅依存性を用い下記式でフィッティングすることによりスピン注入効率で決まる J_{co} の項とスピン注入書き込みを行なうときのエネルギーバリア $E/k_B T$ の項に分離することができる。

$$J_c = J_{c0} \left[1 - (k_B T / E) \ln(t_p / \tau_0) \right]$$

その結果、スピン注入効率の影響とエネルギーバリアの減少の両方がスピン注入電流密度低減に寄与していることが明らかになった。上記試料では、 $H_{hard} \sim 30$ Oe で約 1 桁電流密度が低減した ($2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$)。

また、図 8 に示すように、TMR 素子に対して 10^4 回以上の読み出し・書き込み特性を確認し、スピン注入磁化反転の高い実用性を示すことができた。さらに、 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 程度まで電流密度を低減すれば、トンネルバリアの信頼性が確保できることを検証した。

(1-g) 低抵抗自己差動増幅素子の作製とスピン注入書き込み・自己差動読み出しの実現

最後に MgO-MTJ を用いてスピン注入書き込み・自己差動読み出しの実験実証を行なった結果を示す。図 9 に作製した試料の電顕写真を示す。試料は、自己差動読み出し、および上下 MTJ の出力を別々に読み出せるようにマスク設計を行なった。図 10 はスピン注入書き込み・自己差動読み出し結果である。正、負の読出し電圧が得られており、スピン注入書き込み・自己差動読み出しを実証できた。

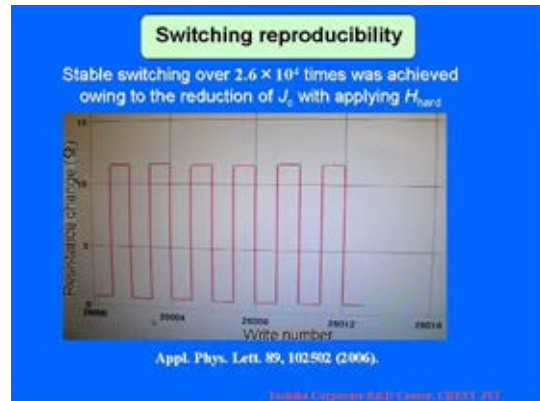


図 8 スピン注入書き込み／読み出し繰り返し特性

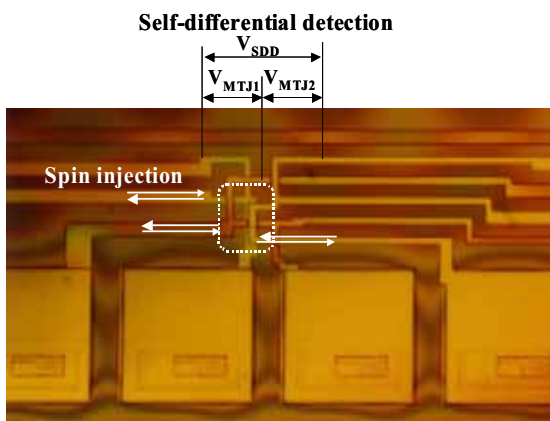


図 9 試作した自己差動読み出し／スピン注入書き込み試料の電顕写真

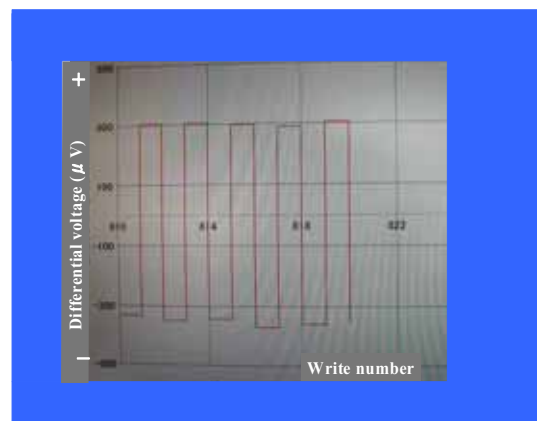


図 10 スピン注入書き込み・自己差動読み出し結果

[本成果の主要論文等]

“Current-induced magnetization switching under magnetic field applied along the hard axis in MgO-based magnetic tunnel junctions:” T. Inokuchi, H. Sugiyama, Y. Saito and K. Inomata, Appl. Phys. Lett. **89**, 2667-2669. (2006)

“Self differential detection using laminated magnetic tunnel junctions” , Y. Saito, H. Sugiyama and K. Inomata, J. Appl. Phys. **97**, 10P502-1-10P502-3 (2005).

(2)研究成果の今後期待される効果

試作した自己差動読み出し・スピン注入書き込みアーキテクチャは良好な特性を示した。大容量 MRAM ではスピン注入書き込みが必須であり、それに伴い読み出し印加電圧を極力抑える努力がなされている。しかし、読み出し時のバイアス電圧を小さくすればするほど大きな MR 比が必要となる。例えば、100mV 電圧での読み出しが可能になった場合、現状の 1 T-1MTJ アーキテクチャでは 308% の MR 比が低抵抗 MTJ で要求される。それに対し、自己差動読み出しアーキテクチャでは MR 比はその半分ですむ。現在の TMR 状況を考えて、本開発のアーキテクチャがユニバーサルメモリを実現できる唯一のアーキテクチャである。従って、本技術は MRAM の大容量化のキー技術になる可能性があり、将来実用化が期待される。

一方、SyAF をフリー層とする TMR 素子は、現在 Gb 級 MRAM のキー技術と認識されるようになってきている。熱揺らぎ耐性の観点から SyAF フリー層の有効性を示せたことは、大容量化の観点から意味がある大きな成果の一つと考えられる。スピン注入磁化反転技術については、従来より一桁の低電流化が可能になり世界と同等レベルに達したものの、尚停電硫化が必要である。今後、熱ゆらぎ耐性定数 $k_u V / K_B T > 60$ を満たす TMR 素子において、 $5 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ 程度の低電流密度化を目指し研究を続けていく必要がある。

4. 非局所スピン注入に関する理論的研究（東北大学金属材料研究所、前川グループ）

(1)研究実施内容及び成果

(1-a) はじめに

スピン注入ナノデバイスでは、電荷電流とスピン電流がナノスケールの構造に強く依存する[1,2]。当グループでは、強磁性金属と常伝導金属からなる非局所スピン注入型の複合ナノデバイスにおけるスピン依存伝導の理論的研究を行った。複合ナノデバイスにおける各電極の抵抗やスピン拡散長、および接合の界面抵抗が、スピン注入、スピン蓄積、スピン流に及ぼす影響を明らかにし、素子特性を最適化する条件を探った。特に、非局所スピン注入により生成される純粋スピン流が引き起こす新規な現象や効果（スピン流誘起磁化反転やスピンホール効果）を理論的に予測し、それらの観測可能性を検討した。これらの研究成果は、スピン依存伝導に対する基礎的な理解を与えるばかりでなく、スピントロニクスへの応用に対しても重要であり、新規なデバイス開発のための理論的指針となると期待される。

(1-b) 非局所スピン注入とスピン蓄積・スピン検出 [3-5]

図 1 に示すように、互いに距離 L だけ離れた 2 本の強磁性金属細線 (F1, F2) と非磁性金属細線 (N) からなるナノ構造におけるスピン注入とスピン伝導の理論的研究を行った。電流 I

を F1 から N の左端へ流して、N へスピン注入を行うと、注入されたスピンは左右に拡散して N 中の右領域にスピン蓄積を生じる。このスピン蓄積は、F2 電極と N 電極の間の電位差 V の測定から求めることができる。すなわち、F1 と F2 電極の磁化が互いに平行、反平行の

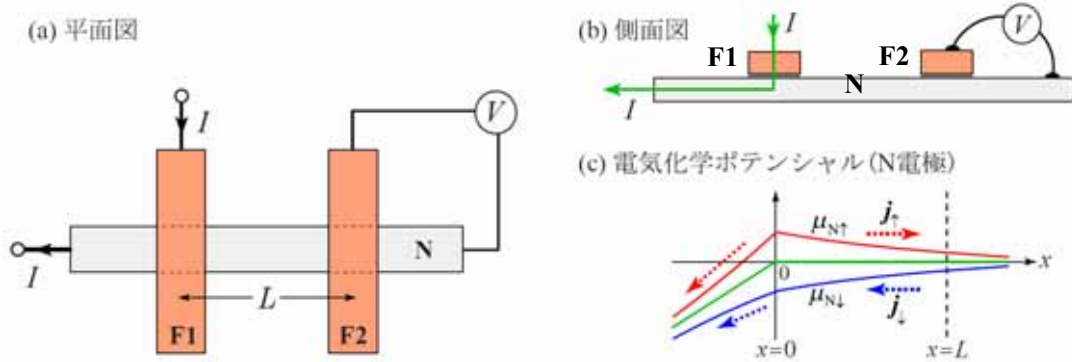


図 1. スピン注入・検出素子：(a) 平面図，(b) 側面図，(c) N 電極における上向きスピン，下向きスピン電子の電気化学ポテンシャルとスピンの流れ。

ときの電位差をそれぞれ V_P 、 V_{AP} と記すと、スピン蓄積はシグナル抵抗 $R_s = (V_P - V_{AP})/I$ として測定される。この方法は、電荷とスピンが分離して伝導することを利用しており、電流の影響を受けずにスピン蓄積を検出することができるという大きな利点がある（非局所測定法）。本研究では、各電極における上向き、下向きスピン電子の電気化学ポテンシャルが満たすボルツマンの輸送方程式を導出し、これを解くことによりナノ構造におけるスピン蓄積、スピン流、スピンスイグナル抵抗に対する一般的な公式を導出した[3]。その結果、検出されるスピン蓄積のシグナル抵抗 (R_s) が、各電極のスピン拡散長、抵抗率、および接合界面抵抗（金属接触か、トンネル接合か）にどの様に依存するのかが明らかになった。図 2 (a) はスピンスイグナル抵抗の計算結果である。図からわかるように、スピンスイグナル抵抗の大きさは、(1) 両方の接合がトンネル接合の場合が最大となり、(2) いずれか一方、または両方の接合が金属接触のオーミック接合の場合はスピンスイグナル抵抗が著しく減少する。

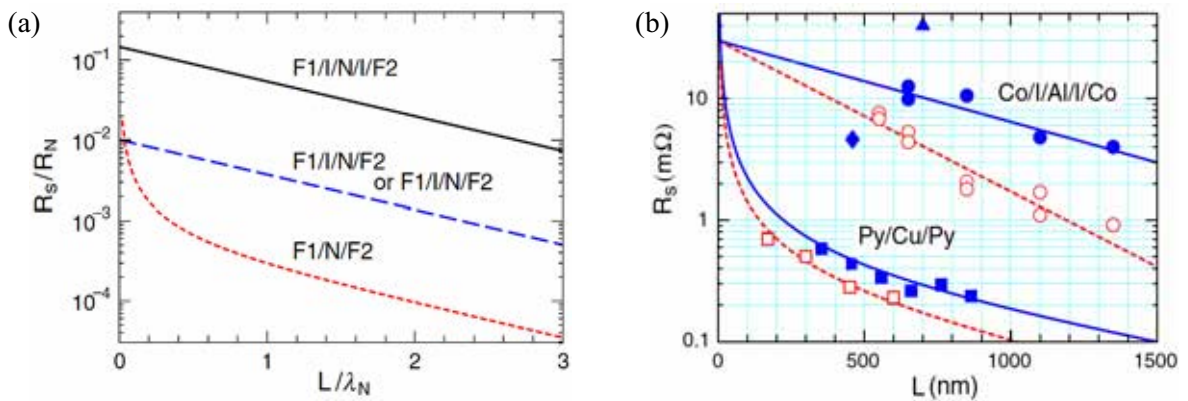


図 2. (a) スピン蓄積シグナル R_s の F1, F2 間の距離 L 依存性. (b) Co/I/Al/I/Co ($I=Al_2O_3$) および Py/Cu/Py の実験結果 (シンボル) と理論曲線 (実線) [4].

その主な原因は、N 電極スピン拡散長が長い ($\lambda_{Cu} \sim 1000\text{nm}$) のに対して、強磁性電極のス

ピン拡散長が極端に短い ($\lambda_{py} \sim 5\text{nm}$) ことに起因している。このように **Py** や **FeCo** などの強磁性遷移金属と **Cu** や **Al** などの非磁性金属からなるスピン注入素子では、接合界面にトンネル障壁を挿入することにより、スピン蓄積およびスピン検出の効率が最適化されることが明らかになった。 これらの結果は、図 2 (b) に示すように、トンネル接合素子と金属接触素子の実験結果をよく説明することが分かった。

(1-c) 非局所スピン注入による磁化反転 [4-6]

非局所スピン注入法を用いると、非磁性体(N)中に電荷流の伴わない純粋スピン流を生成することができる。第2の強磁性電極(F2)として**Py**や**CoFe**などのスピン拡散長の極端に短い強磁性体を用い、かつ界面を金属接触にすると、F2はスピン流に対して強力な吸収体(sink)として働く。その結果、N中を流れるスピン流のほぼすべてがF2に吸収され、F2にスピントルクが働く。F2電極を微細化すれば、F2に吸収されるスピン流の密度を大きくすることができるので、非局所スピン注入による磁化反転が期待される(図3)。有限要素法を用いた数値シミュレーションの結果、**100 μA** の電流注入に対して、微小なF2に注入される純粋スピン流密度は**10⁶ A/cm²**程度となることが明らかになった。非局所スピン注入により磁化反転素子の開発が十分可能であることが示された。

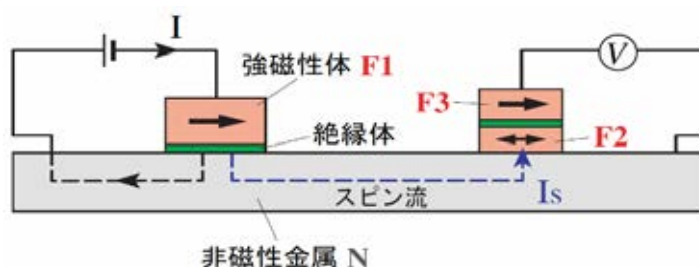


図3. スピン流による非局所磁気メモリ

(1-d) 非局所スピンホール効果とスピン軌道相互作用 [4,5,7]

金属の不純物によるスピン軌道相互作用の強さを評価する方法を提案した。非局所スピン注入・検出法を用いると、**Al**、**Cu**、**Ag**などの非磁性金属のスピン拡散長が実験的に求められる。スピン拡散長は、伝導電子の不純物によるスピン軌道散乱の強さによって支配される。非磁性体のスピン拡散長 λ_N 、抵抗率 ρ_N 、スピン軌道相互作用の結合定数(η_{so})の間に普遍的な関係式 $\lambda_N \rho_N \approx 4(R_K/k_F^2)/\eta_{so}$ が成り立つことを見出した。ここに、 R_K は量子抵抗、 η_{so} はスピン軌道相互作用の結合定数、 k_F はフェルミ波数である。この関係式はスピン軌道相互作用の結合定数を評価する有力な方法を与える。**Al**、**Cu**、**Ag**に対して得られている $\lambda_N \rho_N$ の実験値を用いると、これらの電極におけるスピン軌道相互作用の結合定数の大きさがそれぞれ、 $\eta_{so} \sim 0.01$ (**Al**)、 0.03 (**Cu**)、 0.07 (**Ag**)と見積もられる。これらの値を用いると、金属におけるスピンホール伝導度の大きさも評価できることが分かった。非局所スピン注入法を用いると、非磁性体中に純粋なスピン流が発生する。この純粋スピン流は、スピン軌道散乱(スキュー散乱とサイド跳躍)によって、 η_{so} とスピン流の大きさに比例した異常ホール効果を引き起こす。図4は当グループが提案した非局所スピンホール素子である。上記のスピン軌道相互作用の結合定数の値を用いると、非局所ホール抵抗の値は**0.1m Ω** 程度と見積もられる。**Al**や**Cu**を用いた非局所スピンホール素子を作成すれば、非局所スピンホール効果の測定が充分可能である。非局所スピンホール効果は純粋スピン流の存在を直接証明する有力な手段であることを指摘した。

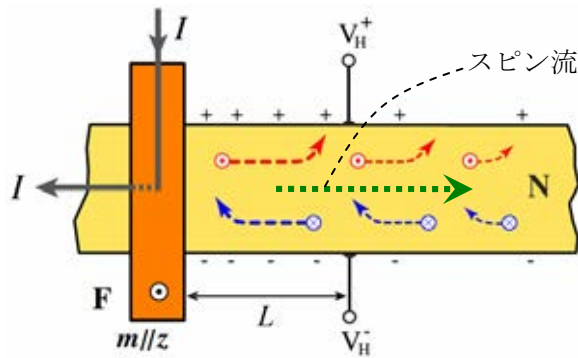


図4 非局所スピンホール素子

(2) 研究成果の今後期待される効果

非局所スピン注入型の複合ナノ構造素子におけるスピン依存伝導の基礎理論を構築した。非局所スピン流による微小磁性体の磁化反転ならびにスピンホール効果の観測可能を理論的に示した。最近、これらの理論的予測がいずれも実験的に観測されている。これらの研究成果は将来のナノスピントロニクスで重要になると予想され、それを理論的に予測した意義は大きい。

[本成果の主要論文等]

- [1] S. Maekawa (Eds.), *Concepts in Spin Electronics*, (Oxford University Press, Oxford, 2006).
- [2] S. Maekawa, *J. Magn. Magn. Mater.* **272-276**, e1459 (2004).
- [3] S. Takahashi and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **67**, 052409 (2003).
- [4] S. Takahashi and S. Maekawa, *Physica C* **437-438**, 309 (2006).
- [5] S. Takahashi, H. Imamura, and S. Maekawa, Chapter 8 in *Concepts in Spin Electronics*, (Oxford University Press, Oxford, 2006) pp.343-370.
- [6] 前川禎通、猪俣浩一郎、高橋三郎、特許第 3818276 号。
- [7] 高橋三郎、前川禎通、スピン注入・蓄積、「スピンエレクトロニクスの基礎と最前線」
監修：猪俣浩一郎（シーエムシー出版、2004）pp.28-36.

4 研究参加者

≪2(2)の研究グループ別に、研究参加者を漏れなく記載してください。≫

①猪俣グループ

ハーフメタルの開発に関する研究
反平行結合素子の磁化反転に関する研究
スピン注入磁化反転に関する研究
スピン共鳴トンネル効果素子に関する研究開発

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
猪俣 浩一郎	物質・材料研究機構	フェロー、 東北大学(兼)	研究総括、解析	H13.12～H18.10
手束 展規	東北大学大学院工学研究科	助手	ハーフメタルの開発 反平行結合素子	H13.12～H18.10
新関 智彦	東北大学大学院工学研究科	CREST 研究員	強磁性二重トンネル素子	H18.4～H18.10
岩渕 美奈子	東北大学大学院工学研究科	CREST チーム事務員	研究チーム事務処理	H16.11～H18.10
後藤 龍太	東北大学大学院工学研究科	研究補助員	ハーフメタルの開発	H18.4～H18.10
廣畑 貴文	東北大学大学院工学研究科	CREST 研究員	ハーフメタルの開発	H15.4～H17.3
YONG JIANG	東北大学大学院工学研究科	CREST 研究員	スピン注入磁化反転	H14.9～H16.8
落合 隆夫	東北大学大学院工学研究科	研究補助員	スピン注入磁化反転	H16.5～H17.3
野崎 隆行	東北大学大学院工学研究科	研究補助員	強磁性二重トンネル素子	H15.4～H16.3
岡村 進	東北大学大学院工学研究科	研究補助員	ハーフメタルの開発	H15.4～H16.3 H16.5～H17.3
介川 裕章	東北大学大学院工学研究科	研究補助員	スピン注入磁化反転	H16.11～H18.3
CHAN VISAL	東北大学大学院工学研究科	研究補助員	ハーフメタルの開発	H17.10～H18.2
菊地 麻樹	東北大学大学院工学研究科	研究生	ハーフメタルの開発	H17.4～H17.9
二田 亜弥	東北大学大学院工学研究科	CREST チーム事務員	研究チーム事務処理	H15.6～H16.11
山下 はづき	東北大学大学院工学研究科	CREST チーム事務員	研究チーム事務処理	H13.12～H15.5

②高梨グループ

クーロンブロックードを利用したスピン単一電子素子開発に関する研究

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
高梨 弘毅	東北大学 金属材料研究所	教授	グループ内研究総括、 TMR 測定と解析	H13.12～H18.10
三谷 誠司	東北大学 金属材料研究所	助教授	自己形成磁性ドット作成、 測定系の開発	H13.12～H18.10
薬師寺 啓	東北大学 金属材料研究所	CREST 研究員 助手	TMR 測定用素子構造の作製	H14.4～H14.12 H15.1～H18.6
FRACNK ERNULT	東北大学 金属材料研究所	CREST 研究員	自己形成ナノドット作製	H17.1～H18.6
藤森 啓安	電気磁気材料研究所	研究総括	最適素子構造の設計	H13.12～H18.10
小林 伸聖	電気磁気材料研究所	研究員	TMR 測定用素子構造の作製	H15.4～H18.10
前川 禎通	東北大学 金属材料研究所	教授	TMR の電圧制御理論	H13.12～H15.3
嶋 敏之	東北大学 金属材料研究所	助手	微細加工による磁性ドット作製	H13.12～H16.3
渡辺 雅人	電気磁気材料研究所	主任研究員	磁性コロイド粒子作製	H15.4～H17.3
大沼 繁弘	電気磁気材料研究所	主任研究員	リソグラフィ技術の開発	H13.12～H16.3

③前川グループ

クーロンブロックードを利用したスピン単一電子素子開発に関する研究
非局所スピン注入に関する理論的研究

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
前川 禎通	東北大学 金属材料研究所	教授	スピン注入デバイスの理論構築	H15.4～H18.10

高橋 三郎	東北大学 金属材料研究所	助手	スピン注入デバイスのシミュレーション	H15.4~H18.10
小椎八重 航	東北大学 金属材料研究所	助教授	スピン注入デバイス用物質探索	H16.4~H18.10
山下 太郎	東北大学 金属材料研究所	大学院生	磁性体/超伝導体ハイブリッドデバイスの理論構築	H16.4~H18.3
谷川 和男	東北大学 金属材料研究所	大学院生	ジョセフソンデバイスへのスピン注入理論構築	H16.4~H18.3

④ 齊藤グループ

自己差動読み出し・スピン注入書込み技術の開発に関する研究
スピン注入磁化反転に関する研究

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
齊藤 好昭	㈱東芝 研究センター	主任研究員	自己差動検出メモリ素子の設計	H15.4~H18.10
杉山 英行	㈱東芝 研究センター	研究主務	自己差動検出メモ素子開発	H15.4~H18.10
井口 智明	㈱東芝 研究センター	研究主事	自己差動検出メモ素子開発	H17.4~H18.10
中山 昌彦	㈱東芝 研究センター	研究主事	自己差動検出メモ素子試作	H15.7~H16.3

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Ewa Jedryka (ポーランド化学アカデミー・物理研究所・助教授)	猪俣チーム第三回研究会にて試料の測定結果を報告及び今後の研究推進の為に情報交換を行う為。	ホテル瑞鳳	H15. 3. 4- H15. 3. 9
Jean-Marie George (パリ南大学・ドクター)	NonoMag2003 にて招待講演及びスピントロニクスに関する技術討論を行う為。	Miel Parugue Nagoya, Symposium Hall Univ. Guest House	H15. 11. 23- H15. 11. 29
Jiang Yong (北京科技大学・教授)	第 28 回日本応用磁気学会学術講演会にて招待講演及びスピントロニクスに関する研究討論を行う為。	ホテルルートイン那覇泉崎	H16. 9. 22- H16. 9. 25
Marek Wojcik (ポーランド化学アカデミー・Assistant Professor)	トンネル磁気抵抗研究結果について議論及び講演を行う為。	仙台市内ホテル	H18. 8. 13- H18. 8. 20

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 18 件、国際誌 90 件)

・H14 年度(2002 年)

(1)N. Tezuka, E. Kitagawa, K. Inomata, S. Sugimoto, N. Kikuchi, Y. Shimada, Switching field behavior in antiparallely coupled sub-micrometer scale magnetic elements, J. Magn. Magn. Mater, 240, 294-296 (2002).

(2)K. Inomata and N. Tezuka, Present and Future of MRAM Technology, Proc. of 21st Electronic Materials Symposium, 93-96 (2002).

(3)K. Inomata, T. Nozaki, N. Tezuka and S. Sugimoto, Magnetic switching field and giant magnetoresistance effect of multilayers with

synthetic antiferromagnet free layers,
Appl. Phys. Lett, 81, 2, 310-312 (2002).

(4)野崎隆行、阿部慎也、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
反平行結合フリー層を用いた GMR スピンバルブ膜の磁化反転特性、
日本金属学会誌、66, 11, 1078-1082 (2002)

(5)N. Tezuka, N. Koike, K. Inomata and S. Sugimoto,
Single domain observation for synthetic antiferromagnetically coupled bits with low aspect ratios,
Appl. Phys. Lett, 82, 4, 604-606 (2002).

(6)S. Mitani, T. Moriyama and K. Takanashi,
Structure and tunnel magnetoresistance in Fe/MgF₂/Co junctions with an oxide seed layer on
an Fe bottom electrode,
J. Appl. Phys, 91, 10, 7200-7202 (2002).

(7)K. Yakushiji, S. Mitani and K. Takanashi, H. Fujimori,
Tunnel magnetoresistance oscillations in current perpendicular to plane geometry of CoAlO granular
thin films,
J. Appl. Phys, 91, 10, 7038-7040 (2002).

(8)K. Yakushiji, S. Mitani, K. Takanashi and H. Fujimori,
Tunnel magnetoresistance oscillations associated with Coulomb staircases in
insulating granular systems,
J. Phys. D: Appl. Phys, 35, 2422-2426 (2002).

(9)T. Shima, T. Moriguchi, S. Mitani, K. Takanashi, H. Ito and S. Ishio,
Perpendicular Magnetic Anisotropy and Domain Structure of L1₀-Ordered FePt Films
Fabricated by Monatomic Layer Control,
IEEE Trans. Magn, 38, 5, 2791-2793 (2002).

(10)Shiori Kaji, Gendo Oomi, Fuminori Honda, Seiji Mitani and Koki Takanashi,
Temperature dependence of the electrical resistivity in insulating granular films under high
pressure,
Trans. Magn. Soc. Japan, 2, 53-55 (2002).

(11)小池伸幸、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
微細反平行結合素子の磁化状態とスピン反転磁場、
日本応用磁気学会誌 27, 316-319 (2003).

(12)落合隆夫、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、斉藤好昭、
ピン層に CoFe/CoFeO_x/CoFe を用いた強磁性トンネル接合の耐熱性の改善、
日本応用磁気学会誌、27, 307-310 (2003).

(13)西村和正、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
Zn_xFe_{3-x}O₄ 薄膜の構造および磁気・電気特性、
日本応用磁気学会誌、27, 340-343 (2003).

(14)K. Inomata, N. Koike, T. Nozaki, S. Abe, N. Tezuka,
Size-independent spin switching field using synthetic antiferromagnets,
Appl. Phys. Lett, 82, 16, 2667-2669 (2003).

(15)Koichiro INOMATA, Susumu OKAMURA, Ryota GOTO and Nobuki TEZUKA,
Large Tunneling Magnetoresistance at Room Temperature Using a Heusler Alloy with
the B2 Structure,
Jpn. J. Appl Phys, 42, 419-422 (2003).

(16)N. Tezuka, N. Koike, K. Inomata and S. Sugimoto,
Magnetization reversal and domain structure of antiferromagnetically coupled submicron elements,
J. App. Phys, 93(10) 7441- 7443(2003).

(17)N. Tanaka, J. Yamazaki, S. Mitani and K. Takanashi,
High-angle annular dark-field scanning transmission electron microscopy and
electron energy-loss spectroscopy of nano-granular Co-Al-O alloys,
Scripta Materialia, 48, 909-914 (2003).

(18)S. Takahashi, T. Yamashita, H. Imamura and S. Maekawa,
Spin-relaxation and magnetoresistance in FM/SC/FM tunnel junctions,
J. Mag. Mag. Mat. 240, 1-3, 100-102 (2002).

(19)Jan Martinek, Józef Barnas, Sadamichi Maeakwa, Herbert Schoeller and Gerd Schön,
Spin accumulation and cotunneling effects in ferromagnetic single-electron transistors,
J. Mag. Mag. Mat. 240, 1-3, 143-145 (2002).

(20)Jan Martinek, Józef Barnas, Sadamichi Maeakwa, Herbert Schoeller and Gerd Schön,
Spin accumulation in ferromagnetic single-electron transistors in the cotunneling regime,
Phys. Rev. B 66, 014402 (5) (2002).

(21)S. Takahashi and S. Maekawa,
Spin injection and detection in magnetic nanostructures,
Phys. Rev. B 67, 052409 (4) (2003).

・ H15 年度(2003 年度)

(22)T. Ochiai, N. Tezuka, K. Inomata, S. Sugimoto and Y. Saito,
Improved Thermal Stability of Ferromagnetic Tunnel Junctions With a
CoFe/CoFeO_x/CoFe Pinned Layer,
IEEE Trans. Magn. Vol.39, No.5, 2797-2799 (2003).

(23)Y. Jiang, S. Abe, T.Nozaki, N.Tezuka and K.Inomata,
Enhancement of current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance
by synthetic antiferromagnet free layers in single spin-valve films,
Appl. Phys. Lett. 83, 14, 2874-2876 (2003).

(24)手束展規、猪俣浩一郎、
低電力スピントリニクス技術—最近の研究動向と強い反平行結合素子の提案—、
日本応用磁気学会誌, Vol.27, No.11, 1053-1061 (2003).

(25)Y. Jiang, S. Abe, T.Nozaki, N.Tezuka and K.Inomata,
Perpendicular giant magnetoresistance and magnetic switching properties of a
single spin valve with a synthetic antiferromagnet as a free layer,
Phys. Rev. B 68, 224426-1-224426-7 (2003).

(26)S.Mitani, T.Moriyama and K.Takanashi,
Fe/MgO/FeCo(100) epitaxial magnetic tunnel junctions prepared by using in situ plasma oxidation,
J. Appl. Phys. 93, 10, 8041-8043 (2003).

(27)S.Kaji, G.Oomi, S.Mitani, S.Takahashi, K.Takanashi and S.Maekawa,
Pressure enhanced tunnel magnetoresistance in Co-Al-O granular films,
Phys. Rev. B 68, 054429-1-5, (2003).

(28)F.Ernult, S.Mitani, Y.Nagano and K.Takanashi,
Preparation of nanometer-scale iron dots on insulating layer,
Sci. Tech. Adv. Mater. 4, 383-389 (2003).

- (29) J. Martinek, Y. Utsumi, H. Imamura, J. Barnas, S. Maekawa, J. König, and G. Schön, Kondo effect in quantum dots coupled to ferromagnetic leads, *Phys. Rev. Lett.* 91, 127203 (2003).
- (30) J. Martinek, J. Barnas, A. Fert, S. Maekawa, and G. Schön, Transport in magnetic nanostructures in the presence of Coulomb interaction, *J. Appl. Phys.* 93, 8265 (2003).
- (31) T. Yamashita, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Andreev reflection in ferromagnet/superconductor/ferromagnet double junction systems, *Phys. Rev. B* 67, 094515 (2003).
- (32) S. Takahashi and S. Maekawa, Spin current induced Hall effect in superconductors, *Physica B* 329-333, 1263 (2003).
- (33) T. Yamashita, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Andreev reflection in ferromagnet/superconductor/ferromagnet structures, *Physica E* 18, 52 (2003).
- (34) J. Martinek, Y. Utsumi, H. Imamura, J. Barnas, S. Maekawa, and G. Schön, Kondo effect in quantum dots coupled to ferromagnetic electrodes, *Physica E* 18, 75 (2003).
- (35) J. Martinek, J. Barnas, S. Maekawa, H. Schoeller, and G. Schön, Spin accumulation in ferromagnetic single-electron transistors, *Physica E* 18, 54 (2003).
- (36) J. Martinek, J. Barnas, G. Schön, S. Takahashi, and S. Maekawa, Nonequilibrium spin fluctuations in nonmagnetic single-electron transistors and quantum dots, *J. Supercond.* 16, 343 (2003).
- (37) T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa, Crossed Andreev reflection in structures consisting of a superconductor with ferromagnetic leads, *Phys. Rev. B* 68, 0174504 (2003).
- (38) 西村和正、手束展規、杉本論、猪俣浩一郎、 $\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_{2.6}\text{O}_4$ 薄膜を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果、*日本金属学会誌* 68, 2, 82-85 (2004).
- (39) 岡村進、後藤龍太、手束展規、杉本論、猪俣浩一郎、 $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ フルホイスラー合金の構造と磁気・伝導特性、*日本金属学会誌* 68, 2, 114-117 (2004).
- (40) 介川裕章、手束展規、猪俣浩一郎、杉本論、スピン二重トンネル接合の磁気抵抗効果、*日本金属学会誌* 68, 2, 74-77 (2004).
- (41) 岡村進、後藤龍太、手束展規、杉本論、猪俣浩一郎、 $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ フルホイスラー合金を用いた MTJ の磁気抵抗効果、*日本応用磁気学会誌*, 28, 2, 172-175 (2004).
- (42) T. Nozaki, Y. Jiang, H. Sukegawa, N. Tezuka, A. Hirohata and K. Inomata, S. Sugimoto, Magnetic switching properties of magnetic tunnel junctions using a synthetic ferrimagnet free layer, *J. Appl. Phys.* Vol. 95, No. 7, 3745-3748 (2004).

- (43)Y. Jiang, S. Abe, T. Ochiai, T.Nozaki, A. Hirohata, N. Tezuka and K. Inomata, Effective Reduction of Critical Current for Current-Induced Magnetization Switching by a Ru Layer Insertion in an Exchange-Biased Spin-Valve, Phys. Rev. Lett. No.92, Vol.16, 167204-1-167204-4 (2004).
- (44)Y. Jiang, T. Nozaki, S. Abe, T. Ochiai, A. Hirohata, N. Tezuka and K. Inomata, Substantial reduction of critical current for magnetization switching in an exchange-biased spin valve, Nature Materials 3, 361-364, (2004).
- (45)F. Ernult, K. Yamane, S. Mitani, K. Yakushiji, K. Takanashi, Y. K. Takahashi and K. Hono, Spin-dependent single-electron-tunneling effects in epitaxial Fe nanoparticles, Appl. Phys. Lett. 84, 16, 3106-3108 (2004)
- (46)Y. Saito, M. Amano, K. Nishiyama, Y. Asao, K. Tsuchida and S. Tahara, Long-Time Annealing and Activation Energy of the Interdiffusion at $\text{Al}_x\text{O}_y/\text{Co-Fe/Ir-Mn}$ Interfaces, Jpn. J. Appl. Phys., 43(5A), 2484-2488(2004).
- ・ H16 年度(2004 年度)
- (47)Y. Jiang, S. Abe, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata, Influence of Synthetic Antiferromagnet Free Layer on Current-Perpendicular-to -Plane Spin-Valves, IEEE Trans. Magn., 40(4), 2245-2247(2004).
- (48)K. Inomata and N. Tezuka, S. Okamura and K. Kurebayashi, A. Hirohata, Magnetoresistance in tunnel junctions using $\text{CO}_2(\text{Cr, Fe})\text{Al}$ full Heusler alloys, J. Appl. Phys. 95(11) Part2 7234-3236(2004).
- (49)K. Inomata, S. Okamura and N. Tezuka, Tunnel magnetoresistance using full-Heusler alloys, J. Magn. Magn. Mat. 282, 269-274(2004).
- (50)Y. Jiang, S. Abe, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata, Enhanced Current-perpendicular-to-plane Giant Magnetoresistance in Single Spin-valve with Synthetic Antiferromagnet Free layers, Transactions of the Materials Research Society of Japan 29(4) 1531-1533(2004).
- (51)S. Okamura, R. Goto, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata, Structural, magnetic and transport properties of full-Heusler alloy $\text{CO}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ thin films, J. Appl. Phys., 96(11) 6561-6564(2004).
- (52)阿部慎也、山口正彦、手束展規、猪俣浩一郎、
極薄 Ru キャップ層を用いたスピントラップ素子の CPP-GMR 特性、
日本応用磁気学会誌、28、987-990(2004)。
- (53)T. Moriyama, S. Mitani, T. Seki, T. Shima, K. Takanashi, A. Sakuma, Magnetic tunnel junctions with $L1_0$ -ordered FePt alloy electrodes, J. Appl. Phys., 95(11) 6589-6791(2004).
- (54)S. Kaji, G. Oomi, S. Mitani, K. Takanashi, Effect of pressure on the tunnel magnetoresistance of Co-Al-O granular films, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 272-276, 1829-1830(2004).
- (55)K. Yamane, K. Yakushiji, F. Ernult, M. Matsuura, S. Mitani, K. Takanashi, H. Fujimori, Inverse tunnel magnetoresistance associated with Coulomb staircases in micro-fabricated granular systems, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 272-276, e1091-e1093(2004).

- (56) S. Maekawa,
Spin-dependent transport in magnetic nanostructures,
J. Magn. Magn. Mater., 272-276, e1459 (2004).
- (57) S. Takahashi and S. Maekawa,
Spin injection and detection in F/N/F and F/S/F nanostructures,
J. Magn. Magn. Mater., 272-276, e1423 (2004).
- (58) T. Yamashita, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Andreev reflection in ferromagnet/superconductor/ferromagnet junctions,
J. Magn. Magn. Mater. 272-276, e1523 (2004).
- (59) M. Ichimura, S. Takahashi, K. Ito, and S. Maekawa,
Geometrical effect on spin current in magnetic nanostructures,
J. Appl. Phys. 95, 7255 (2004).
- (60) G. Khaliullin, W. Koshibae, and S. Maekawa,
Low energy electronic states and triplet pairing in layered Cobaltate,
Phys. Rev. Lett. 93, 176401 (2004).
- (61) H. Sukegawa, S. Nakamura, A. Hirohata, N. Tezuka and K. Inomata,
Significant magnetoresistance enhancement due to a co-tunneling process in a double tunnel junction with single discontinuous ferromagnetic layer insertion,
Phys. Rev. Lett., 4(6) 068304-1-068304-4(2005).
- (62) T. Nozaki, Y. Jiang, H. Sukegawa, Y. Kaneko, A. Hirohata, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata,
Spin-dependent quantum oscillations in magnetic tunnel junctions with Ru quantum well,
Phys. Rev. B, 70(17) 172401-1-172401-4(2005).
- (63) T. Nozaki, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata,
Bias voltage effect on tunnel magnetoresistance in fully epitaxial MgO double-barrier magnetic tunnel junctions,
Appl. Phys. Lett., 86 082501-1-082501-3(2005).
- (64) 廣畑貴文、紅林秀和、岡村進、菊地麻樹、正木達章、野崎隆行、手束展規、猪俣浩一郎、
L2構造を有する $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ 薄膜の結晶構造と磁気特性、
日本応用磁気学会誌、29、124-127(2005)。
- (65) 介川裕章、中村新一、廣畑貴文、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
強磁性ナノドット層を有する二重トンネル接合における TMR の増大、
日本応用磁気学会誌、29、274-277(2005)。
- (66) Kay Yakushiji, Franck Ernult, Hiroshi Imamura, Kazutaka Yamane,
Seiji Mitani, Koki Takanashi, Saburo Takahashi, Sadamichi Maekawa, Hiroyasu Fujimori,
Enhanced Spin Accumulation and Novel Magnetotransport in Nanoparticles,
Nature Materials 4, 57-61 (2005).
- ・ H17 年度 (2005 年)
- (67) 菊地麻樹、正木達章、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 Co_2CrGa フルホイスラー合金薄膜の結晶構造と磁気・電気伝導特性、
日本応用磁気学会誌、29、274-277(2005)。
- (68) N. Tezuka, S. Abe, Y. Jiang, K. Inomata,
CPP-GMR enhancement in spin valves using a thin Ru Layer,
J. Magn. Magn. Mat. 1150-1153(2005).

- (69) A. Hirohata, H. Kurebayashi, S. Okamura, M. Kikuchi, T. Masaki, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata,
Structural and magnetic properties of epitaxial $L2_1$ -structured $\text{Co}_2(\text{Cr, Fe})\text{Al}$ films grown on GaAs(001) substrates,
J. Appl. Phys. 97(11) 103714-1-103714-8(2005).
- (70) A. Hirohata, H. Kurebayashi, S. Okamura, T. Masaki, T. Nozaki, M. Kikuchi, N. Tezuka, K. Inomata, J. S. Claydon and Y. B. Xu,
Magnetic properties of epitaxial $L2_1$ -structured $\text{Co}_2(\text{Cr, Fe})\text{Al}$ thin films on GaAs(001) substrates,
J. Appl. Phys. 97, 10C308-1-10C308-3(2005).
- (71) Y. Jiang, G. H. Yu, Y. B. Wang, J. Teng, T. Ochiai, N. Tezuka, K. Inomata,
Spin transfer in antisymmetric exchange-biased spin-valves,
Appl. Phys. Lett., 86 192515-1-192515-3 (2005).
- (72) S. Okamura, A. Miyazaki, S. Sugimoto, N. Tezuka, and K. Inomata,
Large tunnel magnetoresistance at room temperature with a Co_2FeAl full-Heusler alloy electrode,
Appl. Phys. Lett., 86(23) 232503-1-232503-3 (2005).
- (73) T. Ochiai, Y. Jiang, A. Hirohata, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata,
Distinctive current-induced magnetization switching in a current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance nanopillar with a synthetic antiferromagnet free Layer,
Appl. Phys. Lett., 86(24) 242506-1-1242506-3(2005).
- (74) H. Sukegawa, A. Hirohata, S. Nakamura, N. Tezuka, S. Sugimoto, K. Inomata,
Magnetic Transport Mechanism in Double Ferromagnetic Tunnel Junctions with Two- Dimensional Ferromagnetic Particles,
IEEE Trans. Magn., 41(10)2679-2681(2005).
- (75) A. Hirohata, H. Kurebayashi, S. Okamura, N. Tezuka and K. Inomata,
Magnetic Properties of Epitaxial $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ Full Alloy Thin Films With the $L2_1$ Structure,
IEEE Trans. Magn., 41(10)2802-2804(2005).
- (76) F. Ernult, S. Mitani, K. Takanashi, Y.K. Takahashi, K. Hono, Y. Takahashi and E. Matsubara
Self-alignment of Fe nanoparticles on a tunnel barrier,
Appl. Phys. Lett., 87 033115-1-033115-3(2005).
- (77) S. Mitani, K. Tsukamoto, T. Seki, T. Shima and K. Takanashi,
Fabrication and characterization of $L10$ -ordered $\text{FePt}/\text{AlO}/\text{FeCo}$ magnetic tunnel junctions,
IEEE Trans. Magn. 41, 2606-2608 (2005).
- (78) S. Kaji, G. Oomi, H. Hedo, Y. Uwatoko, S. Mitani, K. Takanashi, S. Takahashi and S. Maekawa,
Electrical transport and magnetoresistance in Co-Al-O granular films under high pressure,
J. Phys. Soc. Jpn. 74, 2783-2790 (2005).
- (79) S. E. Barnes and S. Maekawa,
Current-spin coupling for ferromagnetic domain walls in fine wires,
Phys. Rev. Lett. 95, 107204 (2005).
- (80) T. Yamashita, K. Tanikawa, S. Takahashi and S. Maekawa,
Superconducting π qubit with a ferromagnetic Josephson junction,
Phys. Rev. Lett. 95, 097001 (2005).
- (81) N. Bulut, W. Koshibae, and S. Maekawa,
Magnetic correlations in the Hubbard model on triangular and Kagome lattices,
Phys. Rev. Lett. 95, 037001 (2005).

- (82) J. Martinek, M. Sindel, L. Borda, J. Barna, R. Bulla, J. König, G. Schön, S. Maekawa, and J. von Delft,
Gate-controlled spin splitting in quantum dots with ferromagnetic leads in the Kondo regime,
Phys. Rev. B 72, 121302 (2005).
- (83) Y. Utsumi, J. Martinek, G. Schön, H. Imamura, and S. Maekawa,
Nonequilibrium Kondo effect in a quantum dot coupled to ferromagnetic leads,
Phys. Rev. B 71, 245116 (2005).
- (84) Y. Saito, H. Sugiyama, K. Inomata,
Thermal stability parameters in synthetic antiferromagnetic free layers in magnetic tunnel junctions,
J. Appl. Phys. 97, 10C914-1-10C914-3 (2005).
- (85) Y. Saito, H. Sugiyama, K. Inomata,
Self-differential detection using laminated magnetic tunnel junctions,
J. Appl. Phys. 97, 10P502-1-10P502-3 (2005).
- (86) S. Okamura, Aya Miyazaki, N. Tezuka, S. Sugimoto, K. Inomata,
Epitaxial Growth of Ordered $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ Full-Heusler Alloy Films on Single Crystal Substrates,
Mater. Trans., 47(1)15-19 (2006).
- (87) K. Inomata, S. Okamura, A. Miyazaki, M. Kikuchi, N. Tezuka, M. Wojcik and E. Jedryka,
Structural and magnetic properties and tunnel magnetoresistance for $\text{Co}_2(\text{Cr}, \text{Fe})\text{Al}$ and Co_2FeSi full-Heusler alloys,
J. Phys. D: Appl. Phys. 39, 816-823 (2006).
- (88) 野崎隆行、中村新一、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
ナノドット Fe 中間層を有するエピタキシャル強磁性 2 重トンネル接合に
おけるコンダクタンスの振動現象、
日本応用磁気学会誌、30、180-183 (2006)。
- (89) T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata,
Quantum Oscillation of the Tunneling Conductance in Fully Epitaxial Double Barrier Magnetic Tunnel Junctions,
Phys. Rev. Lett., 96, 027208-1-027208-4 (2006).
- H18 年度 (2006 年)
- (90) 岡村進、宮崎彩、手束展規、猪俣浩一郎、
不規則構造を有する $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ フルホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果、
電気学会論文誌 A、126(5)276-280 (2006)。
- (91) 岡村進、宮崎彩、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、高橋有紀子、宝野和博、
不規則構造を有する $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ を用いた強磁性トンネル接合の TMR 特性、
日本応用磁気学会誌、30、366-369 (2006)。
- (92) 宮崎彩、岡村進、杉本諭、手束展規、猪俣浩一郎、
MgO 基板上に作製した $\text{Co}_2\text{V}_{0.67}\text{Fe}_{0.33}\text{Al}$ 薄膜の構造と磁性およびトンネル磁気抵抗、
日本応用磁気学会誌、30、378-382 (2006)。
- (93) N. Tezuka, S. Okamura, A. Miyazaki, M. Kikuchi and K. Inomata,
Structural dependence of the tunnel magnetoresistance for magnetic tunnel junctions with a full-Heusler $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$ electrode,
J. Appl. Phys. 99, 08T314-1-08T314-3 (2006).
- (94) N. Tezuka, N. Ikeda, A. Miyazaki, S. Sugimoto, M. Kikuchi and K. Inomata,

- Tunnel magnetoresistance for junctions with epitaxial full-Heusler $\text{Co}_2\text{FeA}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ Electrodes with B2 and $L2_1$ structures, Appl. Phys. Lett., 89, 112514-1-112514-3 (2006).
- (95)Z. Gercsi, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi, K. Hono, M. Kikuchi, N. Tezuka and K. Inomata, Spin polarization of Co_2FeSi full-Heusler alloy and tunneling magnetoresistance of its magnetic tunnel junctions, Appl. Phys. Lett., 89, 082312-1-082512-3 (2006).
- (96)Y. Jiang, N. Tezuka and K. Inomata, Current driven resistance oscillation in exchange-biased spin valves with a low aspect ratio, Appl. Phys. Lett., 89, 122514-1-122514-3 (2006).
- (97)K. Yakushiji, M. Matsuura, S. Mitani, K. Takanashi, H. Fujimori, Coulomb staircase and tunnel magnetoresistance in nanowire-shaped granular films, J. Magn. Magn. Mat. E355-e358(2006).
- (98)S. Takahashi and S. Maekawa, Spin injection and transport in magnetic nanostructures, Physica C 437-438, 309 (2006).
- (99)S. Takahashi, T. Yamashita, and S. Maekawa, Quantum interference due to crossed Andreev reflection in a d-wave superconductor with two nano-contacts, J. Phys. Chem. Solid 67, 325 (2006).
- (100)T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa, Superconducting π -qubit with three Josephson junctions, Appl. Phys. Lett. 88, 132501 (2006).
- (101)T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa, Controllable π -junction with magnetic nanostructures, Phys. Rev. B 73, 144517 (2006).
- (102)T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa, Superconducting quantum bit with π -junctions, Foundations of Quantum Mechanics in the light of New Technology (ISQM-Tokyo' 05), edited by S. Ishioka and K. Fujikawa (World Scientific, 2006), pp. 84.
- (103)M. Ichimura, K. Tanikawa, S. Takahashi, G. Baskaran, and S. Maekawa, Magnetic impurity states and ferromagnetic interaction in diluted semiconductors, Foundations of Quantum Mechanics in the light of New Technology (ISQM-Tokyo' 05), edited by S. Ishioka and K. Fujikawa (World Scientific, 2006), pp. 183.
- (104)M. Ichimura, S. Takahashi, and S. Maekawa, Geometrical effect on spin current in magnetic nanostructures, Foundations of Quantum Mechanics in the light of New Technology (ISQM-Tokyo' 05), edited by S. Ishioka and K. Fujikawa (World Scientific, 2006), pp.187.
- (105)S. E. Barnes, J. Ieda, and S. Maekawa, Magnetic memory and current amplification devices using moving domain walls, Appl. Phys. Lett. 89, 122507 (2006).
- (106)Y. Saito, H. Sugiyama, T. Inokuchi, K. Inomata, Interlayer exchange coupling dependence of thermal stability parameters in synthetic antiferromagnetic free layers, J. Magn. Magn. Mat. 303, 34-38(2006).

(107) T. Inokuchi, H. Sugiyama, Y. Saito, K. Inomata,
Current-induced magnetization switching under magnetic field applied along the hard
Axis in MgO-based magnetic tunnel junctions,
Appl. Phys. Lett., 89 102502-1-102502-3 (2006).

(108) 正木達章、菊地麻樹、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、貝沼亮介、石田清仁、
L2₁構造を持つ Co₂CrGa フルホイスラー合金薄膜の作製とそれを用いた、
強磁性トンネル接合素子の TMR
日本応用磁気学会誌、30(4) 455-458 (2006).

(2) その他の著作物

・ H14 年度 (2002 年)

(1) 猪俣浩一郎

スピン量子ドットメモリ創製に向けて - ナノテクノロジーのパラダイム-
ケミカルエンジニアリング、47, 12-17 (2002).

(2) 猪俣浩一郎

MRAM の最新動向と展望

真空ジャーナル、2002 年 7 月 83 号 11-14 (2002).

(3) 猪俣浩一郎

MRAM の最新動向と展望

応用物理、71, 11, 1347-1351 (2002).

(4) 葉師寺啓、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安

磁性グラニューラ薄膜を用いた人工微小構造におけるスピン依存単電子トンネル現象
日本応用磁気学会誌、27, 3, 111-117 (2003).

(5) 高梨弘毅

ナノヘテロ金属多層膜研究の現状とスピンエレクトロニクスへの展開
日本金属学会報 (まてりあ)、41, 6, 406-409 (2002).

・ H15 年度 (2003 年度)

(6) 猪俣浩一郎

スピン量子メモリーの要素技術開発、二重トンネル素子で CB 効果確認、
テラビット級記録の手がかりに
日経先端技術、No. 41, p. 11-12 (2003).

(7) 猪俣浩一郎

Gb 級 MRAM の要素技術を開発、低電力のトンネル接合素子構造、

ハーフメタル材料で信号電圧も向上

日経先端技術、No. 43, p. 9 (2003).

(8) 猪俣浩一郎、手束展規、岡村進

フルホイスラー合金を用いたスピントンネル接合

月刊「マテリアルインテグレーション」、Vol. 16, No. 9, 1-4 (2003)

(9) 葉師寺啓、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安

スピン依存単電子トンネル現象

月刊マテリアルインテグレーション Vol. 16, No. 9, 15-22 (2003).

(10) 前川禎通、高橋三郎

スピン注入

月刊「マテリアルインテグレーション」特集スピントロニクス (1) スピン伝導 Vol. 16, (2003) pp. 29-24.

・ H16 年度 (2004 年度)

- (11)猪俣浩一郎
低電流スピン注入磁化反転
まてりあ 43(9), 770-771(2004)
- (12)猪俣浩一郎
スピントロニクス研究の現状
化学と工業 57(10), 1039(2004)
- (13)猪俣浩一郎
第1章 巨大磁気抵抗効果、第12章 ハーフメタル薄膜とTMR
「スピニエレクトロニクスの基礎と最前線」
シーエムシー出版(2004)
- (14)猪俣浩一郎
大容量不揮発性磁気メモリ(MRAM)の開発
OHM 2004年10月 P10
- (15)猪俣浩一郎
スピンメモリ創製に関する研究
TELECOM FRONTIER No. 45 p4 (2004)
- (16)S. Maekawa, T. Tohyama, S. E. Barnes, S. Ishihara, W. Koshibae, and G. Khaliullin,
Physics of Transition Metal Oxides,
Springer Series in Solid-State Sciences Vol. 144 (Springer, 2004)
- (17)高橋三郎、前川禎通
スピン注入・蓄積、「スピニエレクトロニクスの基礎と最前線」
監修：猪俣浩一郎（シーエムシー出版、2004）pp.28-36
- (18)Y. Utsumi, J. Martinek, P. Bruno, J. Barnas, and S. Maekawa,
Many-body effects in nanospintronics devices,
日本応用磁気学会誌 28 (2004) pp. 1081-1088
- (19)猪俣浩一郎
スピニエレクトロニクスの基礎と最前線
シーエムシー出版（監修・著）(2004)
- ・H17年度(2005年)
- (20)山下太郎、高橋三郎、前川禎通
強磁性パイ接合と超伝導量子ビット
固体物理、Vol. 40（アグネ技術センター、2005）pp.763-772
- (21)猪俣浩一郎
スピントロニクスの物理現象(特集：スピントロニクスーナノ領域がもたらす技術革新)
OHM 2005年4月 P41-44
- (22)猪俣浩一郎、岡村進、手束展規
ホイスラー系ハーフメタル薄膜とそのTMR特性
まてりあ 44(8), 654-660(2005)
- (23)猪俣浩一郎
不揮発性磁気メモリ MRAM
工業調査会（編・著），(2005.12)
- (24)S. E. Barnes and S. Maekawa
Chapter 7: Theory of spin-transfer torque and domain wall motion in magnetic nanostructures,
in “Concepts in Spin Electronics”, edited by S. Maekawa

(Oxford University Press, Oxford, 2006) pp.293-342.

(25)S. Takahashi, H. Imamura, and S. Maekawa,
Chapter 8: Spin injection and transport in hybrid nanostructures,
in “Concepts in Spin Electronics”, edited by S. Maekawa
(Oxford University Press, Oxford, 2006) pp.343-370.

(26)H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Chapter 9: Andreev reflection at ferromagnet/superconductor interfaces,
in “Concepts in Spin Electronics”, edited by S. Maekawa,
(Oxford University Press, Oxford, 2006) pp.371-394.

(27)中村志保、齊藤好昭、森瀬博史
スピントロニクスデバイスと磁化制御技術
東芝レビュー 61, 40-43(2006).

(28)猪俣浩一郎
スピントロニクスの最新技術動向
工業材料 54(8), 44(2006)

・H18 年度(2006 年度)

(29)猪俣浩一郎
新技術説明会 (JST 主催) , (2006. 9. 28)

(30)猪俣浩一郎
スピントロニクス研究の現状
RIST^{NEWS}, No. 42, P35-P45, (2006. 11)

(3) 学会発表 (国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演 (国内会議 23 件、国際会議 57 件)

・H13 年度(2001 年)

(1)K. Takanashi, S. Mitani, K. Yakushiji and M. Fujimori,
Spin-Dependent Single Electron Tunneling in Granular Systems,
Proc. of ICFMS, (京都リサーチパーク)2002. 3. 7

(2)猪俣浩一郎、手束展規、北川英二、
MRAM の現状と将来展望、
スピントロニクスの進展と展望シンポジウム、応用物理学会(東海大学湘南南校舎)2002. 3. 28

(3)猪俣浩一郎、手束展規、
MRAM の動作原理と課題、
応用物理学会” FeRAM vs. MRAM” シンポジウム、(東海大学湘南南校舎)2002. 3. 29

・H14 年度(2002 年)

(4)K. Inomata and N. Tezuka,
Present and Future of MRAM Technology,
Proc. of 21st Electronic Materials Symposium, 93-96 (2002) (伊豆長岡) 2002. 6. 20

(5)K. Takanashi,
Spin dependent single electron tunneling in microfabricated granular systems
Conference on the Science and Technology of Spin Transport in Nanostructure,
(Italy, The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics Trieste) 2002. 8. 21

(6)K. Inomata and N. Tezuka,
Present and Future of MRAM Technology,
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学小金井キャンパス) 2002. 9. 18

(7)猪俣浩一郎、
MRAMの最新動向と展望、
未踏・ナノデバイステクノロジー第151委員会 第62回研究会資料、(東京・九段会館) 2002.10.11

(8)猪俣浩一郎、
スピントロニクス研究の展望、
日本応用磁気学会第126回研究会、(東京・機械振興会館) 2002.11.22

(9)猪俣浩一郎、
不揮発性メモリ(MRAM)の高速・大容量化に関する研究-スピントロニクス反転磁場低減法-、
半導体スピントロニクス研究会、(KKRホテル東京) 2003.1.27

(10)K. Takanashi, S. Mitani, K. Yakushiji and H. Fujimori,
Spin-Dependent Single Electron Tunneling in Granular Systems
COE International Workshop on Physics of Confined Electron Systems,
(大阪大学 豊中キャンパス) 2003.2.20

(11)K. Inomata, N. Koike, T. Nozaki, S. Abe and N. Tezuka,
Size-independent spin switching field using a synthetic ferrimagnet,
NEDO 国際、(the Netherlands, The campus of the University of Twente) 2003.3.16

・H15年度(2003年度)

(12)猪俣浩一郎、
反平行結合フリー層の磁化反転挙動、
日本応用磁気学会ナノマグネティクス専門研究会(渋谷ネクサス), 2003.4.25

(13)猪俣浩一郎、
スピントロニクス、
未踏科学技術協会「21世紀の磁性材料の基礎と展望」(化学会館), 2003.5.9

(14)前川禎通、高橋三郎、
スピントロニクス、
産総研ワークショップ「スピントロニクスの新しい潮流」(産業技術総合研究所) 2003.6.4

(15)K. Inomata,
Spintronics,
2003 Summer Conference of the Korean Magnetism Society and Japan-Korea Symposium
on Spintronics and its Applications (Yonsei University, Seoul), 2003.6.19

(16)S. Maekawa,
Spin-dependent transport in magnetic nanostructures (Plenary talk),
The International Conference on Magnetism (Rome, Italy), 2003.7.3

(17)猪俣浩一郎、
ホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合のTMR、
新機能素子シンポジウム(経団連会館) 2003.10.9

(18)猪俣浩一郎、
ホイスラー合金およびそれを用いたスピントロニクス接合のTMR、
日本金属学会「エキゾチック金属間化合物の構造シンポジウム」(北海道大学) 2003.10.12

(19)猪俣浩一郎、
反平行結合素子を用いたスピントロニクスエンジニアリング、
応用磁気学会「磁性人工構造膜の物性と機能専門研究会」(松下電器技術館), 2003.11.7

(20)S. Takahashi and S. Maekawa,

- Spin injection and spin transport in magnetic nanostructures,
International Symposium on Advanced Magnetic Technologies (Taipei, Taiwan), 2003.11.13
- (21)S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult, K. Yamane, K. Takanashi and H. Fujimori,
Spin dependent single electron tunneling in self-assembled magnetic nanoparticles:
Effect of spin accumulation,
International Symposium on Advanced Magnetic Technologies(Taipei, Taiwan) 2003.11.13
- (22)K. Inomata,
Tunneling magnetoresistance using full-Heusler alloys,
International Symposium on Advanced Magnetic Technologies '03
(Academia Sinica, Taipei), 2003.11.15
- (23)J. Martinek, Y. Utsumi, H. Imamura, M. Sindel, S. Borda, J. Barnas, S. Maekawa, J. Konig,
G. Schon, and J. von Delft,
Kondo effect in quantum dots coupled to ferromagnetic leads,
Annual Meeting of the Research Training Network "Spintorionics" (Munche, Germany) 2003.11.21
- (24)K. Inomata,
Spin engineering using a SyAF or a Ru buffer,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics 2003,
(名古屋大学), 2003.11.25
- (25)S. Maekawa,
Spin injection in magnetic nanohybrids,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics (Nagoya, Japan), 2003.11.25
- (26)K. Takanashi, S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult and H. Fujimori,
Spin dependent single electron tunneling in self-assembled magnetic nanoparticles
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics 2003 (Nagoya, Japan) 2003.11.27
- (27)K. Takanashi, S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult and H. Fujimori,
Spin dependent single electron tunneling in self-assembled magnetic nanoparticles
International Symposium on Magnetic Materials and Applications (Daejeon, Korea) 2003.12.5
- (28)K. Takanashi,
Spin dependent single electron tunneling in self-assembled magnetic nanoparticles,
Japan-Australia Workshop (Sendai, Japan) 2004.1.16
- (29)猪俣浩一郎、岡村進、後藤龍太、手束展規、
フルホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合の TMR、
日本応用磁気学会第 134 回研究会 (東京農工大学) , 2004.1.29
- (30)前川禎通、
スピニエレクトロニクスとは: スピニ電流の概念からトランスポートまで、
日本応用磁気学会・第 134 回研究会、第 22 回磁性人工構造膜の物性と機能専門研究会 (東京農工大学)
2004.1.29
- (31)猪俣浩一郎、
MRAM の現状と展望、
半導体スピニエレクトロニクス研究会 (国際高等研究所) , 2004.2.27
- (32)猪俣浩一郎、
テラビット級超大容量不揮発性磁気メモリを目指して、
第 2 回ナノテクノロジー総合シンポジウム (東京ビッグサイト) 2004.3.17
- (33)前川禎通、

- スピン注入現象の展望、
日本物理学会・第59回年次大会（九州大学）2004.3.27
- ・H16年度(2004年)
- (34)S. Maekawa,
Non-local spin transport in magnetic nanostructures,
International Conference on Nanospintronics, Design and Realization, (Japan, Kyoto) 2004.5.26
- (35)J. Martinek, J. Barnas, S. Maekawa, J. König, J. von Delft, and G. Schön,
Transport in magnetic nanostructures in the presence of strong Coulomb interaction,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics, (Japan, Kyoto) 2004.5.26
- (36)K. Takanashi, S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult, H. Fujimori,
Spin dependent single electron tunneling in self-assembled magnetic nanoparticles,
The 3rd International Workshop on Surface, Interface, and Thin Films, (Shanghai, China) 2004.5.28
- (37)K. Inomata, Y. Jiang, T. Ochiai and N. Tezuka,
Spin-polarized current induced magnetization switching in exchange-biased
spin-valve nanostructures, Tohoku-Cambridge Forum, (University of Cambridge, UK) 2004.6.10
- (38)S. Maekawa,
Spin dependent transport in magnetic nanostructure,
Tohoku-Cambridge Forum, (Cambridge, UK) 2004.6.10-11
- (39)K. Takanashi, S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult, H. Fujimori,
Spin dependent single electron tunneling in self-assembled magnetic nanoparticles,
Tohoku-Cambridge Forum, (University of Cambridge, UK) 2004.6.11
- (40)S. Maekawa,
Electronics state and superconductivity in frustrated lattices,
Spectroscopies in Novel Superconductor, (Sitges, Spain) 2004.7.11
- (41)猪俣浩一郎、
Structural, magnetic and transport properties of half-metallic full-Heusler alloys,
(NIMS) 2004.7.22
- (42)S. Takahashi,
Spin injection and spin transport in hybrid nanostructures,
Euro-Asian Symposium: Trends in Magnetism, (Krasnoyarsk, Russia) 2004.8.26
- (43)N. Tezuka and K. Inomata,
Ru effects for magnetization switching and CPP-GMR enhancement,
7th Oxford-Kobe materials seminar: Spintronic materials and technology,
(神戸インスティテュート) 2004.9.2
- (44)Y. Jiang, T. Ochiai, T. Nozaki, A. Hirohata, N. Tezuka and K. Inomata,
Substantial Current Reduction for Spin-Injection Magnetization Switching in
Exchange-Biased Spin-Valves,
日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター) 2004.9.24
- (45)猪俣浩一郎、
ハーフメタルの研究と展望、
日本金属学会 2004 年秋期大会シンポジウム基調講演、(秋田大学) 2004.9.29
- (46)W. Koshibae and S. Maekawa,
Hall effect in CoO₂ layer with hexagonal structure,
The 4th International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and

The 3rd Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems, (Sendai) 2004.11.23

(47) S. Maekawa,
Concepts in spin electronics,
Australia-Japan Workshop on Advanced Materials, (Sydney, Australia) 2004.12.5-7

(48) Yoshiaki Saito^{1,3}, Hideyuki Sugiyama^{1,3}, Koichiro Inomata^{2,3},
(¹Toshiba Corp., ²Tohoku Univ., ³CREST-JST),
FUTURE TUNNEL MAGNETORESISTANCE TECHNOLOGY FOR
HIGH DENSITY MRAM, (OXFORD KOBE INSTITUTE SEMINOR, Kobe), 2004.9.3

(49) 前川禎通、
Spin injection in ferromagnet/superconductor junctions,
日本物理学会第59回秋季大会、(青森大学) 2004.9.13

(50) 前川禎通、
電流による磁壁移動「まとめと展望」、
日本物理学会第60回年次大会、(東京理科大学) 2005.3.27

・H17年度(2005年度)

(51) S. Mitani, K. Tsukamoto, T. Seki, T. Shima and K. Takanashi,
Magnetic tunnel junctions with a $L1_0$ ordered FePt alloy electrode,
The Program of the Workshop on Thermally Assisted MRAM and Thermo-Magnetics,
(IB-Lecture Hall, Nagoya Univ.) 2005.4.9

(52) S. Takahashi,
Spin injection and spin transport in hybrid nanostructures,
Hitachi Spintronics Workshop, (Kokubunji, Japan) 2005.4.14

(53) K. Inomata, S. Okamura, T. Nozaki, T. Ochiai, N. Tezuka,
Advanced materials and devices for spintronics,
ZhongGuanCun Forum, (Beijing, China) 2005.5.13

(54) K. Takanashi, K. Yakushij, F. Ernult, S. Mitani,
Spin-dependent single electron tunneling and spin accumulation in metallic nanoparticles,
ZhongGuanCun Forum, (Beijing, China) 2005.5.13

(55) 小権八重航、
<良く分かる！>熱電変換における強相関電子系の熱電応答の理論、
(株)技術情報協会セミナー、(東京都八王子市) 2005.5.20

(56) K. Takanashi, K. Yakushij, F. Ernult, S. Mitani and H. Fujimori,
Spin-dependent single electron tunneling and spin accumulation in metallic nanoparticles, Moscow
International Symposium on Magnetism, (M. V. Lomonosov Moscow State University, Russia) 2005.6

(57) S. Maekawa,
Non-local spin-transport in magnetic nanostructures,
2005 CERC/ERATO-SSS International Workshop on Phase Control of Correlated Electron Systems,
(Maui, USA) 2005.6.9.

(58) 猪俣浩一郎、
スピン注入と界面 —MRAM 研究を通して—、
応用物理学会 第33回薄膜・表面制御と電子構造、
(東京工業大学 大岡山キャンパス百年記念館) 2005.7.15

(59) S. Maekawa,
Spin-transfer torque and domain wall motion in magnetic nanostructures,

Croucher Advanced Study Institute—Science and Applications of Spin Electronics,
(Hong Kong, China) 2005. 8. 18

(60) K. Inomata, S. Okamura and N. Tezuka,
Large Tunnel Magnetoresistance with a Co_2FeAl Full-Heusler Alloy Electrode, TNT2005 Trends in
Nanotechnology, (Oviedo, Spain), 2005. 8. 31

(61) S. Takahashi and S. Maekawa,
Spin injection and transport in hybrid nanostructures,
IV International Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors,
(Crete, Greece), 2005. 9. 6

(62) 猪俣浩一郎、岡村進、手束展規、
ホイスラー合金系ハーフメタルの開発動向、
2005年(平成17年)秋季第65回応用物理学学会学術講演会、(徳島大学)2005. 9. 9

(63) S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult and K. Takanashi,
Spin dependent tunneling and spin accumulation in nonmagnetic nanoparticles,
International Symposium on Physics of Magnetic Materials (ISPMM)2005, (Singapore)2005. 9. 15

(64) S. Maekawa,
Spin-transfer torque, modified Landau-Lifshitz-Gilbert equation, and spin-motive-force in magnetic
nanostructures,
Spin-Dependent Transport through Nanostructures—Spintronics 05,
(Mierzecin near Poznan, Poland), 2005. 9. 26

(65) 猪俣浩一郎、野崎隆行、岡村進、宮崎彩、菊地麻紀、手束展規、
スピントロニクスの最近の進展、
日本金属学会 2005 年秋期大会、(広島大学東広島キャンパス) 2005. 9. 29

(66) K. Takanashi, K. Yakushiji, F. Ernult, S. Minani and H. Fujimori,
Spin-dependent single electron tunneling and spin accumulation in metallic nanoparticles,
International Symposium on Structure and Dynamics on the Nanometer Scale (SDNS 2005), (University
Duisburg-Essen, Duisburg, Germany)2005. 11

(67) K. Takanashi, K. Yakushiji, F. Ernult, S. Mitani and H. Fujimori,
Spin-dependent single electron tunneling and spin accumulation in metallic nanoparticles,
International Conference on Frontiers of Materials Science,
(Tohoku University, Sendai, Japan) 2005. 12

(68) S. Mitani, K. Yakushiji, F. Errnult and K. Takanashi,
Spin accumulation and tunnel magnetoresistance in nonmagnetic nanoparticles,
2nd Asian Forum on Magnetism, (Toung Pyeong, Korea) 2005. 12

(69) K. Inomata, T. Nozaki, N. Tezuka,
Quantum oscillation of the tunnel conductance and TMR effect in fully epitaxial double
Magnetic tunnel junctions,
IEEE Conference On Emerging Technologies—Nanoelectronics,
(Singapore), 2006. 1. 13

(70) S. Maekawa,
Spin-transfer torque and spin-motive-force in magnetic nanostructures,
The 1st RIEC International Workshop on Spintronics—Spin Transfer Phenomena—,
(Sendai, Japan) 2006. 2. 9

(71) S. Maekawa,
Perspective on spin momentum transfer,

Spin Currents Workshop,
(San Jose, USA) 2006. 3. 18

・ H18 年度 (2006 年)

(72) K. Inomata, T. Nozaki and N. Tezuka,
TUNNEL MAGNETORESISTANCE EFFECT OF FERROMAGNETIC
TUNNEL JUNCTIONS USING EPITAXIAL $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$ WITH $L2_1$ STRUCTURE
2006 MRS Spring Meeting, (San Francisco, USA), 2006. 4. 18

(73) 猪俣浩一郎、
MRAM 開発の現状と将来、
高柳記念未来技術フォーラム (高柳財団), 2006. 5. 16

(74) S. Maekawa,
Spin-transfer torque on domain walls in magnetic nanostructures,
11th International Ceramics Congress, (Sicily, Italy) 2006. 6. 9

(75) S. Maekawa,
Spin accumulation and spin-transfer torque on domain walls in nano-wires,
Fifth International Workshop on Surface, Interface and Thin Film Physics,
(Shanghai, China) 2006. 6. 27-30

(76) S. Maekawa,
Theory of a qubit in superconductor/ferromagnet hybrid nanostructures,
Nanoscale Superconductivity and Magnetism - NSM2006,
(Leuven, Belgium) 2006. 7. 8

(77) S. Takahashi,
Josephson current through a half-metallic ferromagnet,
Rencontres du Vietnam 2006, Nanophysics: from Fundamentals to Applications,
(Hanoi, Vietnam) 2006. 8. 9

(78) S. Takahashi,
Josephson current through strong ferromagnets,
International Workshop on Mesoscopic Superconductivity and Magnetism (MesoSuperMag 2006),
(Chicago, USA) 2006. 8. 29

(79) K. Inomata, S. Okamura, R. Goto, N. Tezuka,
Tunnel magnetoresistance of magnetic tunnel junctions with half metallic ferromagnets
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Sendai, Japan), 2006. 8. 18

(80) Y. Saito, T. Inokuchi, H. Sugiyama, K. Inomata,
Hard axis magnetic field dependence on current induced magnetization switching in
MgO-based magnetic tunnel junctions,
2006 the 3rd Asia Forum on Magnetism, (Matsue, Japan) 2006. 9. 13

② 口頭発表 (国内会議 142 件、国際会議 36 件)

・ H13 年度 (2001 年)

(1) T. Shima, T. Moriguchi, S. Mitani and K. Takanashi,
Magnetic Properties and Structure of $L1_0$ Ordered FePt Alloy Film Fabricated by Alternate Monatomic
Layer Deposition,
Proc. of ICFMS, (京都リサーチパーク) 2002. 3. 7

(2) 森山貴広、三谷誠司、高梨弘毅、
 MgF_2 , MgO バリア層を有する強磁性トンネル接合の作製と磁気抵抗効果、
日本物理学会第 57 回年次大会 (立命館大学草津キャンパス) 2002. 3. 25

- (3) 名倉秀明、三谷誠司、嶋敏之、高梨弘毅、
Co/Gd 多層膜におけるねじれたスピン構造と CPP-MR、
日本物理学会第 57 回年次大会 (立命館大学草津キャンパス) 2002. 3. 25
- (4) 嶋敏之、高梨弘毅、高橋有紀子、宝野和博、
MgO 単結晶基板上に作製した FePt 規則合金膜の構造と磁気特性、
日本金属学会 2002 年春期大会 (第 130 回) (東京理科大学神楽坂校舎) 2002. 3. 28
- (5) 森口拓人、嶋敏之、三谷誠司、高梨弘毅、
単原子交互蒸着法による FePt-Au 規則合金膜の作製と磁気特性、
日本金属学会 2002 年春期大会 (第 130 回) (東京理科大学神楽坂校舎) 2002. 3. 28
- (6) 森山貴広、三谷誠司、高梨弘毅、
フッ化物絶縁層を用いた強磁性トンネル接合の作製と磁気抵抗効果、
日本金属学会 2002 年春期大会 (第 130 回) (東京理科大学神楽坂校舎) 2002. 3. 28
- (7) 大沼繁弘、大沼正人、小林伸聖、藤森啓安、増本健、
ナノグラニューラー-Co-Pd-Si-O 軟磁性膜の磁気特性と構造におよぼす熱処理の影響、
日本金属学会 2002 年春期大会 (第 130 回) (東京理科大学神楽坂校舎) 2002. 3. 28
- (8) 岡村進、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
ハーフメタルホイスラー合金薄膜 Co_2MnGe の構造と磁気特性、
日本金属学会春季講演会、(東京理科大学) 2002. 3. 29
- (9) 小池伸幸、北川英二、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
反平行結合膜の微細加工素子における磁化状態、
日本金属学会春季講演会、(東京理科大学) 2002. 3. 30
- (10) 野崎隆行、阿部慎也、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
反平行結合フリー層を用いたスピンバルブの GMR 特性、
日本金属学会春季講演会、(東京理科大学) 2002. 3. 30
- ・ H14 年度 (2002 年)
- (11) T. Shima, T. Moriguchi, S. Mitani and K. Takanashi,
LOW-TEMPERATURE FABRICATION OF L1_0 ORDERED FePt ALLOY WITH PERPENDICULAR ANISOTROPY BY ALTERNATE
MONATOMIC LAYER DEPOSITION,
Intermag Europe 2002、(the Netherlands, Amsterdam) 2002. 5. 1
- (12) K. Takanashi, T. Shima, T. Moriguchi, S. Mitani, H. Fujimori,
FABRICATION OF MAGNETIC ORDERED ALLOYS BY ALTERNATE MONATOMIC LAYER DEPOSITION
The United Engineering Foundation Conference on Nanostructured Advanced Magnetic Materials (Germany,
Irsee) 2002. 6. 12
- (13) S. Mitani, K. Takanashi, K. Yakushiji, H. Fujimori,
SPIN DEPENDENT SINGLE ELECTRON TUNNELING IN GEOMETRICALLY
RESTRICTED GRANULAR SYSTEMS
Inter-Union Materials Research Society International Conference on Electronic Materials,
(China, Xi'an) 2002. 6. 12
- (14) 手束展規、小池伸幸、猪俣浩一郎、杉本諭、
微小反平行結合素子の磁化状態、
日本物理学会 2002 年秋季大会、(中部大学) 2002. 9. 6
- (15) 森山貴広、三谷誠司、高梨弘毅、
Fe/CaF₂/Fe 接合のスピン依存伝導、
日本物理学会、(中部大学) 2002. 9. 8

- (16) 小池伸幸、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
微細反平行結合素子における磁化状態とスピン反転磁場、
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学 小金井キャンパス) 2002. 9. 17
- (17) 落合隆夫、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
ピン層に $\text{CoFe}/\text{CoFeO}_x/\text{CoFe}$ を用いた強磁性トンネル接合の熱処理特性
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学 小金井キャンパス) 2002. 9. 17
- (18) 森山貴広、三谷誠司、高梨弘毅、
単結晶 $\text{Fe}/\text{CaF}_2/\text{CoFe}$ 接合の作製と磁気抵抗効果、
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学) 2002. 9. 17
- (19) 三谷誠司、薬師寺啓、山根一陽、松浦光孝、長野靖宏、高梨弘毅、
スピン依存単一電子トンネル効果に及ぼす微小素子の局所構造の影響、
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学) 2002. 9. 17
- (20) 西村和正、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
 $\text{Zn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 薄膜の構造および磁気・電気特性、
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学小金井キャンパス) 2002. 9. 20
- (21) 山根一陽、薬師寺啓、松浦光孝、三谷誠司、高梨弘毅、
グラニューラー薄膜の組織制御とスピン依存高次トンネル過程の変化、
第 26 回日本応用磁気学会、(東京農工大学) 2002. 9. 20
- (22) 三谷誠司、森山貴広、長野靖宏、高梨弘毅、
 $\text{MgO} \cdot \text{MgF}_2$ を用いたトンネルバリアの作製と磁気抵抗効果、
日本応用物理学会、(新潟大学) 2002. 9. 25
- (23) S. Mitani, K. Takanashi, K. Yakushiji and H. Fujimori,
Enhancement and Oscillation of TMR in geometrically restricted granular systems,
NEDO Colloquium on Nanopatterned Magnetic Systems: Magnetic Structures and
Dynamical Behaviors, (France、Les Vaux de Cernay) 2002. 10. 9
- (24) 岡村進、後藤龍太、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
 Co_2MnX (X=Ge, Si) ホイスラー合金の構造と磁気・伝導特性 ν
日本金属学会秋季大会、(大阪大学 吹田キャンパス) 2002. 11. 3
- (25) 野崎隆行、阿部慎也、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、菊地伸明、島田寛、
反平行結合フリー層を適用した TMR スピンバルブ膜のスピン反転磁場特性、
日本金属学会秋季大会、(大阪大学 吹田キャンパス) 2002. 11. 3
- (26) 手束展規、小池伸幸、櫻田和孝、野崎隆行、阿部慎也、Jiang Yong、猪俣浩一郎、
反平行結合素子のスピン反転磁場の素子サイズ依存性と磁気抵抗特性 ν
第 50 回応用物理学関係連合講演会、(神奈川大学 横浜キャンパス) 2003. 3. 6
- (27) 阿部慎也、Jiang Yong、手束展規、猪俣浩一郎、
反平行結合フリー層を用いたスピンバルブ素子の CPP-GMR 特性、
日本金属学会、(千葉大学 西千葉キャンパス) 2003. 3. 27
- (28) 森山貴広、関剛斎、嶋敏之、三谷誠司、高梨弘毅、
 FePt 電極を用いた強磁性トンネル接合の作製と磁気抵抗効果、
応用物理学会、(神奈川大学) 2003. 3. 29
- (29) 長野靖宏、三谷誠司、高梨弘毅、
 MgO トンネル障壁層上の Fe 島状膜の成長と磁気伝導効果、
日本物理学会、(東北大学 川内キャンパス) 2003. 3. 29

- (30) 森山貴広、三谷誠司、高梨弘毅、
単結晶および多結晶 Fe/MgO/FeCo トンネル接合膜の作製と磁気抵抗効果、
日本物理学会、(東北大学 川内キャンパス) 2003. 3. 29
- (31) 薬師寺啓、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
EB リソグラフィによるグラニューラナノブリッジ構造の作製とその磁気伝導現象、
応用物理学会、(神奈川大学) 2003. 3. 30
- ・ H15 年度(2003 年度)
- (32) N. Tezuka, K. Sakurada, N. Koike and K. Inomata,
SINGLE DOMAIN OBSERVATION AND SPIN SWITCHING BEHAVIOR OF MICROFABRICATED SYNTHETIC ANTIFERROMAGNETS
WITH LOW ASPECT RATIOS
The 2003 IEEE International Magnetism Conference (Boston Marriott Copley Place, Boston), 2003. 4. 3
- (33) 猪俣浩一郎、岡村進、後藤龍太、手束展規、
不揮発性磁気メモリの高速大容量化に関する研究—ハーフメタルの開発に向けて—、
半導体ナノスピントロニクス平成 15 年度研究会、2003. 6. 10
- (34) M. Wojcik, E. Jedryka, S. Nadolski, S. Okamura, N. Tezuka and K. Inomata,
Structural defects in Co_2MnGe and Co_2MnSi thin films studied by NMR
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Conference Hall of the CSIC, Madrid) 2003. 7. 22
- (35) K. Yakushiji, K. Yamane, S. Mitani, K. Takanashi, F. Ernult and H. Fujimori,
Inverse TMR with Coulomb staircases in microfabricated insulating granular films,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid, Spain) 2003. 7. 22
- (36) K. Takanashi, T. Shima and T. Moriguchi,
Enhanced coercive force for L1_0 ordered FePt thin films fabricated by alternate
monatomic layer deposition on stepped Pt(001),
International Conference on Magnetism 2003 (Rome, Italy) 2003. 7. 31
- (37) 手束展規、阿部慎也、Jiang Yong、猪俣浩一郎
IrMn/CoFe/Cu/CoFe/Ru スピンバルブ CPP-GMR 素子の出力増大効果、
2003 年秋季 第 64 回応用物理学会学術連合講演会 (福岡大学七隈キャンパス) 2003. 8. 30
- (38) 手束展規、岡村進、後藤龍太、猪俣浩一郎、
 $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ 合金薄膜を電極に用いた強磁性トンネル効果、
2003 年秋季 第 64 回応用物理学会学術連合講演会 (福岡大学七隈キャンパス) 2003. 8. 30
- (39) 薬師寺啓、エルヌ フランク、松浦光孝、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
2 次元配列強磁性ドットを用いたナノブリッジ構造の作製と磁気伝導現象、
2003 年秋季 第 64 回応用物理学会学術連合講演会 (福岡大学) 2003. 8. 30
- (40) 山根一陽、薬師寺啓、Franck Ernult、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
微小 CPP 構造磁性グラニューラ薄膜のスピニ依存単一電子トンネル現象、
2003 年秋季 第 64 回応用物理学会学術連合講演会 (福岡大学) 2003. 8. 30
- (41) 阿部慎也、Jiang Yong、手束展規、猪俣浩一郎、
極薄 Ru 層を用いたスピンバルブ素子の CPP-GMR 特性、
第 27 回日本応用磁気学会学術講演会 (大阪大学吹田キャンパス) 2003. 9. 16
- (42) 岡村進、後藤龍太、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ フルホイッスラー合金を用いた MTJ の磁気抵抗効果、
第 27 回日本応用磁気学会学術講演会 (大阪大学吹田キャンパス) 2003. 9. 18
- (43) 野崎隆行、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、

- 反平行結合フリー層を有するトンネル接合素子のスピン反転挙動、
第 27 回日本応用磁気学会学術講演会（大阪大学吹田キャンパス）2003. 9. 18
- (44) 薬師寺啓、山根一陽、エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
微小 CPP 構造グラニューラー薄膜における TMR の符号反転現象、
第 27 回日本応用磁気学会（大阪大学）2003. 9. 19
- (45) エルヌ フランク、三谷誠司、山根一陽、薬師寺啓、高梨弘毅、藤森啓安、
Interplay of spin accumulation and single electron tunneling in double tunnel junctions,
第 27 回日本応用磁気学会（大阪大学）2003. 9. 19
- (46) 松浦光孝、薬師寺啓、エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、小林伸聖、藤森啓安、
10nm ギャップを有するナノブリッジ構造の作製とその磁気伝導現象、
第 27 回日本応用磁気学会（大阪大学）2003. 9. 19
- (47) 三谷誠司、エルヌ フランク、山根一陽、薬師寺啓、長野靖宏、高梨弘毅、
MgO 単結晶トンネル障壁層上における磁性ドットの作製と磁気伝導効果、
第 27 回日本応用磁気学会（大阪大学）2003. 9. 19
- (48) 高橋三郎、山下太郎、前川禎通、
d 波超伝導体との 2 点接触ナノ構造における交差アンドレーエフ反射、
日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学）2003. 9. 21
- (49) 中島健太郎、猪俣浩一郎、
強磁性ナノ粒子を介したスピン依存共鳴トンネル効果の観測、
日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学）2003. 9. 22
- (50) 市村雅彦、高橋三郎、伊藤顕知、前川禎通、
磁性ナノ構造におけるスピン電流の空間分布、
日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学）2003. 9. 22
- (51) 薬師寺啓、山根一陽、エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
微小 CPP 構造グラニューラー薄膜におけるクーロン階段と TMR の符号反転、
日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学）2003. 9. 22
- (52) 三谷誠司、エルヌ フランク、長野靖宏、高梨弘毅、
トンネル障壁層上への磁性ドットの作製とクーロンブロッケイド、
日本物理学会 2003 年秋季大会（岡山大学）2003. 9. 23
- (53) 三谷誠司、エルヌ フランク、山根一陽、薬師寺啓、長野靖宏、高梨弘毅、
単結晶トンネル障壁層上における Fe 粒子の自己形成とスピン依存伝導、
日本金属学会 2003 年秋期大会（北海道大学）2003. 10. 12
- (54) 岡村進、後藤龍太、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
Co₂Cr_{1-x}Fe_xAl フルホイスラー合金の構造と電気伝導特性」、
2003 年日本金属学会秋季大会（北海道大学）2003. 10. 13
- (55) 落合隆夫、Jiang Yong、阿部慎也、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
ナノ CPP-GMR 素子の作製とその電気伝導特性、
2003 年日本金属学会秋季大会（北海道大学）2003. 10. 13
- (56) 介川裕章、手束展規、猪俣浩一郎、杉本諭、
スピントンネル二重接合の磁気抵抗特性、
2003 年日本金属学会秋季大会（北海道大学）2003. 10. 13
- (57) 西村和正、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
MgO 基板上に作成した Zn_{0.4}Fe_{2.6}O₄ 薄膜の電気・磁気特性、

2003 年日本金属学会秋季大会 (北海道大学) 2003. 10. 13

(58) S. Mitani, T. Moriyama, T. Seki, T. Shima, K. Takanashi and A. Sakuma,
Magnetic tunnel junctions with $L1_0$ ordered FePt alloys : Correlation between TMR and
chemical ordering,
9th Joint MMM-Intermag Conference (Anaheim, USA) 2004. 1. 7

(59) F. Ernult, S. Mitani, K. Yamane, K. Yakushiji, K. Takanashi and H. Fujimori,
Preparation of self-assembled magnetic dots for single electron tunneling experiments
9th Joint MMM-Intermag Conference (Anaheim, USA) 2004. 1. 8

(60) K. Yakushiji, K. Yamane, F. Ernult, S. Mitani, K. Takanashi and H. Fujimori,
Inverse TMR in microfabricated granular systems: Effect of spin accumulation in
nano-particles,
9th Joint MMM-Intermag Conference (Anaheim, USA) 2004. 1. 9

(61) 西村和正, 手束展規, 杉本諭, 猪俣浩一郎,
 $Zn_{0.4}Fe_{2.6}O_4$ 薄膜を用いたトンネル接合の磁気抵抗効果,
マグネティックス研究会 (東北大学電気通信研究所) 2004. 1. 15

(62) 阿部慎也, Jiang Yong, 手束展規, 猪俣浩一郎,
極薄 Ru 層によるスピバルブ素子の CPP-GMR エンハンス,
マグネティックス研究会 (東北大学電気通信研究所) 2004. 1. 15

(63) J. Martinek, Y. Utsumi, H. Imamura, J. Barnas, S. Maekawa, J. Konig, and G. Schon,
Kondo effect in quantum dots coupled to ferromagnetic leads,
International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics (Atsugi, Japan) 2004. 3. 2

(64) S. Takahashi and S. Maekawa,
Crossed Andreev reflection in a d-wave superconductor with two quantum point contacts,
March Meeting of American Physical Society (Montreal, Canada), 2004. 3. 22

(65) 谷川和男, 山下太郎, 高橋三郎, 前川禎通,
強磁性体を含む複合ナノ構造におけるジョセフソン効果,
日本物理学会・第 59 回年次大会 (九州大学) 2004. 3. 27

(66) 薬師寺啓, 松浦光孝, 三谷誠司, 高梨弘毅, 藤森啓安,
グラニューナノ細線におけるスピン依存単電子トンネル現象,
日本応用物理学会 2004 年春季応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学) 2004. 3. 31

(67) 三谷誠司, エルヌフランク, 高梨弘毅,
Fe ナノ粒子の成長に及ぼす下地層の影響と単一電子トンネル効果,
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学) 2004. 3. 28

(68) 廣畑貴文, 紅林秀和, 岡村進, 手束展規, 猪俣浩一郎,
GaAs (100) 基板上に成長させた CO_2 (Cr, Fe) Al ホイスラー合金薄膜の結晶構造と磁性,
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス) 2004. 3. 28

(69) 手束展規, 西村和正, 猪俣浩一郎,
 $Zn_{0.4}Fe_{2.6}O_4$ 薄膜電極を有する強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果,
日本応用物理学会 2004 年春季応用物理学関係連合講演会 (東京工科大学) 2004. 3. 28

(70) 三谷誠司,
磁性ナノ粒子集合体の自己形成とスピン依存単電子トンネル,
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学) 2004. 3. 29

・ H16 年度 (2004 年)

- (71) 紅林秀和, 廣畑貴文, 岡村進, 手束展規, 杉本諭, 猪俣浩一郎,
GaAs(001) 基板上における $\text{Co}_2(\text{Cr, Fe})\text{Al}$ 合金薄膜の結晶構造と磁気特性,
日本金属学会 2004 年春期大会 (東京工業大学大岡山キャンパス) 2004. 4. 1
- (72) 後藤龍太, 手束展規, 杉本諭, 猪俣浩一郎,
Co フェライト薄膜の構造と磁気特性,
日本金属学会 2004 年春期大会 (東京工業大学大岡山キャンパス) 2004. 4. 1
- (73) 介川裕章, 手束展規, 猪俣浩一郎, 杉本諭, 中村新一,
強磁性ナノ粒子を介したスピン依存トンネル接合,
日本金属学会 2004 年春期大会 (東京工業大学大岡山キャンパス) 2004. 4. 1
- (74) 菊地麻樹, 正木達章, 手束展規, 杉本諭, 猪俣浩一郎,
Co-Cr-Ga ホイスラー合金薄膜の結晶構造と磁気特性,
日本金属学会 2004 年春期大会 (東京工業大学大岡山キャンパス) 2004. 4. 1
- (75) 岡村進, 宮崎彩, 手束展規, 杉本諭, 猪俣浩一郎,
 $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ スパッタ膜の構造と磁気・電気伝導特性に及ぼす熱処理効果,
日本金属学会 2004 年春期大会 (東京工業大学大岡山キャンパス) 2004. 4. 1
- (76) 櫻田和孝, 手束展規, 猪俣浩一郎, 杉本諭,
微小反平行結合フリー層を有するスピナルバルブ型強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果,
日本金属学会 2004 年春期大会 (東京工業大学大岡山キャンパス) 2004. 4. 1
- (77) K. Yakushiji, F. ERNULT, S. Mitani, K. Takanashi, H. Fujimori,
Spin Accumulation Effect On Spin-Dependent Single-Electron Tunneling In Ferromagnetic
Nanoparticles
The International Symposium on Metallic Multilayers, (Boulder, USA) 2004. 6. 10
- (78) S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult and K. Takanashi,
Spin dependent single electron tunneling and spin accumulation in self-assembled nanoparticles,
7th Oxford-Kobe materials seminar : Spintronic materials and technology,
(神戸インスティテュート) 2004. 9. 2
- (79) 手束展規, 落合隆夫, Y. Jiang, 猪俣浩一郎,
反平行結合膜フリー層のスピン注入磁化反転
2004 年 (平成 16 年) 秋季第 65 回応用物理学会学術講演会, (東北学院大学) 2004. 9. 4
- (80) 薬師寺啓, エルヌ フランク, 三谷誠司, 高梨弘毅, 藤森啓安,
種々のナノ粒子におけるスピン蓄積効果とスピン依存単電子トンネル現象,
日本応用物理学会 2004 年 (平成 16 年) 秋季講演会, (東北学院大学) 2004. 9. 4
- (81) 関剛斎, 三谷誠司, 薬師寺啓, 嶋敏之, 高梨弘毅,
FePt/Au エピタキシャル層状構造における CPP-GMR,
日本応用物理学会 2004 年 (平成 16 年) 秋季講演会, (東北学院大学) 2004. 9. 4
- (82) 廣畑貴文, 紅林秀和, 岡村進, 手束展規, 猪俣浩一郎,
GaAs(001) 基板上に成長した $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ ホイスラー合金薄膜の結晶構造と磁性,
日本物理学会 2004 年秋季大会, (青森大学) 2004. 9. 13
- (83) 山下太郎, 谷川和男, 高橋三郎, 前川禎通,
パイ接合を含む超伝導リングにおけるジョセフソン効果,
日本物理学会 2004 年秋季大会, (青森大学) 2004. 9. 13
- (84) 市村雅彦, 高橋三郎, 前川禎通,
磁性ナノ構造「非局所測定系」におけるスピン流の空間分布,
日本物理学会 2004 年秋季大会, (青森大学) 2004. 9. 13

- (85) 介川裕章、中村新一、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
強磁性ナノドット層を有する二重トンネル接合における TMR のエンハンス、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (86) 紅林秀和、廣畑貴文、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
GaAs(100) 基板上の Fe/MgO の結晶成長と磁気・電気伝導特性、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (87) J. Jiang, N. Tezuka and K. Inomata、
Thickness dependence of in-plane coercivity of FePt thin films、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (88) 野崎隆行、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
Ru スペーサー層を有する強磁性トンネル接合の量子振動効果、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (89) 落合隆夫、Yong Jiang、廣畑貴文、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
反平行結合フリー層を用いた CPP-GMR におけるスピン注入磁化反転挙動、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (90) 櫻田和孝、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
フェリ磁性結合素子の熱揺らぎ耐性、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (91) 三谷誠司、エルヌ フランク、薬師寺啓、高梨弘毅、
MgO トンネル障壁上における常磁性ナノ粒子の成長とスピン蓄積効果、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (92) エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、
MgO 単結晶トンネル障壁上における Fe ナノ粒子の自己組織化、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (93) 薬師寺啓、松浦光孝、エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
ナノ粒子集合体の細線化とスピン依存電子トンネル現象、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 21
- (94) 斉藤好昭^{1,3}、杉山英行^{1,3}、猪俣浩一郎^{2,3}、(¹東芝、²東北大工、³CREST-JST)、
反平行結合フリー層の熱擾乱耐性、第 28 回応用磁気学会学術講演会、
(沖縄コンベンションセンター) 2004. 9. 22
- (95) 杉山英行^{1,3}、斉藤好昭^{1,3}、猪俣浩一郎^{2,3}、(¹東芝、²東北大工、³CREST-JST)、
自己差動メモリ素子の作製とその検出、第 28 回応用磁気学会学術講演会、
(沖縄コンベンションセンター) 2004. 9. 22
- (96) 岡村進、宮崎彩、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
微細加工法により作製した $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}/\text{Al}-\text{O}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 接合の TMR 特性、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 23
- (97) 菊地麻樹、正木達章、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 Co_2CrGa フルホイスター合金薄膜を用いた MTJ の磁気抵抗効果、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 23
- (98) 宮崎彩、岡村進、手束展規、猪俣浩一郎、
ホイスター合金 $\text{Co}_2\text{V}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ 薄膜の構造、磁気、電気伝導特性、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 23

- (99) 正木達章、菊地麻樹、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
Co₂CrGa ホイスラー合金薄膜の結晶構造と磁気・電気伝導特性、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 23
- (100) 廣畑貴文、紅林秀和、岡村進、菊地麻樹、正木達章、野崎隆行、手束展規、
猪俣浩一郎 L₂₁ 構造を有する Co₂ (Cr, Fe)Al 薄膜の結晶構造と磁気特性
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004. 9. 23
- (101) 薬師寺啓、山根一陽、エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
ナノ粒子におけるスピン蓄積効果とトンネル磁気抵抗の符号反転現象、
日本金属学会 2004 年秋期大会、(秋田大学)2004. 9. 24
- (102) 野崎隆行、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
Ru スピン偏極量子井戸層を介したトンネル磁気抵抗効果、
日本金属学会 2004 年秋期大会、(秋田大学)2004. 9. 29
- (103) 落合隆夫、Yong Jiang、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
Ru 膜を用いた CPP-GMR におけるスピン注入磁化反転の低電流密度化、
日本金属学会 2004 年秋期大会、(秋田大学)2004. 9. 29
- (104) A. Hirohata, H. Kurebayashi, S. Okamura, M. Kikuchi, T. Masaki, T. Nozaki, N. Tezuka,
K. Inomata, J. Claydon, Y. Xu,
Structural and Magnetic Properties of Epitaxial L₂₁-Structured Co₂ (Cr, Fe)Al Films on GaAs(001),
49th Magnetism and Magnetic Materials Conference, (Jacksonville, USA), 2004. 11. 8
- (105) F. Ernult, S. Mitani, K. Takanashi,
Self-organization of Fe particles on a MgO tunnel barrier,
49th Magnetism and Magnetic Materials Conference, (Jacksonville, USA), 2004. 11. 8
- (106) T. Ochiai, N. Tezuka, Y. Jiang, A. Hirohata, S. Sugimoto, K. Inomata,
Substantial reduction of critical current density for CPP-GMR with an antisymmetric structure,
49th Magnetism and Magnetic Materials Conference, (Jacksonville, USA), 2004. 11. 10
- (107) Y. Jiang, T. Ochiai, T. Nozaki, A. Hirohata, N. Tezuka, K. Inomata,
Current-induced magnetization switching in exchange-biased spin-valves,
49th Magnetism and Magnetic Materials Conference, (Jacksonville, USA), 2004. 11. 10
- (108) Yoshiaki Saito^{1,3}, Hideyuki Sugiyama^{1,3}, Koichiro Inomata^{2,3},
(¹Toshiba Corp., ²Tohoku Univ., ³CREST-JST),
SELF-DIFFERENTIAL DETECTION IN SELF-DIFFERENTIAL ELEMENT USING LAMINATED MAGNETIC TUNNEL
JUNCTIONS,
49th Magnetism and Magnetic Materials Conference,
(Jacksonville, Florida, USA), 2004. 11. 11
- (109) Yoshiaki Saito^{1,3}, Hideyuki Sugiyama^{1,3}, Koichiro Inomata^{2,3},
(¹Toshiba Corp., ²Tohoku Univ., ³CREST-JST),
THERMAL STABILITY PARAMETERS IN SYNTHETIC ANTIFERROMAGNETIC FREE LAYERS IN MAGNETIC TUNNEL
JUNCTIONS,
49th Magnetism and Magnetic Materials Conference,
(Jacksonville, Florida, USA), 2004. 11. 11
- (110) 三谷誠司、薬師寺啓、エルヌ フランク、高梨弘毅、
Au ナノ粒子を含む強磁性 2 重トンネル接合の磁気抵抗効果とスピン蓄積、
日本物理学会 第 60 回年次大会、(東京理科大学)2005. 3
- (111) 高橋三郎、谷川和男、市村雅彦、前川禎通、G. Baskaran、
磁性半導体中の磁気不純物準位と強磁性相互作用 I、

日本物理学会第 60 回年次大会、(東京理科大学) 2005. 3. 24

(112) 谷川和男、市村雅彦、高橋三郎、前川禎通、G. Baskaran、
磁性半導体中の磁気不純物準位と強磁性相互作用 II、軌道縮退の効果、
日本物理学会第 60 回年次大会、(東京理科大学) 2005. 3. 24

(113) 廣畑貴文、紅林秀和、岡村進、手束展規、猪俣浩一郎、
エピタキシャル $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ ホイスラー合金薄膜の磁気特性、
日本物理学会 第 60 回年次大会、(東京理科大学) 2005. 3. 25

(114) 山下太郎、高橋三郎、前川禎通、
パイ接合を含む超伝導量子ビットの理論、
日本物理学会第 60 回年次大会、(東京理科大学) 2005. 3. 26

(115) 手束展規、米沢和泰、落合隆夫、J. Jiang、猪俣浩一郎、
反平行結合フリー層のスピン注入磁化反転、
2005 年 (平成 17 年) 春季第 52 回応用物理学関係連合講演会、(埼玉大学) 2005. 3. 30

(116) 三谷誠司、エルヌ フランク、薬師寺啓、高梨弘毅、
Au ナノ粒子を用いた 2 重トンネル接合の作製とスピン蓄積効果、
第 52 回応用物理学関係連合講演会、(埼玉大学) 2005. 3. 31

(117) 薬師寺啓、エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、藤森啓安、
非磁性ナノ粒子を用いたスピン依存単電子トンネル素子の作製、
第 52 回応用物理学関係連合講演会、(埼玉大学) 2005. 3. 31

(118) エルヌ フランク、三谷誠司、高梨弘毅、
スピン依存単電子トンネル素子のための微小金属粒子の作製、
第 52 回応用物理学関係連合講演会、(埼玉大学) 2005. 3. 31

・ H17 年度 (2005 年)

(119) S. Mitani, K. Tsukamoto, T. Seki, T. Shima, K. Takanashi,
Fabrication and characterization of Magnetic tunnel junctions with $L1_0$ -ordered FePt alloy electrodes,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005. 4. 6

(120) T. Seki, T. Shima, K. Yakushiji, K. Takanashi, G. Q. Li, S. Ishio,
Magnetic properties in epitaxial $L1_0$ FePt dot arrays,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005. 4. 7

(121) A. Hirohata, H. Kurebayashi, S. Okamura, N. Tezuka, K. Inomata,
Magnetic properties of epitaxial $\text{Co}_2\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ full heusler alloy thin films with the $L2_1$ structure,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005. 4. 8

(122) T. Seki, S. Mitani, K. Yakushiji, T. Shima, K. Takanashi,
Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in FePt/Au layered structures,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005. 4. 8

(123) H. Ito, T. Shima, K. Takanashi, Y. K. Takahashi and K. Hono,
Control of the size of octahedral FePt nano-dots and their magnetic properties,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005. 4. 5

(124) K. Yakushiji, F. Ernult, S. Mitani, K. Takanashi,
Spin-dependent single-electron tunneling and spin accumulation in nonmagnetic nanoparticles,
International conference on materials for advanced technologies &
International conference on advanced materials 2005, (Singapore), 2005. 7. 5

- (125)野崎隆行、中村新一、手束展規、猪俣浩一郎、
エピタキシャル強磁性2重トンネル接合における量子振動効果とスピン注入磁化反転、
2005年(平成17年)秋季第65回応用物理学会学術講演会、(徳島大学)2005.9.10
- (126)手束展規、菊地麻樹、岡村進、猪俣浩一郎、
フルホイスラー Co_2FeSi 合金薄膜の構造と磁気抵抗効果、
2005年(平成17年)秋季第65回応用物理学会学術講演会、(徳島大学)2005.9.10
- (127)エルヌ フランク、薬師寺啓、野木嘉人、三谷誠司、高梨弘毅、
Fe単結晶電極とAuナノ粒子を用いた2重トンネル接合の作製、
2005年(平成17年)秋季第65回応用物理学会学術講演会、(徳島大学)2005.9.10
- (128)蔣建華、金容煥、正木達章、手束展規、猪俣浩一郎、
 Co_2FeAl 合金薄膜を用いたCPP-GMR素子の作製と磁気抵抗効果、
第29回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部)2005.9.19
- (129)市村雅彦、今村裕志、高橋三郎、前川禎通、
磁性ナノ構造「ゼロ次元系」におけるスピン蓄積の理論解析、
日本物理学会2005年秋季大会、(同志社大学)2005.9.19
- (130)家田淳、S. E. Barnes、前川禎通、
磁気振り子の駆動機構、
日本物理学会2005年秋季大会、(同志社大学)2005.9.19
- (131)挽野真一、森道康、高橋三郎、前川禎通、
超伝導/強磁性/超伝導接合でのジョセフソン電流に対する磁気揺らぎの効果、
日本物理学会2005年秋季大会、(同志社大学)2005.9.19
- (132)内海裕洋、J. Martinek、G. Schoen、前川禎通、
強磁性電極に結合した量子ドットの非平衡近藤効果、
日本物理学会2005年秋季大会、(同志社大学)2005.9.19
- (133)岡村進、宮崎彩、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、高橋有紀子、宝野和博、
不規則構造を有する $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ を用いた強磁性トンネル接合のTMR特性、
第29回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部)2005.9.20
- (134)菊地麻樹、岡村進、正木達章、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 Co_2FeSi フルホイスラー合金薄膜の結晶構造と磁気・伝導特性、
第29回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部)2005.9.20
- (135)宮崎彩、岡村進、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
MgO基板上に作製した $\text{Co}_2\text{V}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Al}$ の構造と電気伝導特性、
第29回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部)2005.9.20
- (136)小椎八重航、筒井健二、N. Bulut、前川禎通、
カゴメ格子t-J模型の一粒子励起スペクトル、
日本物理学会2005年秋季大会、(同志社大学)2005.9.20
- (137)野崎隆行、中村新一、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
ナノドットFe層を有するエピタキシャル2重トンネル接合におけるコンダクタンス
振動とスピン注入磁化反転、
第29回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部)2005.9.21
- (138)齊藤好昭、杉山英行、井口智明、猪俣浩一郎、
反平行結合フリー層の熱擾乱耐性の層間交換結合依存性、
第29回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部)2005.9.21

- (139) 介川裕章、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
強磁性微粒子層を有する二重トンネル接合の磁気伝導特性 v
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部) 2005. 9. 22
- (140) 谷川和男、市村雅彦、高橋三郎、G. Baskaran、前川禎通、
磁性半導体中の磁気不純物準位と強磁性相互作用 III、
日本物理学会 2005 年秋季大会、(同志社大学) 2005. 9. 22
- (141) 三谷誠司、エルヌ フランク、薬師寺啓、高梨弘毅、
Au ナノ粒子を用いた 2 重トンネル接合におけるスピン蓄積とトンネル磁気抵抗効果、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(信州大学工学部) 2005. 9. 22
- (142) 正木達章、菊地麻樹、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、貝沼亮介、石田清介、
Co₂CrGa フルホイスラー合金薄膜を用いた強磁性トンネル接合素子の作製、
日本金属学会 2005 年秋期大会、(広島大学東広島キャンパス) 2005. 9. 28
- (143) 後藤龍太、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
Co フェライト薄膜の構造と磁性特性評価およびこれを用いたスピンフィルタ素子の作製、
日本金属学会 2005 年秋期大会、(広島大学東広島キャンパス) 2005. 9. 28
- (144) S. Mitani, K. Yakushiji, F. Ernult and K. Takanashi,
Spin accumulation and tunnel magnetoresistance in Au nanoparticles,
50th Magnetism and Magnetic Materials Conference,
(San Jose, California, USA), 2005. 11. 1
- (145) Y. Saito, H. Sugiyama, T. Inokuchi, K. Inomata,
Interlayer Exchange Coupling Dependence of Thermal stability Parameters in Synthetic
Antiferromagnetic Free Layers,
50th Magnetism and Magnetic Materials Conference,
(San Jose, California, USA), 2005. 11. 2
- (146) 猪俣浩一郎、岡村進、宮崎彩、菊地麻樹、手束展規、
Co 基フルホイスラー合金を用いた MTJ の TMR 特性、
電気学会マグネティクス研究会 MAG-06-32、(名古屋大学) 2006. 3. 10
- (147) 菊地麻樹、岡村進、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
MgO(100) 基板上 Co₂FeSi フルホイスラー合金薄膜の結晶構造および磁気・伝導特性、
日本金属学会 2006 年春期(第 138 回)大会、(早稲田大学) 2006. 3. 21
- (148) 手束展規、宮崎彩、岡村進、菊地麻樹、猪俣浩一郎、
フルホイスラー合金薄膜を用いた強磁性トンネル接合における磁気抵抗効果、
2006 年(平成 18 年)春季第 53 回応用物理学関係連合講演会、(武蔵工業大学) 2006. 3. 25
- (149) 三谷誠司、エルヌ フランク、薬師寺啓、高梨弘毅、
FeCo/I/Au-nanoparticles/I/FeCo 2 重トンネル接合(I=MgO, Al-O)の構造と磁気伝導特性、
2006 年(平成 18 年)春期第 53 回応用物理学関係連合講演会、(武蔵工業大学) 2006. 3. 25
- (150) 三谷誠司、薬師寺啓、エルヌ フランク、高梨弘毅、
Au ナノ粒子を含む 2 重トンネル接合の作製とトンネル磁気抵抗効果、
日本物理学会第 61 回年次大会、(愛媛大学・松山大学) 2006. 3. 28
- (151) 市村雅彦、今村裕志、高橋三郎、前川禎通、
磁性ナノ構造におけるスピン蓄積のダイナミクス、
日本物理学会第 61 回年次大会、(愛媛大学・松山大学) 2006. 3. 28
- (152) 挽野真一、森道康、高橋三郎、前川禎通、
超伝導/強磁性体/超伝導接合における $0-\pi$ 転移、

日本物理学会第61回年次大会、(愛媛大学・松山大学) 2006. 3. 29

(153)家田淳一、高橋三郎、S.E. Barnes、前川禎通、
運動する磁壁による電気抵抗とスピン輸送、
日本物理学会第 61 回年次大会、(愛媛大学・松山大学) 2006. 3. 29

・H18 年度(2006 年)

(154)T. Inokuchi, H. Sugiyama, Y. Sato, K. Inomata,
Current-induced magnetization switching through applying magnetic field to hard axis in
MgO based magnetic tunnel junctions,
IEEE International Magnetism Conference (San Diego, USA), 2006. 5. 10

(155)N. Tezuka, A. Miyazaki, S. Okamura, M. Kikuchi and K. Inomata
TUNNEL MAGNETORESISTANCE EFFECT OF FERROMAGNETIC,
TUNNEL JUNCTIONS USING EPITAXIAL $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$ WITH L2_1 STRUCTURE
III JOINT EUROPEAN MAGNETIC SYMPOSIUM,
(San Sebastian, Spain), 2006. 6. 27

(156)J. Martinek, Y. Utsumi, J. Barnas, L. Borda, J. König, J. von Delft, R. Bulla, H. Imamura,
D. C. Ralph, S. Maekawa, G. Schon,
Interplay of Kondo effect and ferromagnetism in single-molecule spintronic devices,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006),
(Sendai, Japan) 2006. 8. 17

(157)F. Ernult, Y. Nogi, K. Yakushiji, S. Mitani, K. Takanashi,
Magneto-transport and spin-accumulation nanoclusters
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Sendai, Japan), 2006. 8. 18

(158)J. Martinek, Y. Utsumi, J. Barnas, L. Borda, J. von Delft, J. König, D. C. Ralph, G. Schon,
and S. Maekawa,
Kondo effect in single-molecule spintronic devices,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006. 8. 24

(159)手束展規、池田直路、宮崎彩、菊地麻樹、杉本諭、猪俣浩一郎、
 $\text{Co}_2\text{FeAl}_x\text{Si}_{1-x}$ フルホイイスラー合金薄膜を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果、
2006 年(平成 18 年) 秋季第 67 回応用物理学会学術講演会、(立命館大学) 2006. 8. 29

(160)新関智彦、手束展規、猪俣浩一郎、
Cr 下地層上に形成した $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}(001)$ トンネル接合における TNR 比の下部 Fe 層厚依存性、
2006 年(平成 18 年) 秋季第 67 回応用物理学会学術講演会、(立命館大学) 2006. 8. 29

(161)介川裕章、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ 強磁性二重トンネル接合の TMR 効果、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 11

(162)新関智彦、手束展規、猪俣浩一郎、
Cr 下地層を用いた $\text{Fe}/\text{MgO}/\text{Fe}(001)$ 強磁性トンネル接合の作製と評価、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 11

(163)井口智明、齊藤好昭、杉山英行、猪俣浩一郎、
 $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$ トンネル接合におけるスピン注入磁化反転の困難軸方向磁場の効果、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 11

(164)野木嘉人、王海、エルヌ フランク、薬師寺啓、三谷誠司、高梨弘毅、
Au ナノ粒子を用いた 2 重トンネル接合におけるクーロンブロッカーとスピン蓄積効果、

第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 12

(165)後藤龍太、高橋由紀子、中村新一、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、宝和和博、プラズマ酸化法により作製した Co フェライト薄膜の構造と磁気特性、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 14

(166)手束展規、池田直路、宮崎彩、菊地麻樹も岡村進、杉本諭、猪俣浩一郎、
 $\text{Co}_2\text{FeAl}_x\text{Si}_{1-x}$ ホイスラー合金薄膜の構造とトンネル磁気抵抗特性、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 14

(167)池田直路、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果、
第 29 回日本応用磁気学会学術講演会、(島根大学) 2006. 9. 14

(168)三谷誠司、薬師寺啓、エルヌ フランク、高梨弘毅、
ナノ粒子を中間電極とする単結晶 2 重トンネル、
日本物理学会 2006 年秋季大会、(千葉大学西千葉キャンパス)2006. 9. 23

(169)小椎八重航、前川禎通、
強相関電子系の熱起電力におけるスピンと軌道の役割—異種の遷移金属を含む化合物の場合、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 23

(170)木村崇、大谷義近、佐藤考哉、高橋三郎、前川禎通、
スピンホール効果の電氣的検出：スピン流から電荷流、電荷流からスピン流、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 23

(171)谷口知大、今村裕志、前川禎通、
2つの強磁性電極を持つ CPP-GMR 構造におけるスピン注入磁化反転の理論的研究、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 24

(172)今村裕志、市村雅彦、家田淳一、高橋三郎、前川禎通、
ねじれたスピン構造を持つ磁性多層膜における CPP-GMR の理論的研究、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 24

(173)森道康、挽野真一、高橋三郎、前川禎通、
超伝導/強磁性/超伝導接合におけるジョセフソン電流の温度依存性、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 24

(174)高橋三郎、挽野真一、森道康、J. Martinek、前川禎通、
超伝導/強磁性/超伝導接合におけるマイクロ波誘起ジョセフソン電流、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 24

(175)挽野真一、高橋三郎、森道康、J. Martinek、前川禎通、
超伝導/強磁性/超伝導接合におけるスピンドYNAMIKSの効果、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 24

(176)家田淳一、S.E. Barnes、前川禎通、
磁性細線中の磁壁移動に伴う起電力、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 24

(177)谷川和男、N. Bulut、前川禎通、
半導体における磁性不純物間の強磁性相互作用：量子モンテカルロ解析、
日本物理学会2006年秋季大会、(千葉大学) 2006. 9. 25

(178)M. Mori, S. Hikino, S. Takahashi, and S. Maekawa,
0- and π -states in Josephson coupling in through magnetic layers,
19th International Symposium of Superconductivity (ISS 2006), (Nagoya, Japan), 2006. 10. 31

③ポスター発表 (国内会議 11 件、国際会議 90 件)

・H13 年度(2001 年)

(1)T. Takenaga, T. Kuroiwa, H. Takada, S. Okamura, N. Yezuka, K. Inomata,
Thermal Stability of Magnetic Tunnel Junctions with CoFe/Ru/CoFe Synthetic Antiferromagnetic
Layers Pinned by an IrMn Layer, Proc. of ICFMS, P1-34, (京都リサーチパーク), 2002.3.5

(2)S. Okamura, N. Tezuka, K. Inomata, S. Sugimoto, Y. Murakami, K. Saito, S. Mitani, K. Takanashi,
Structural and magnetic properties of half-metallic Co_2MnGe ,
Proc. of ICFMS, P2-12, (京都リサーチパーク), 2002.3.6

(3)E. Kitagawa, T. Nozaki, N. Tezuka, K. Inomata, S. Sugimoto,
Magnetization reversal of synthetic antiferromagnetically coupled deep submicron elements,
Proc. of ICFMS, P2-20, (京都リサーチパーク), 2002.3.6

(4)T. Nozaki, S. Abe, N. Tezuka, K. Inomata, S. Sugimoto,
Inverse like GMR for spin valves using antiferromagnetically coupled free layers,
Proc. of ICFMS, P1-34, (京都リサーチパーク), 2002.3.7

(5)S. Mitani, T. Moriyama and K. Takanashi,
Preparation and TMR of MgF_2 -based magnetic tunnel junctions,
Proc. of ICFMS, P3-33 (京都リサーチパーク)2002.3.7

(6)H. Nagura, S. Mitani, T. Shima and K. Takanashi,
Current-perpendicular-to-plane(CPP) magnetoresistance and spin structure in Co/Gd multilayers,
Proc. of ICFMS, P3-18 (京都リサーチパーク)2002.3.7

(7)S. Ohnuma, M. Ohnuma, H. Fujimori, N. Kobayashi and T. Masumoto,
Large Magnetic Anisotropy and Structure of Nano-granular Co-Pd-Si-O Soft Magnetic Thin Films,
Proc. of ICFMS, P3-25 (京都リサーチパーク)2002.3.7

・H14 年度(2002 年)

(8)N. Tezuka, E. Kitagawa, K. Inomata, S. Sugimoto,
MAGNETIZATION REVERSAL OF DEEP SUBMICRON MAGNETIC ELEMENT,
Proc. of ICFMS, (The Netherlands:RAI Congress Center Amsterdam) 2002.5.1

(9)T. Shima, Y. K. Takanashi, K. Hono, K. Takanashi,
High coercive FePt alloy films with discontinuous structure,
The United Engineering Foundation Conference on Nanostructured Advanced
Magnetic Materials, (Germany, Irsee) 2002.6.11

(10)長野靖宏、三谷誠司、高梨弘毅、
単結晶トンネルバリア上の磁性ドットの成長と磁気伝導効果、
日本物理学会 2002 年秋季大会、(中部大学) 2002.9.8

(11)N. Tezuka, N. Koike, K. Inomata and S. Sugimoto,
Magnetization reversal and domain structure of antiferromagnetically coupled submicron elements,
47th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (USA, Florida) 2002.11.13

(12)S. Mitani, T. Moriyama and K. Takanashi,
Tunnel magnetoresistance in Fe/MgO/FeCo(100) epitaxial tunnel junctions prepared
by plasma oxidation,
47th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials Tampa, (USA, Florida) 2002.11.14

・H15 年度(2003 年度)

(13)T. Yamashita, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Andreev Reflection in ferromagnet/superconductor/ferromagnet structures,

第9回「半導体スピン工学の基礎と応用」研究会(東京大学) 2003.6.12

(14) T. Nozaki, N. Tezuka, K. Inomata and S. Sugimoto,
Spin switching properties of magnetic tunnel junctions using a synthetic antiferromagnet free layer
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid), 2003.7.22

(15) S. Okamura, R. Goto, N. Tezuka and K. Inomata,
Large tunneling Magnetoresistance using Full-Heusler Alloys,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces
(Madrid, Spain), 2003.7.22

(16) K. Nakajima, J. M. D. Coey and K. Inomata,
Effect of charging on spin-polarized tunneling in double tunnel junctions with a
ferromagnetic nano granular layer,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces
(Madrid, Spain), 2003.7.22

(17) N. Tezuka, N. Koike, K. Sakurada, K. Inomata,
Magnetic domain structures and switching properties in submicron synthetic
antiparallely coupled elements with low aspect ratio,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces
(Madrid, Spain), 2003.7.22

(18) T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Crossed Andreev reflection in structures consisting of a superconductor with ferromagnetic leads,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, (Madrid, Spain) 2003.7.22

(19) S. Takahashi and S. Maekawa,
Enhanced spin current in magnetic nanostructures,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid, Spain) 2003.7.22

(20) T. Seki, T. Shima, K. Takanashi, Y. Takahashi, E. Matsubara and K. Hono,
 $L1_0$ ordering of off-stoichiometric FePt(001) thin films at reduced temperature
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid, Spain) 2003.7.22

(21) S. Mitani, T. Moriyama, T. Seki, T. Shima and K. Takanashi,
Magnetic tunnel junctions with single crystal $L1_0$ FePt alloy electrodes : Correlation
between TMR and chemical order,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid, Spain) 2003.7.22

(22) S. Ohnuma, H. Fujimori, M. Ohnuma, K. Hono and T. Matsumoto,
Extraordinarily large induced magnetic anisotropy in metal-insulator nanogranular soft
magnetic thin films,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid, Spain) 2003.7.23

(23) S. Mitani, F. Ernult, Y. Nagano and K. Takanashi,
STM/STS study on self-assembled Fe dots grown on single crystal tunnel barriers,
The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (Madrid, Spain) 2003.7.23

(24) S. Takahashi and S. Maekawa,
Spin injection and spin detection in F/N/F and F/S/F nanostructures,
The International Conference on Magnetism (Rome, Italy) 2003.7.27

(25) N. Tezuka, N. Koike, K. Sakurada and K. Inomata,
Magnetic domain structures and switching properties in submicron size synthetic
Antiferromagnets,
International Conference on Magnetism 2003 (Rome, Italy), 2003.7.29

- (26) K. Yakushiji, K. Yamane, M. Matsuura, F. Ernult, S. Mitani, K. Takanashi and H. Fujimori,
Spin-dependent single-electron tunneling phenomena in nanofabricated granular
Systems,
International Conference on Magnetism 2003 (Rome, Italy) 2003. 7. 29
- (27) T. Yamashita, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Andreev reflection in ferromagnet/superconductor/ferromagnet junctions,
The International Conference on Magnetism (Rome, Italy) 2003. 7. 31
- (28) K. Nakajima and K. Inomata,
Spin-dependent single electron tunneling in double tunnel junctions with a nano
granular layer,
International Conference on Magnetism 2003 (Rome, Italy), 2003. 7. 31
- (29) Koichiro Inomata, Susumu Okamura Ryota Goto and Nobuki Tezuka,
Large tunneling magnetoresistance at RT using a Heusler alloy,
Second International Conference and School on Spintronics and Quantum Information
Technology (Brugge, Belgium), 2003. 8. 4
- (30) 山下太郎、高橋三郎、前川禎通、
2つの磁性体と超伝導体との接合系における交差アンドレーエフ反射の理論、
日本物理学会 2003 年秋季大会 (岡山大学) 2003. 9. 21
- (31) Y. Jiang, S. Abe, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata
Enhanced Current-Perpendicular-To-Plane Giant Magnetoresistance in Single
Spin-Valve with Synthetic Antiferromagnet Free Layers,
International Symposium on Advanced Magnetic Materials 2003
(Yokohama, Japan), 2003. 10. 9
- (32) T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Crossed Andreev reflection in structures consisting of a superconductor with two ferromagnetic
leads,
The 3rd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and The 1st
Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Electron Systems ,
(Sendai, Japan) 2003. 11. 5
- (33) S. Takahashi, T. Yamashita, and S. Maekawa,
Crossed Andreev reflection in a d-wave superconductor with two quantum point contacts,
The 3rd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and The 1st
Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Electron Systems
(Sendai, Japan) 2003. 11. 6
- (34) T. Moriyama, S. Mitani, K. Takanashi, T. Seki and T. Shima,
Magnetic tunnel junctions with $L1_0$ ordered FePt electrodes,
The 8th IUMRS International Conference on Advanced Materials 2003 (Yokohama, Japan) 2003. 10. 9
- (35) A. Hirohata, H. Kurebayashi, S. Okamura, N. Tezuka and K. Inomata,
Structural and Magnetic Properties of Co_2CrAl and Co_2FeAl Full-Heusler Alloys Grown
on GaAs(100) Substrates,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics
(Nagoya University), 2003. 11. 26
- (36) Y. Jiang, S. Abe, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata,
CPP GMR Enhancement and Current-induced Magnetization Reversal in Single
Spin-valve Films,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics

(Nagoya University), 2003.11.26

(37)N. Tezuka, S. Abe, Y. Jiang and K. Inomata,
CPP-GMR Enhancement in Spin Valves with a Thin Ru Cap Layer,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics
(Nagoya University), 2003.11.26

(38)S. Mitani, F. Ernult, K. Yamane, K. Yakushiji, and K. Takanashi,
Preparation of self-assembled Fe nanoparticles on single crystal tunnel barriers for
spin-dependent single electron tunneling experiments,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics 2003 (Nagoya, Japan) 2003.11.26

(39)K. Yakushiji, F. Ernult, K. Yamane, S. Mitani, K. Takanashi and H. Fujimori,
Spin-accumulation and inverse TMR in microfabricated insulating granular films,
International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics 2003 (Nagoya, Japan) 2003.11.26

(40)Y. Jiang, S. Abe, T. Nozaki, N. Tezuka and K. Inomata,
Influence of synthetic antiferromagnet free layer on current-perpendicular-to-plane
giant magnetoresistance and magnetic switching behavior of single spin-valve films,
9th Joint MMM-Intermag Conference (Anaheim, USA), 2004.1.8

(41)K. Inomata, S. Okamura, A. Hirohata, H. Kurebayashi and N. Tezuka,
Magnetoresistance in tunnel junctions using $\text{Co}_2(\text{Cr,Fe})\text{Al}$ full-Heusler alloys,
9th Joint MMM-Intermag Conference (Anaheim, USA), 2004.1.8

(42)M. Ichimura, S. Takahashi, K. Ito, and S. Maekawa,
Geometrical effect on spin current in magnetic nano-structures,
The 9th joint MMM/Intermag Conference (Anaheim, USA) 2004.1.8

(43)M. Ichimura, S. Takahashi, K. Ito, and S. Maekawa,
Geometrical effect on spin current in magnetic nano-structures,
March Meeting of American Physical Society (Montreal, Canada) 2004.3.22

(44)高橋三郎、山下太郎、前川禎通、
多点接触ナノ構造におけるスピン伝導とアンドレーエフ反射、
日本物理学会第59回年次大会 (九州大学) 2004.3.27

・H16年度(2004年度)

(45)T. Yamashita, K. Tanikawa, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Josephson effect in a system with normal metal and ferromagnetic leads sandwiched between
superconductors,
The 2nd Asia-Pacific Physics Workshop, Frontier in Condensed Matter Physics,
(Hong Kong, China) 2004.6.21

(46)S. Takahashi and S. Maekawa,
Quantum interference due to crossed Andreev reflection in a d-wave superconductor with
two nano-contacts,
The 7th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors,
(Sitges, Spain) 2004.7.11

(47)谷川和男、山下太郎、高橋三郎、前川禎通、
強磁性パイ接合を含む2リードジョセフソン接合における交差アンドレーエフ反射、
日本物理学会2004回秋季大会、(青森大学) 2004.9.12

(48)高橋三郎、山下太郎、前川禎通、
強磁性体/超伝導体ナノ構造における非局所スピン伝導、
日本物理学会2004年秋季大会、(青森大学) 2004.9.12

- (49)後藤龍太、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
Co フェライト薄膜の構造と磁気特性、
第 28 回日本応用磁気学会学術講演会、(沖縄コンベンションセンター)2004.9.23
- (50)N. Tezuka, K. Sakurada, K. Inomata,
Thermal stability of the magnetization of submicron size synthetic antiferromagnetic free layer,
49th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (Jacksonville, USA), 2004.11.8
- (51)T. Nozaki, N. Tezuka, S. Sugimoto, and K. Inomata,
Quantum oscillation effect in magnetic tunnel junctions with a Ru spacer layer,
49th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (Jacksonville, USA), 2004.11.11
- (52)H. Sukegawa, S. Nakamura, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata,
Tunnel Magnetoresistance Enhancement within the Coulomb Blockade Regime in a Double Magnetic Tunnel
Junction by 2-Dimensional Ferromagnetic Particle Layer Insertion,
49th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (Jacksonville, USA), 2004.11.11
- (53)S. Okamura, A. Miyazaki, N. Tezuka, S. Sugimoto K. Inomata,
Magnetoresistance in Microfabricated $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}/\text{Al}-\text{O}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ Magnetic Tunnel Junctions,
49th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, (Jacksonville, USA), 2004.11.11
- (54)T. Yamashita, K. Tanikawa, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Josephson effect in a superconducting ring with a π junction,
The 4th International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and
The 3rd Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems, (Sendai)2004.11.24
- (55)M. Ichimura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Geometrical effect on spin current in magnetic nano-structures,
The 4th International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides and
The 3rd Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems, (Sendai)2004.11.22
- (56)岡村進、宮崎彩、手束展規、杉本諭、猪俣浩一郎、
 $\text{Co}_2(\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{Al}$ フルホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果、
日本金属学会 2005 年春期(第 136 回)大会、(横浜国立大学)2005.3.29
- (57)Woo Chang Lim, Taek Dong Lee, Susumu Okamura, Nobuki Tezuka, Koichiro Inomata,
Magnetic and Structural Properties of Co_2MnSi Heusler alloy film,
日本金属学会 2005 年春期(第 136 回)大会、(横浜国立大学)2005.3.29
- ・H17 年度(2005 年度)
- (58)N. Tezuka, K. Yonezawa, T. Ochiai, Y. Jiang, S. Sugimoto, K. Inomata,
Magnetization reversal by spin polarized current in nano-pillars with a synthetic antiferromagnet
free layer,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005.4.5
- (59)R. Goto, N. Tezuka, S. Sugimoto, K. Inomata,
A trial for fabricating a spin-filter operating at room temperature using a ferromagnetic insulator,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005.4.6
- (60)N. Tezuka, S. Abe, K. Inomata,
CPP-GMR enhancement in spin valves by a thin Ru layer insertion,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005.4.8
- (61)N. Tezuka, K. Sakurada, K. Inomata,
Thermal stability of a synthetic antiferromagnet free layer,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005.4.

- (62)H. Sukegawa, A. Hirohata, S. Nakajima, N. Tezuka, S. Sigimoto and K. Inomata,
Magnetic transport mechanism in double ferromagnetic tunnel junctions with tow-dimensional
ferromagnetic particles,
Intermag 2005, (Nagoya Congress Center), 2005.4.
- (63)W. Koshibae, A. Oguri, and S. Maekawa,
Hall effect in CoO_2 layer with hexagonal structure,
2005 CERC/ERATO-SSS International Workshop on “Phase Control of Correlated Electron Systems”
(Maui, Hawaii, USA), 2005.6.9
- (64)高橋三郎、前川禎通、
非局所スピン注入とスピン軌道相互作用、
日本物理学会 2005 年秋季大会、(同志社大学) 2005.9.21
- (65)K. Tanikawa, S. Takahashi, M. Ichimura, G. Baskaran, and S. Maekawa,
Magnetic impurity states and ferromagnetic interaction in diluted magnetic semiconductors,
SPINTECH III, (Awaji, Japan), 2005.8.3
- (66)T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Superconducting quantum bit with ferromagnetic π -Junction,
The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology
(ISQM-TOKYO' 05), (Hatoyama, Japan), 2005.08.22
- (67)M. Ichimura, K. Tanikawa, S. Takahashi, G. Baskaran, and S. Maekawa,
Magnetic impurity states and ferromagnetic interaction in diluted magnetic semiconductors,
The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology
(ISQM-TOKYO' 05), (Hatoyama, Japan), 2005.8.22
- (68)M. Ichimura, S. takahashi, and S. Maekawa,
Geometrical Effect on Spin Current in Magnetic Nano-Structure,
The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology
(ISQM-TOKYO' 05), (Hatoyama, Japan), 2005.8.22
- (69)S. Mitani, K. Tsukamoto, T. Seki and K. Takanashi,
Multiple oxidation process for Al-O tunnel barriers on FeCo(100) and FePt(110) single-crystal bottom
electrodes,
International Symposium on Physics of Magnetic Materials(ISPMM)2005, (Singapore) 2005.9.14
- (70)F. Ernult, K. Yakushiji, S. Mitani and K. Takanashi,
Spin-dependent transport and spin-accumulation in nanoparticles, Spin-Depend Transport through
Nanostructures-Spintronucs' 05, (Poland) 2005.9.26
- (71)J. Ieda, S. E. Barnes, and S. Maekawa,
Mechanism of Current-Induced Resonance of a Domain Wall,
Spin-Dependent Transport through Nanostructures-Spintronics05
(Mierzecin near Poznan, Poland), 2005.9.26
- (72)T. Yamashita, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Superconducting qubit with a ferromagnet/superconductor/ferromagnet junction,
Spin-Dependent Transport through Nanostructures-Spintronics05
(Mierzecin near Poznan, Poland), 2005.9.26
- (73)M. Mori, S. Hikino, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Effects of randomness on Josephson current in superconductor/ferromagnetic meta/superconductor
junctions, Spin-Dependent Transport through Nanostructures-Spintronics05,
(Mierzecin near Poznan, Poland), 2005.9.26

(74)N. Tezuka, S. Okamura, A. Miyazaki, M. Kikuchi, K. Inomata,
Structural Dependence of the TMR for MTJ for MTJs with a Full Heusler $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$ Electrode
50th Magnetism and Magnetic Materials Conference,
(San Jose, California, USA), 2005.11.3

(75)R. Goto, N. Tezuka, S. Sugimoto and K. Inomata,
Tunnel magnetoresistance for magnetic tunnel junctions with a ferromagnetic tunnel barrier
50th Magnetism and Magnetic Materials Conference,
(San Jose, California, USA), 2005.11.3

(76)F. Ernult,
Journées scientifiques francophones2005,
(National Olympics Memorial Youth Center, Japan) 2005.11.11

(77)高橋三郎、谷川和男、市村雅彦、N. Bulut、G. Baskaran、前川禎通、
磁性半導体中の磁気不純物準位と強磁性相互作用IV
日本物理学会第 61 回年次大会、(愛媛大学・松山大学) 2006.3.28

・H18 年度(2006 年度)

(78)S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Current-phase relation in a superconductor/ferromagnet/superconductor junction,
Nanoscale Superconductivity and Magnetism - NSM2006,
(Leuven, Belgium) 2006.7.8

(79)S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Current-phase relation in a superconductor/ferromagnet/superconductor junction,
The 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High
Temperature Superconductors (M2S-HTSC-VIII),
(Dresden, Germany) 2006.7.11

(80)R. Goto, Y. Shimura, S. Nakamura, N. Tezuka, S. Sugimoto, K. Inomata,
Tunnel Magnetoresistance through a Co-ferromagnetic Barrier,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Sendai, Japan), 2006.8.17

(81)H. Sukegawa, N. Ikeda, N. Tezuka, K. Inomata,
Fabrication of Low Resistance MgO Based Magnetic Tunnel Junctions,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Sendai, Japan), 2006.8.17

(82)N. Tezuka, A. Miyazaki, S. Okamura, M. Kikuchi, K. Inomata,
Magnetoresistance Effect of Ferromagnetic Tunnel Junctions Using $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$
Full-Heusler Electrodes,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Sendai, Japan), 2006.8.17

(83)S. Mitani, F. Ernult, K. Yakushiji, K. Takanashi,
Preparation of magnetic and nonmagnetic nanoparticles for spin dependent single
Electron tunneling,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces,
(Sendai, Japan) 2006.8.17

(84)M. Ichimura, J. Ieda, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Numerical analysis of spin accumulation and resistance due to a domain wall,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006),
(Sendai, Japan) 2006.8.17

- (85)Y. Utsumi, J. Martinek, G. Schon, H. Imamura, and S. Maekawa,
Non-equilibrium Kondo effect in a quantum dot coupled to ferromagnetic leads,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006),
(Sendai, Japan) 2006. 8.17
- (86)J. Ieda, S. E. Barnes, and S. Maekawa,
Magnetic devices using domain wall motion in ferromagnetic wires,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006),
(Sendai, Japan) 2006.8.17
- (87)H. Imamura, M. Ichimura, J. Ieda, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Theoretical study of CPP-magnetoresistance of ferromagnetic multilayers,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006),
(Sendai, Japan) 2006. 8.17
- (88)S. Takahashi and S. Maekawa,
Nonlocal spin Hall effect and spin-orbit interaction in metals,
19th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS 2006),
(Sendai, Japan) 2006. 8.17
- (89)N. Tezuka, A. Miyazaki, S. Okamura, M. Kikuchi and K. Inomata
Tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al},\text{Si})$ full-Heusler films
International Conference on Magnetism,
(Kyoto, Japan), 2006.8.21
- (90)F. Ernult, S. Mitani, K. Yakushiji, Y. Nogi and K. Takahashi,
Preparation and magnetotransport phenomena in Au nanoparticles
International Conference on Magnetism,
(Kyoto, Japan) 2006.8.22
- (91)S. Mitani, F. Ernult, K. Yakushiji and K. Takanashi,
Tunnel magnetoresistance in double tunnel junctions including FeCo, Au,
Ag and Pd nanoparticles,
International Conference on Magnetism,
(Kyoto, Japan) 2006.8.22
- (92)H. Imamura, M. Ichimura, J. Ieda, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Spin accumulation and magnetoresistance of ferromagnetic multilayers with twisted spin structure,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006.8.22
- (93)M. Ichimura, J. Ieda, H. Imamura, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Numerical analysis of spin accumulation due to a domain wall,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006.8.22
- (94)J. Ieda, S. Takahashi, M. Ichimura, H. Imamura, and S. Maekawa,
Spin accumulation and resistance due to a domain wall,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006.8.22
- (95)S. Takahashi and S. Maekawa,
Nonlocal spin Hall effect and spin-orbit interaction in nonmagnetic metals,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006.8.22

(96)K. Tanikawa, N. Bulut, and S. Maekawa,
Magnetic impurity states and ferromagnetic interaction in diluted magnetic semiconductors,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006.8.24

(97)S. Hikino, M. Mori, S. Takahashi, and S. Maekawa,
Theory of $0-\pi$ transition in a superconductor /ferromagnet/superconductor junction,
The 17th International Conference on Magnetism (ICM),
(Kyoto, Japan) 2006.8.25

(98)J. Ieda, S. E. Barnes, and S. Maekawa,
Magnetic memory using domain wall motion in magnetic nano-wires,
Magnetic Nanostructures (Gordon Research Conference),
(Cambridge, UK) 2006.9.7

(99)Y. Saito, T. Inokuchi, H. Sugiyama, K. Inomata,
Hard axis magnetic field dependence current induced magnetization switching in
MgO-based magnetic tunnel junctions,
International Workshop on Spin Transfer, (Nancy, France),2006.10.2

(100)S. Hikino, S. Takahashi, M. Mori, J. Martinek, and S. Maekawa,
Effect of magnons on the $0-\pi$ transition in a superconductor/half-metallic
ferromagnet/superconductor junction,
19th International Symposium of Superconductivity (ISS 2006),
(Nagoya, Japan) 2006.11.1

(101)S. Takahashi, S. Hikino, M. Mori, J. Martinek, and S. Maekawa,
Supercurrent pumped by ferromagnetic resonance in ferromagnetic Josephson junctions,
19th International Symposium of Superconductivity (ISS 2006),
(Nagoya, Japan) 2006.11.1

(4)特許出願

① 国内出願 (22 件)

1.発明者:猪俣 浩一郎

発明の名称:スピンフィルタ効果素子及びそれを用いた磁気デバイス

出願人:科学技術振興機構

出願日:2002年6月28日

出願番号:特願 2002-190610

2.発明者:猪俣 浩一郎、前川 禎通、高橋 三郎

発明の名称:スピン注入素子及びスピン注入素子を用いた磁気装置

出願人:科学技術振興機構

出願日:2002年11月29日

出願番号:特願 2002-349262

3.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規

発明の名称:スピン注入デバイス及びスピン注入磁気装置

出願人:科学技術振興機構

出願日:2002年12月13日

出願番号:特願 2002-363127

4.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規

発明の名称:磁性薄膜及びそれを用いた磁気抵抗効果素子並びに磁気デバイス

出願人:科学技術振興機構
出願日:2002年12月26日
出願番号:特願2002-378502

5.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:CPP型巨大磁気抵抗効果素子及び磁気ヘッド並びに磁気記憶装置
出願人:科学技術振興機構
出願日:2003年1月31日
出願番号:特願2003-024981

6.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:CPP型巨大磁気抵抗効果素子及びそれを用いた磁気部品並びに磁気装置
出願人:科学技術振興機構
出願日:2003年5月15日
出願番号:特願2003-137945

7.発明者:前川 禎通、猪俣 浩一郎、高橋 三郎
発明の名称:スピン注入素子及びそれを用いた磁気装置
出願人:科学技術振興機構
出願日:2003年6月24日
出願番号:特願2003-180130

8.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:磁性薄膜及びそれを用いた磁気抵抗効果素子並びに磁気デバイス
出願人:科学技術振興機構
出願日:2003年7月7日
出願番号:特願2003-271628

9.発明者:斉藤 好昭、杉山 英行
発明の名称:磁気抵抗効果素子および固体磁気メモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2003年7月30日
出願番号:特願2003-203783

10.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:スピン注入デバイス及びこれを用いた磁気装置
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2003年12月9日
出願番号:特願2003-410966

11.発明者:前川 禎通、山下 太郎、高橋 三郎
発明の名称:ジョセフソン量子計算素子
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2004年7月27日
出願番号:2004-219284

12.発明者:前川 禎通、山下 太郎、高橋 三郎
発明の名称:ジョセフソン量子計算素子及びこれを用いた集積回路
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2004年12月24日
出願番号:2004-375008

13.発明者:齊藤 好昭、杉山 英行、井口 智明
発明の名称:スピン注入磁気ランダムアクセスメモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2005年1月28日
出願番号:特願 2005-21877

14.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:強磁性二重トンネル接合
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2005年4月1日
出願番号:特願 2005-106922

15.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:スピン共鳴トンネル素子
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2005年4月7日
出願番号:特願 2005-111450

16.発明者:齊藤 好昭、杉山 英行、井口 智明
発明の名称:磁気抵抗効果素子および磁気メモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2005年7月20日
出願番号:特願 2005-210370

17.発明者:井口 智明、齊藤 好昭、杉山 英行
発明の名称:スピン注入磁気ランダムアクセスメモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2005年10月28日
出願番号:特願 2005-315459

18.発明者:杉山 英行、齊藤 好昭、井口 智明
発明の名称:磁気抵抗効果素子および磁気メモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2006年1月31日
出願番号:特願 2006-023337

19.発明者:齊藤 好昭、杉山 英行、井口 智明
発明の名称:磁気抵抗効果素子および磁気メモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2006年4月28日
出願番号:特願 2006-126682

20.発明者:齊藤 好昭、杉山 英行、井口 智明
発明の名称:スピンメモリ
出願人:株式会社 東芝
出願日:2006年4月7日
出願番号:特願 2006-106491

21.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:Co 基フルホイスラー合金薄膜およびそれを用いた磁気抵抗効果

素子および磁気デバイス

出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2006年4月27日
出願番号:特願2006-123502

22.発明者:三谷 誠司、薬師寺 啓、エルヌ フランク、高梨 弘毅
発明の名称:磁気抵抗効果素子及び不揮発性ランダムアクセスメモリ
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2006年8月10日
出願番号:特願2006-218828

23.発明者:井口 智明、斉藤 好昭、杉山 英行
発明の名称:スピンメモリ及びスピン FET
出願人:株式会社 東芝
出願日:2006年9月8日
出願番号:特願2006-244881

②海外出願 (10 件)

1.発明者:猪俣 浩一郎、前川 禎通、高橋 三郎
発明の名称:スピン注入素子及びスピン注入素子を用いた磁気装置
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2003年11月20日(国際出願)
出願番号:PCT/JP03/14830

2.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:スピン注入デバイス及びこれを用いた磁気装置並びに
これらに用いられる磁気薄膜
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2003年12月11日(国際出願)
出願番号:PCT/JP03/15888

3.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:CPP 型巨大磁気抵抗素子及びそれを用いた磁気部品並びに磁気装置
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2004年1月23日(国際出願)
出願番号:PCT/JP2004/000594

4.発明者:Yoshiaki Saito, Hideyuki Sugiyama
発明の名称:Magneto-resistive effect element and magnetic memory (USP patent)
出願人:株式会社 東芝
出願日:2004年6月

5.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規
発明の名称:強磁性二重トンネル接合
出願人:独立行政法人科学技術振興機構
出願日:2006年2月14日(国際出願)
出願番号:PCT/JP2006/302545

6.発明者:前川 禎通、山下 太郎、高橋 三郎

発明の名称:ジョセフソン量子計算素子及びそれを用いた集積回路

出願人:独立行政法人科学技術振興機構

出願日:2005年7月25日(国際出願)

出願番号:PCT/JP2005/013585

7.発明者:Yoshiaki Saito, Hideyuki Sugiyama, Tomoaki Inokuchi, Yoshihisa Iwata

発明の名称:Spin-Injection Magnetic Random Access Memory(US Patent)

出願人:Toshiba Corp.

出願日:2005年10月

8.発明者:猪俣 浩一郎、手束 展規

発明の名称:強磁性二重トンネル接合

出願人:独立行政法人科学技術振興機構

出願日:2006年2月14日(国際出願)

出願番号:PCT/JP2006/302545

9.発明者:Tomoaki Inokuchi, Yoshiaki Saito, Hideyuki Sugiyama

発明の名称:Spin-Injection Magnetic Random Access Memory (US Patent)

出願人:Toshiba Corp.

出願日:2006年3月

10.発明者:Yoshiaki Saito, Hideyuki Sugiyama, Tomoaki Inokuchi

発明の名称:Magnetoresistive Effect Element And Magnetic Memory (US Patent)

出願人:Toshiba Corp.

出願日:2006年3月

(5)受賞等

①受賞

1.平成14年5月16日

高梨 弘毅

インテリジェント・コスモス奨励賞

財団法人 インテリジェント・コスモス学術振興財団

2.平成14年6月12日

嶋 敏之

最優秀ポスター賞

ナノ構造を有する先進的な磁性材料国際会議

3.平成14年9月

猪俣 浩一郎

日本応用磁気学会業績賞

社団法人 日本応用磁気学会

4.平成14年10月31日

嶋 敏之

第42回原田研究奨励賞

財団法人 金属研究助成会

5. 平成 14 年 11 月 6 日

嶋 敏之

優秀講演賞

社団法人 日本応用磁気学会

6. 平成 15 年 3 月 24 日

嶋 敏之

第 13 回トーキン科学技術振興財団研究奨励賞

財団法人 トーキン科学技術振興財団

7. 平成 15 年 3 月 25 日

野崎 隆行

東北大学総長賞

東北大学

8. 平成 15 年 3 月 27 日

高梨 弘毅

功績賞

社団法人 日本金属学会

9. 平成 15 年 5 月 6 日

手束 展規

みやぎ振興基金産業科学研究奨励賞

財団法人 みやぎ産業科学振興基金

10. 平成 15 年 9 月

前川 禎通

日本応用磁気学会賞

社団法人 日本応用磁気学会

11. 平成 15 年 10 月 31 日

手束 展規

第 43 回原田研究奨励賞

財団法人 金属研究助成会

12. 平成 15 年 11 月 17 日

野崎 隆行

優秀講演賞

社団法人 日本応用磁気学会

13. 平成 15 年 11 月 17 日

薬師寺 啓

優秀講演賞

社団法人 日本応用磁気学会

14. 平成 15 年 11 月 27 日

薬師寺 啓

Young Researcher Award

The International Symposium on Advanced Magnetic

15. 平成 16 年 9 月 1 日
薬師寺 啓
講演奨励賞
社団法人 応用物理学会
16. 平成 16 年 9 月 27 日
高梨 弘毅
第 1 回優秀研究賞
社団法人 日本応用磁気学会
17. 平成 16 年 9 月 28 日
岡村 進
日本金属学会論文賞若手講演論文部門
社団法人 日本金属学会
18. 平成 16 年 12 月 8 日
野崎 隆行
第 10 回研究奨励賞
財団法人 青葉工学振興会
19. 平成 16 年 12 月 8 日
介川 裕章
及川賞
財団法人 青葉工学振興会
20. 平成 17 年 7 月 11 日
薬師寺 啓
第 45 回原田研究奨励賞
財団法人 本多記念会
21. 平成 17 年 9 月 20 日
廣畑 貴文
社団法人 日本応用磁気学会
日本応用磁気学会学術奨励賞(内山賞)
22. 平成 17 年 11 月 18 日
三谷 誠司
社団法人 日本応用磁気学会
日本応用磁気学会第 5 回優秀講演賞
23. 平成 18 年 3 月 13 日
薬師寺 啓
第 16 回トーキン科学技術振興財団研究奨励賞
社団法人 トーキン科学技術振興財団
24. 平成 18 年 9 月 12 日
岡村 進
日本応用磁気学会学術奨励賞(内山賞)

②新聞報道

1. 2002年7月22日 日刊工業新聞
ギガビット MRAM に道
2. 2002年8月2日 日刊工業新聞
大容量化で逆転
3. 2002年8月13日 河北新報
MRAM 大容量化東北大が素子開発
4. 2002年8月21日 半導体産業新聞社
MRAM 大容量化に道を開く新技術を開発
5. 2002年12月4日 半導体産業新聞社
MRAM の最新技術動向
6. 2003年5月13日 日刊工業新聞
ホイスラー合金で観測
7. 2004年4月11日 日本工業新聞
100分の1の電流で動作
8. 2004年5月10日 読売新聞
瞬時に立ち上がるコンピューターに道
9. 2004年5月10日 日経産業新聞
スピン素子開発
10. 2004年5月10日 日刊工業新聞
100分/1の電流で動作
11. 2004年5月10日 科学新聞
磁気不揮発メモリーの書き込み技術を高度化
12. 2004年7月21日 日刊工業新聞
超大容量を可能にする MRAM
13. 2004年12月6日 日刊工業新聞
バルク金属の1万倍に
14. 2004年12月6日 日経産業新聞
電子の自転1万倍長く
15. 2005年7月19日 日刊工業新聞
ギガビット級の大容量化を目指す MRAM

16. 2006年7月21日 日刊工業新聞
MgOバリアーとスピン注入書込みで大容量化
17. 2006年10月25日 ナノネットインタビュー（ナノテク総合支援プロジェクト）
ナノの世界に広がるスピンの物理～展開するスピントロニクスと応用～

④ その他

なし

(6) その他特記事項

なし

7 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成14年 1月15日	猪俣チーム 第一回研究会	東北大学 金属材料研究所	17名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成14年 10月4日	猪俣チーム 第二回研究会	東北大学 金属材料研究所	39名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成15年 3月7日	猪俣チーム 第三回研究会	ホテル瑞鳳	33名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成15年 9月12日	猪俣チーム 第四回研究会	東北大学 金属材料研究所	41名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成16年 3月22日	猪俣チーム 第五回研究会	東北大学 金属材料研究所	33名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成16年 9月17日	猪俣チーム 第六回研究会	東北大学 金属材料研究所	22名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成17年 3月8日	猪俣チーム 第七回研究会	東北大学 金属材料研究所	29名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成17年 10月7日	猪俣チーム 第八回研究会	東北大学 金属材料研究所	31名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成18年 3月15日	猪俣チーム 第九回研究会	東北大学 金属材料研究所	23名	各グループの研究成 果発表及び研究討論
平成18年 11月2日	猪俣チーム 第十回研究会	東北大学 金属材料研究所	19名	各グループの研究成 果発表及び研究討論

8 結び

達成度と成果の意義

本プロジェクトでは「セル選択トランジスタを不要とする不揮発性でしかもランダムアクセス可能な究極のスピンメモリ」の創製を戦略目標に据え、それに必要な要素技術の研究開発を行った。要素技術を（1）スイッチ機能付スピントネル素子の開発、（2）高速読み出し技術の開発、（3）低電流書き込み技術の開発、（4）新しいデバイス創製に関する研究に大別し、それに対する取り組むべき6つの研究課題を設定した。全体的には各要素技術を開発でき、戦略目標は概ね達成できたと考えている。また、開発した各要素技術

は大容量 MRAM や広くスピントロニクスへのキー技術となるものが多く、波及効果が大きいと期待される。また、新しい科学的発見もあった。以下、具体的に述べる。

(1) スイッチ機能付スピントネル素子の開発

クーロンブロッケードを利用するスピン単一電子素子、およびスピン共鳴トンネル接合素子の開発に取り組んだ。前者では、Co ナノ粒子を用いることで低温ではあるもののスピン単一電子素子がスイッチ機能付スピントネル素子になり得ることを実証した。一方、ナノ粒子のスピン緩和時間がバルクの 10,000 倍も大きいことを発見した。これを利用して Au ナノ粒子のスピン蓄積による TMR を観測し、非磁性ナノ粒子のスピン蓄積を用いることで室温動作可能なスピン量子メモリを発想した。これによりクーロンブロッケードを利用するスピン単一電子素子は、原理的に室温動作が可能であることがわかった。上記発見は将来のナノスピントロニクスの新たな展開をもたらす可能性が高い。

スピン共鳴トンネル効果素子については Fe/MgO 系に着目、Fe/MgO/Fe/MgO/Fe 二重トンネル接合および Cr/Fe/MgO 接合を作製し、いずれも世界で初めて強磁性層内にスピン依存量子井戸を形成させることに成功し、微分コンダクタンスの振動を観測した。特に後者では微分コンダクタンスに加え、TMR のエンハンスおよび I-V 曲線の変調を室温で観測し、まだ振幅は小さいものの、スピン共鳴トンネル効果素子もスイッチ機能付きスピントネル素子になり得ることを実証した。

(2) 高速読み出し技術の開発

ハーフメタルの開発と自己差動読み出し技術の開発に取り組んだ。プロジェクト発足当時、ハーフメタルは重要という認識はあったものの有力な材料が見つからず、研究は散発的であった。本研究では Co 基フルホイスラー合金に着目し、室温で 220% という世界を驚かす巨大 TMR を得ることに成功、ハーフメタルは夢ではないことを実証するとともに、ハーフメタルはフルホイスラー合金が本命であることを決定付けた。スピントロニクスにおけるハーフメタルの重要性を考えると、この成果の評価と価値はこれからどんどん大きくなるであろう。幸い、申請していた NEDO の委託研究が採択されたので、本成果を発展させて TMR1000% ($P > 0.9$) を実現し、スピントロニクスに新たな展開をもたらしたいと考えている。

後者では二つの TMR 素子をスタックした自己差動読み出し技術を開発した。併せて電流分岐によるスピン注入書き込みにも成功し、自己差動読み出し・スピン注入書き込みメモリ素子を開発した。この技術は出力を倍増できるので、ユニバーサルメモリを目指す大容量 MRAM のキー技術になる可能性があり、将来実用化される可能性が高いと考えている。

(3) 低電流書き込み技術の開発

反平行結合 (SyAF) 素子およびスピン注入磁化反転技術の開発に取り組んだ。前者では SyAF は単磁区構造を作りやすく、スイッチング (磁化反転) 磁場が素子サイズに依存しないことを発見し、併せて熱揺らぎ耐性に優れることを実証した。これにより SyAF をフリー層に用いる TMR 素子は大容量メモリ素子に適していることが明らかになった。懸念された SyAF のスピン注入磁化反転が可能であることも実証した。また、Ru スペーサを用いるとスピン注入磁化反転電流が一桁以上低減することを見出した。最近、SyAF をフリー層に用いる TMR 素子に関する研究が増加している。先鞭をつけた者として実用化動向を見守るとともに、スピン注入磁化反転電流の更なる低減化を目指した研究を続ける。

(4) 非局所スピン注入に関する理論的研究：新しいデバイス創製に関する研究

非局所スピン流による微小磁性体の磁化反転ならびにスピンホール効果の観測可能性を理論的に示し、スピン依存伝導の基礎理論を構築した。最近、これらの理論的予測がいずれも実験的に観測されている。これらの研究成果は将来のナノスピントロニクスで重要になると予想され、それを理論的に予測した意義は大きい。

以上を簡単にまとめると、開発したハーフメタルはスピントロニクスキー材料として、自己差動読み出し・スピン注入書き込みメモリ素子と反平行結合素子は大容量 MRAM 技術として近い将来実用化が期待される。一方、クーロンブロッケードを利用するスピン単一電子素子とスピン共鳴トンネル素子、および非局所スピン注入磁化反転・スピンホール効果は新しい物理を包含するとともに、将来の重要なシーズとして期待される。

プロジェクト運営について

年 2 回の研究会を開催することで研究の促進を促し、併せて研究の進捗状況の把握、研究の相互理解と研究者間のディスカッションに役立った。また、研究会終了後、懇親会を開催するなどして研究者間の親睦をはかった。このような機会を通じ、新たなグループ間の共同研究が生まれた。外国との共同研究も行った。研究活動は、毎年冊子にまとめ関係者に配布した。学会活動やプレス発表も積極的に行った。研究成果が認められ若手研究者の多く(8人)が受賞した。

研究費は設備費・消耗費・人件費などに適正に使われたと判断している。特に、設備費はこの分野の研究を行うに必要な設備を充実させることができ、欧米の有力大学に比べて遜色のない研究環境を構築することができた。これは今後の研究活動にも大いに役立つ。人件費では5人のポスドクを採用し、4人の外国人を招聘した。ポスドクの一人(中国人)は Nature Materials に論文が掲載され、それが認められて教授として迎えられた(北京科技大学)。他の3人は理研ポスドク、国研に就職、国内企業に就職と、それぞれ研究成果が認められ新たな人生を歩んでいる。最後の一人は現在ポスドクとして活躍しているが、終了後は海外での研究活動を目指している。研究補助員として Dr. 学生を採用し、CREST 研究を進める中で4人の課程博士が誕生した。彼らは現在それぞれの道で活躍している。

戦略的創造研究推進事業に対する意見、要望

まず、5年間研究をサポートして頂いたことに感謝します。高い目標を掲げ、限られた時間内で必死になってそれを達成しようとする研究者の姿勢に、参加した多くの若者がそれまでには得られなかった数々の刺激を受け成長した。CREST は今やステータスが高く、研究者にあまり負担をかけない形で運営されていることが特徴と捉えられている。また、特許出願を全面的にサポートして頂けるのもありがたい。この二つは今後とも是非そのスタンスを維持していただきたい。



研究会風景



超高真空スパッタ装置



イオンミリング装置



高分解能原子間力顕微鏡



磁性量子ドット作製装置





自己差動検出評価装置



表面清浄化装置



表面均一性形状評価装置
卓上小型プローブ顕微鏡