

機関番号：82108

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048029

研究課題名（和文） 高スピン偏極材料のナノ構造解析とスピン偏極率測定

研究課題名（英文） Microstructure analysis and spin polarization measurement of high spin polarized materials

研究代表者

高橋 有紀子 (TAKAHASHI YUKIKO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料センター・主幹研究員

研究者番号：50421392

研究成果の概要（和文）：スピントロニクス素子の高性能化の鍵となる高スピン偏極率材料の微細構造解析を行い、微細構造と特性の相関から高性能化の指針を得ることを目的として研究を行った。Co基ホイスラー合金を用いたトンネル型磁気抵抗および巨大磁気抵抗(それぞれ TMR、CPP-GMR)素子の微細構造を電子顕微鏡で詳細に検討することにより、高い磁気抵抗比を実現するためには Co 基ホイスラー合金電極の規則度が高い必要があることがわかった。また高い規則度を得るためには下地層との格子整合も重要である。さらに、 $\text{Co}_2\text{FeAlSi}$  を強磁性電極、Ag をスペーサ層とした CPP-GMR 素子を用いて、バルク及び界面のスピン非対称性をスピン拡散長を考慮した Valet-Fert のモデルにより見積もり、高い GMR 比を得るための指針を示した。

研究成果の概要（英文）：To realize high performance spintronics devices, we studied the relationship between microstructure and transport properties of the spintronics devices using highly spin-polarized materials. By the detail microstructure observation of tunneling magnetoresistance (TMR) and current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance (CPP-GMR) devices using Co-based Heusler alloys, it was found that high degree of  $L2_1$  order was required in the Co-based Heusler alloy electrodes. In addition, a lattice matching between the electrode and spacer materials should be good to get high degree of  $L2_1$  order.

By using the Valet-Fert model taking into account of the spin diffusion length, we estimated the bulk and interface spin asymmetry in the  $\text{Co}_2\text{FeAlSi}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{FeAlSi}$  CPP-GMR device.

Based on these results, we showed the material guideline to realize high GMR in CPP-GMR devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,000,000	0	8,000,000
2008年度	7,100,000	0	7,100,000
2009年度	6,700,000	0	6,700,000
2010年度	5,600,000	0	5,600,000
年度			
総計	27,400,000	0	27,400,000

研究分野：スピン流の創出と制御

科研費の分科・細目：無機材料・物性

キーワード：高スピン偏極率材料、微細構造、スピントロニクスデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

磁気記録の中核を担う HDD の高密度化には、再生ヘッド(GMR 及び TMR ヘッド)の

高性能化が必要不可欠である。高い MR 比を示す MR 素子の開発には、非磁性層あるいは絶縁層の上下に位置する強磁性層のスピン

偏極率が高いことが求められる。素子の室温動作に必要な高いキュリー点を持ち、さらに高いスピン偏極率を示す強磁性材料の一つとして Co 基フルホイスラー合金が挙げられる。ホイスラー合金は  $L2_1(X_2YZ)$  規則構造を持つが、YZ の不規則化で B2 構造に、XYZ の不規則化で A2 構造をとる。ホイスラー合金のスピン偏極率は、規則度、site-disorder や合金組成のずれなどで低下することが理論的に示されており、いかに完全な  $L2_1$  構造のホイスラー合金薄膜を作製するかが高い MR 比を実現するために重要な課題となっている。それにもかかわらず、多くの研究において高い MR 比を得るために素子の作製プロセスを試行錯誤的に最適化することに多くの労力が費やされており、強磁性電極の物性や素子の微細構造と特性の相関があまり研究されてこなかった。そこで本研究では電極材料の物性を測定し、さらに素子構造を詳細に解析することにより高い MR 比を得るための膜構造を実現し、優れた MR 素子の実現に貢献することを目的とする。

## 2. 研究の目的

ユビキタス社会の実現のために、データストレージの更なる高性能化が求められている。ハードディスクドライブ(HDD)で代表される磁気記録は安価で高速なデータストレージ技術としてその用途が PC のみならずホームエレクトロニクス、携帯電子機器などに広範に使用されており、小型軽量化への要求からその記録密度は指数関数的な伸びを示してきた。ところが近年その記録密度の進展が鈍化しており、さらに高密度磁気記録を達成させるためには再生ヘッドとして用いられている磁気抵抗素子(MR 素子)の高性能化が必要不可欠である。MR 素子を高性能化するには、①強磁性電極材料として高いスピン偏極率を持つ材料を用いること、②素子の界面構造を最適化することが必要である。しかし、多くの研究では素子製造プロセスを変化させることにより特性を最適化することに多くの努力がなされ、MR 素子の構造を詳細に解析して、MR 特性を構造的な観点から議論した研究が少ない。そこで本研究では強磁性電極の物性と素子構造を詳細に解析し、トンネル型磁気抵抗(TMR)、巨大磁気抵抗(GMR)素子で高い MR 特性を得るための材料設計指針を提案することを目的とする。そのために、MR 素子用の強磁性電極薄膜のスピン偏極率を点接触アンドレーエフ反射(PCAR)を用いて直接測定し、同時に膜の微細構造観察を行うことにより、高スピン偏極率を示す強磁性電極材料の探索と製膜法を確立する。また TMR、GMR 素子の界面構造を電子顕微鏡(TEM)及び 3 次元アトムプローブ(3DAP)を用いて解析することにより界面構

造と MR 特性の相関に関する知見を得て、それをプロセスにフィードバックすることにより、高特性を示す MR 素子の作製及びそのための材料設計指針を示す。

## 3. 研究の方法

HDD の高密度化には、高い MR 比が必要とされている。高い MR 比を実現するには素子の強磁性電極に高スピン偏極率を持つ材料を使うことが有効であることが知られている。しかし、高スピン偏極率材料の微細構造と伝導特性を詳細に検討した例はなく、高スピン偏極率材料の開発指針も存在しなかった。そこで本研究では、高スピン偏極率材料の微細組織を詳細に検討し、その特性を関連づけることにより、高特性実現のための材料開発指針を示すことが本研究の目的である。そのために、(a) ハーフメタルとして最も有力なホイスラー合金薄膜の試作(一部の試料は領域グループから提供)、(b) スピン偏極率及び磁気特性評価と 3DAP、TEM による微細構造解析、(c) 結果の考察と薄膜試作過程へのフィードバックを系統的に行う。まず、高スピン偏極率が予想されているホイスラー合金のバルクサンプルを作製しその特性と微細構造の相関を検討することにより、高スピン偏極率材料の探索ならびに製造法の確立を目指す。バルクで有望な特性を示した材料について、スパッタ法で薄膜を作製し、薄膜で高スピン偏極率を実現することのできる製膜条件を確立する。その後、これらの高スピン偏極率薄膜電極を用いた MR 素子を作製し、その伝導特性を測定する。さらに界面微細構造を詳細に TEM により解析し、MR 比と界面構造の因果関係を解明、これらの知見をプロセスにフィードバックすることにより、高特性を示す MR 素子の開発及びそのための材料設計指針を示す。

## 4. 研究成果

(1)  $Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}$ (CFAS)と Ag を用いた CPP-GMR 素子の伝導特性と微細構造

フェルミ面をチューニングした材料である CFAS と Ag を用いて CPP-GMR 素子を作製した。CPP ピラーでの不均一な電流分布による抵抗変化のエンハンス効果を避けるために、素子抵抗を下げる必要がある。そのために 100 nm 以上の厚い Ag を下地層として採用している。また、スペーサ層も Ag であるが、Ag は CFAS の格子ミスフィットがわずかに 1.5% であり、エピタキシャル成長できる。このようにして作製した素子は図 1 に示すように素子全体でエピタキシャル成長し、図 2 に示すように室温で 6.9%、6 K で 14% の大きな MR 比を実現した。

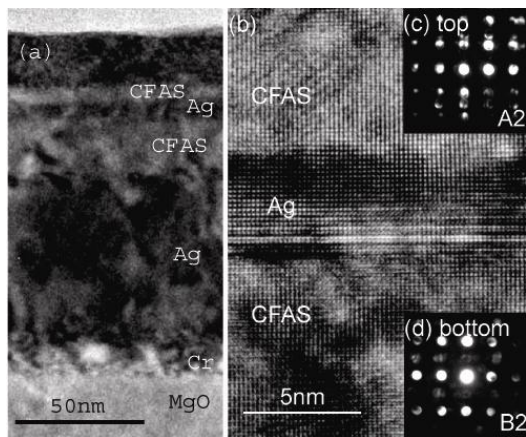


図 1 (a) 多層膜の断面 TEM 像。(b) CFAS/Ag/CFAS 部分の断面の高分解能像。(c)(d) 上下 CFAS 層から取ったナノビーム電子回折像。

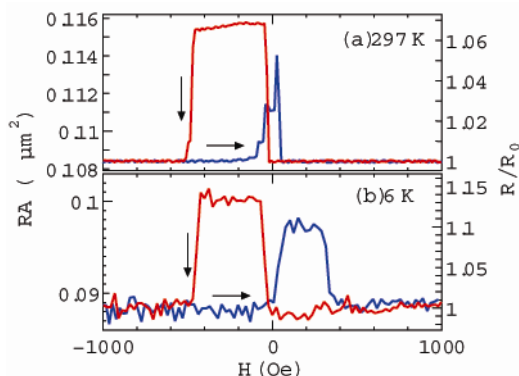


図 2 強磁性電極に CFAS、スペーサ層に Ag を用いた CPP-GMR 素子の (a) 297 K と (b) 6 K の磁気抵抗曲線。

(2)  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ -強磁性トンネル接合の HAADF-STEM 法による  $\text{L}_{21}$  構造の直接観察

$\text{Co}_2\text{MnSi}$  (CMS) はアルミナをトンネルバリアとした強磁性トンネル接合 (MTJ) において 2 K で 570% の高い値を示し、低温でのハーフメタル性が確認されている材料である。この CMS を強磁性電極、 $\text{MgO}$  をトンネルバリアとした MTJ は、上下 CMS 電極の熱処理温度によって TMR 比が変化する。MTJ の作製プロセスと伝導特性の相関に関する研究は多くあるものの、素子の微細構造と伝導特性の相関については詳細な検討がない。そこでここでは、特に上下 CMS 電極の規則度と  $\text{MgO}$  バリアとの界面構造に着目して検討を行った。検討を行った素子は CMS/ $\text{MgO}$ /CMS を基本とする MTJ で上下 CMS の熱処理温度を変化させている。なお、試料は A01 班の山本グループより提供された。

熱処理温度による電極の規則度はナノビーム電子線回折法を用いて行った。600°C で熱処理をした下部 CMS 電極は、 $\text{L}_{21}$  構造の超格子反射である (111) の回折斑点が明瞭に観測される。550°C で熱処理をした上部 CMS の

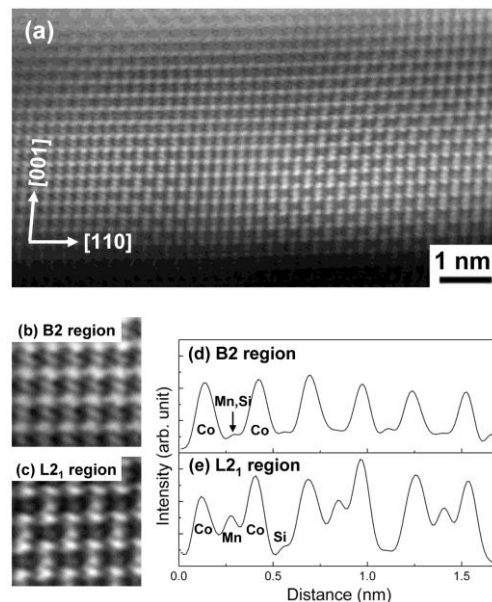


図 3 (a) 400°C で熱処理した上部 CMS のフーリエ変換した HAADF-STEM 像。(b)(d) B2 に規則化した部分の像とラインプロファイル。(c)(e)  $\text{L}_{21}$  に規則化した部分の像とラインプロファイル。

回折像にも (111) の回折斑点が観測されるがその強度が弱い。実際、(220) の基本回折斑点の強度により正規化した規則度においても下部 CMS の方が規則度が高い。一方、400°C で熱処理した上部 CMS では (111) の  $\text{L}_{21}$  超格子反射斑点は観測されず、B2 の超格子反射斑点である (200) が観測され B2 に規則化していることがわかった。

原子レベルで CMS の構造を調べるために、HAADF-STEM 観察を行った。HAADF-STEM 法では、強度が原子番号の 2 乗に比例するので、[110] 方向から電子線を入射させることにより  $\text{L}_{21}$  構造を直接観察することができる。600°C で熱処理した下部 CMS の (110) 面の HAADF-STEM 像からは、Co-Mn-Co の列に対応する明るいコントラストが観測され、全体が  $\text{L}_{21}$  構造に規則化していることがわかる。一方で、400°C で熱処理した上部 CMS (図 3) では部分的に  $\text{L}_{21}$  構造に規則化しているものの、大部分は B2 構造であることがわかる。このように電子線回折像ではサンプルの平均的な情報しか得られないために、 $\text{L}_{21}$  構造に規則化している部分が少ない場合はそれが反映されない。

トンネル電子分光によると 600°C で熱処理した CMS のハーフメタルギャップは 0.40 eV、550°C で熱処理した上部 CMS のそれは 0.32 eV、さらに 400°C で熱処理した上部 CMS のそれは 0.12 eV であることが明らかになっている。すなわち大きいハーフメタルギャップを実現するには高い規則度が必要であることがわかる。また HAADF-STEM 法は  $\text{L}_{21}$  の規則構造を直接観察する方法として有効であることが明らかとなった。

(3)  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  を用いた CPP-GMR 素子の微細構造観察

$\text{Co}_2\text{MnSi}$ (CMS)は、Al-O障壁を用いたMTJで低温でのハーフメタル性が示されている数少ないハーフメタル材料の1つである。最近我々は $\text{MgO}$ (001)基板上に作製した $\text{Cr}(10)/\text{Ag}(200)/\text{Cr}(10)/\text{CMS}(20)/\text{Cu}(4)/\text{CMS}(5)/\text{Fe}_{25}\text{Co}_{75}(2)/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10)/\text{Ru}(5)$ の膜構成のGMR素子において、室温で $\Delta RA$ が $14.2 \text{ m}\Omega(\mu\text{m}^2)$ で8.6%のGMR比、低温で $\Delta RA$ が $35.2 \text{ m}\Omega(\mu\text{m}^2)$ で30.7%のGMR比を実現した。この大きなMRの実現はAg下地を厚く成膜することによる全体の抵抗減少によるものである。なお、下部CMS成膜後に $400^\circ\text{C}$ で規則化のための熱処理をしている。図4には、(a)高分解能像と上下CMS層のナノビーム電子回折像を示す。明視野像からは平坦な界面が実現されていることが観察される。一方、高分解能像でCMS/Cu/CMS部分を観察すると、CMS[100]に対してCu[110]が $5^\circ$ 程度回転しており、さらにCuに多くの転位や欠陥が観察される。実際、CMS[100]方向から観察すると(b)に示すように多くの双晶が観察される。CMSに対してCuは-9.7%のミスフィットを示すためにCuは引

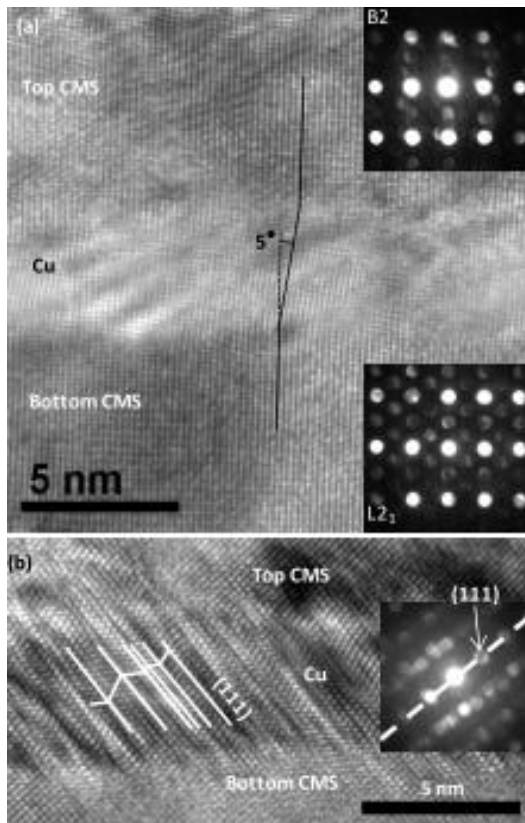


図4 上下電極をCMS、スペーサ層にCuを用いたCPP-GMR素子の断面の高分解能像。(a)CMS[110]方向から電子線を入射して観察した像。(b)(c)上下CMSのナノビーム電子線回折像。(d)CMS[100]方向から電子線を入射して観察した像。

っ張り応力を上下のCMSから受けているため、Cu層には多くの滑りや双晶が入ることにより歪みを緩和していると考えられる。ナノビーム回折からは上部CMSはB2構造であるのに対し、下部CMSはL2<sub>1</sub>構造に規則化していることがわかる。さらに高いGMR比を実現するには、上下CMSの規則度を高くする必要があることがわかる。

(4)  $\text{Co}_2\text{FeAlSi}$  と Ag を用いた CPP-GMR 素子におけるバルクおよび界面のスピンの非対称性の評価

Valet-FertのモデルによればCPP-GMR素子で高い抵抗変化を得るためにはスペーサ層の上下に位置する強磁性電極のバルクと界面のスピンの非対称性( $\beta$ と $\gamma$ )がいずれも高い必要がある。しかし、それらを強磁性電極のスピンの拡散長を考慮して見積もった例はない。高い磁気抵抗比を実現するためには、それらの値を明らかにする必要がある。 $\text{Co}_2\text{FeAlSi}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{FeAlSi}$ (CFAS)の膜構造を持つCPP-GMR素子を作製した。膜構造は $\text{MgO}$ (001)単結晶基板上に下から $\text{Cr}(10)/\text{Ag}(100)/\text{CFAS}/\text{Ag}(5)/\text{CFAS}/\text{Ag}(5)/\text{Ru}(8)$ である。 $\beta$ と $\gamma$ の見積もりのために、CFAS膜厚を2.5-20 nmまで変化させている。図5にCFAS膜厚が2.5 nmのMR曲線を示す。磁場を変化させることにより上下CFASの磁化反転が起こり、反平行状態が形成されたときに高い磁気抵抗が得られる。室温で $\Delta RA=5.1 \text{ m}\Omega\cdot\mu\text{m}^2$ 、MR=34%、14 Kで $\Delta RA=11.3 \text{ m}\Omega\cdot\mu\text{m}^2$ 、MR=80%と非常に大きな値が得られた。スピンの拡散長を考慮したValet-Fertのモデルによりフィッティングを行った結果、 $\beta$ は14Kで0.77、室温で0.70と見積もられた(図6)。また、界面のスピンの依存散乱も大きいこと、 $\text{Co}_2\text{FeAlSi}$ のスピンの拡散長が室温で約2.2 nm、14Kで約3 nmであることが明らかとなった。以上のことから高い磁気抵抗変化は、高い $\beta$ と $\gamma$ により実現したことが明らかに

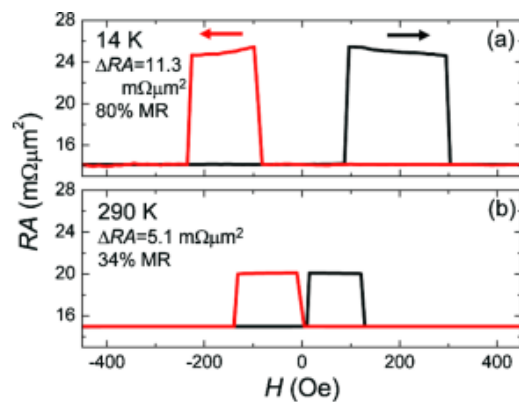


図5 上下電極をCFAS、スペーサ層をAgとして作製したCPP-GMR素子の(a)14Kと(b)290Kでの磁気抵抗曲線。CFAS膜厚は2.5 nm。

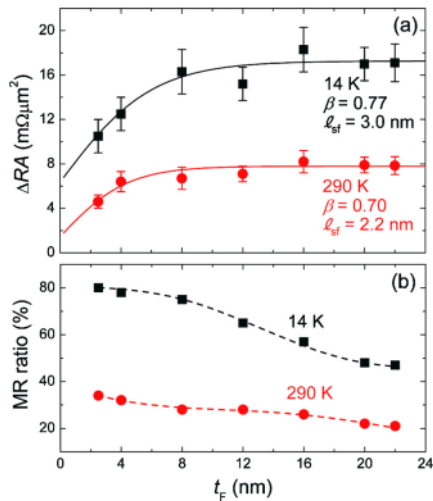


図6 (a)  $\Delta RA$  と(b)MR比のCFAS膜厚依存性。(a)をValet-Fertモデルによりフィッティングすることによりバルクスピン非対称性およびスピン拡散長を見積もる。

なった。また、CFASとAgの積層回数を変化させることにより見積もった界面抵抗  $AR_{FN}$  は約  $0.25 \text{ m}\Omega\mu\text{m}^2$  で、温度依存はなかった。また、 $\gamma$ は室温で0.77、14 Kで0.93と大きいことが明らかになった。

#### (6) 高スピン偏極率材料の開発

スピントロクスデバイスにおいて高特性を実現するためにはフェルミ面でのスピン偏極率が100%のハーフメタルが必要とされている。そのような材料を開発するために点接触アンドレーフ反射(PCAR)法を用いてスピン偏極率を評価することによりCo基ホイスラー合金に第4元素を添加する方法で検討を行った。Co基ホイスラー合金はキュリー点が室温よりも十分高く理論的にハーフメタルが予測されている。

$\text{Co}_2\text{MnGe}$  は理論的にハーフメタルが予測されている材料であるが、PCAR法により評価したスピン偏極率は0.6であった。ハーフ

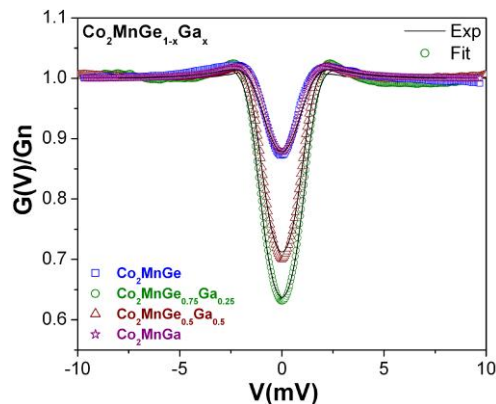


図7点接触アンドレーフ反射法で測定した  $\text{Co}_2\text{MnGa}$ 、 $\text{Co}_2\text{MnGaGe}$ 、 $\text{Co}_2\text{MnGe}$  のコンダクタンス曲線。

メタルの理論予測に対してスピン偏極率が小さいのは不規則構造のためである。一方で、 $\text{Co}_2\text{MnGa}$  はハーフメタルではないものの、フェルミ面付近に多数スピンの大きな状態の山がある。GaとGeはか電子数が1つ違うので、GeをGaで置換することによりフェルミ面付近の多数スピンの状態を増加させられる可能性がある。そこでGaとGeの組成を系統的に変化させて、構造とスピン偏極率の変化について検討を行った。

合金はアーク溶解で作製し、溶体化処理の後に規則化のための熱処理を  $400^\circ\text{C}$  で1週間行った。DTA測定より、 $\text{Co}_2\text{MnGa}_{0.25}\text{Ge}_{0.75}$  と  $\text{Co}_2\text{MnGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  は金属間化合物であることがわかった。図7に  $\text{Co}_2\text{MnGe}_{1-x}\text{Ga}_x$  のコンダクタンス曲線を示す。ゼロバイアス時のコンダクタンスが小さいほど、アンドレーフ反射が抑制されていることを示しており、材料のスピン偏極率が高いことに相当する。コンダクタンス曲線を拡張BTKモデルでフィッティングした結果、スピン偏極率は  $\text{Co}_2\text{MnGa}_{0.25}\text{Ge}_{0.75}$  が0.74もの高い値を示した。この値はホイスラー合金中最大の値である。Ga添加によるスピン偏極率の増大は、主に  $L2_1$  規則度の増加と  $\text{DO}_3$  型の不規則の減少によるものである。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計33件)

- ① “Structure and transport properties of current-perpendicular-to-plane spin valves using  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  and  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  Heusler alloy” T. Frurubayashi, K. Kodama, T.M. Nakatani, H. Sukegawqa, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, *J. Appl. Phys.*, **107**, 113907 (2011). 査読有
- ② “Bulk and interfacial scatterings in current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance with  $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})$  Heusler alloy layers and Ag” T. M. Nakatani, T. Furubayashi, S. Kasai, Y. K. Takahashi, S. Mitani, K. Hono, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 212501 (2010). 査読有
- ③ “Structural characterizations of  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$  magnetic tunnel junctions by transmission electron microscopy” T.M. Nakatani, Y.K. Takahashi, T. Ishikawa, M. Yamamoto and K. Hono, *J. Magn. Mater.*, **322**, 357 (2010). 査読有
- ④ “Enhanced spin polarization of  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  Heusler alloy by substitution of Ga of Ge” B. Varaparasad, A. Rajanikanth, Y.K. Takahashi and K. Hono, *Appl. Phys.*

- Express, 3, 23002 (2010).査読有
- ⑤ “Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in spin-valve structures using epitaxial  $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Ag}/\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  trilayers”  
T. Furubayashi, K. Kodama, H. Sukegawa, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono  
*Appl. Phys. Lett.*, **93**, 122507 (2008)査読有

[学会発表] (計 51 件)

- ① “Search of half-metallic Heusler alloys and their applications to magnetoresistive devices”Y.K. Takahashi, T. Furubayashi, T.M. Nakatani, N. Hase, A. Rajanikanth, B. Varaprasad, H.S. Goripati and K. HonoICUMRSinvited2010年12月8日
- ② 「スピントロニクス素子の構造と特性」高橋有紀子、中谷友也、長谷直基、A. Rajanikanth, B. Varaprasad, H.S. Goripati, S.V. Karthik、古林孝夫、宝野和博,日本金属学会春季講演大会,筑波大学,2010年3月30日招待
- ③ “Development of Heusler materials and high  $\Delta R/R$  in CPP-GMR”T. Furubayashi, K. Kodama, T.M. Nakatani, H. Sukegawa, Y.K. Takahashi, R. Shan, W. H. Wang, K. Inomata and K. HonoIEEE International Magnetism Conference 2009Sacramento, USA, 2009.5.7Invited

[図書] (計 1 件)

- ① スピントロニクスの基礎と材料、応用技術の最前線 第24章「スピントロニクス材料の微細構造制御」高橋有紀子、宝野和博シーエムシー出版,2009年286~295ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

名称:Co基ホイスラー合金とこれを用いた磁性素子

発明者:アマナブロールラジャニカンス、高橋有紀子、宝野和博

権利者:独立行政法人物質・材料研究機構

種類:特許

番号:特願2008-299551

出願年月日:2008年11月25日

国内外の別:国内

名称:Co基ホイスラー合金

発明者:アマナブロールラジャニカンス、高橋有紀子、宝野和博

権利者:独立行政法人物質・材料研究機構

種類:特許

番号:特願2008-220648

出願年月日:2008年8月29日

国内外の別:国内

名称:Co基ホイスラー合金

発明者:バラプラサッド、アマナブロールラジャニカンス、高橋有紀子、宝野和博

権利者:独立行政法人物質・材料研究機構

種類:特許

番号:特願2008-199712

出願年月日:2008年8月1日

国内外の別:国内

名称:Co基ホイスラー合金

発明者:中谷友也、アマナブロールラジャニカンス、高橋有紀子、宝野和博

権利者:独立行政法人物質・材料研究機構

種類:特許

番号:特願2007-276353

出願年月日:2007年10月24日

国内外の別:国内

[その他]

ホームページ等

[http://www.nims.go.jp/apfim/index\\_j.html](http://www.nims.go.jp/apfim/index_j.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高橋 有紀子 (TAKAHASHI YUKIKO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料センター・主幹研究員

研究者番号:50421392

### (2)研究分担者

古林 孝夫 (FURUBAYASHI TAKAO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料センター・主席研究員

研究者番号:80354348

宝野 和博 (HONO KAZUHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料センター・フェロー

研究者番号:60229151

大久保 忠勝 (OHKUBO TADAKATSU)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料センター・グループリーダー

研究者番号:00242462

A. Rajanikanth (A. RAJANIKANTH)

独立行政法人物質・材料研究機構・若手国際研究センター・研究員

研究者番号:40515590

### (3)連携研究者

なし