

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360322

研究課題名（和文） ホイスラー合金電極を用いた CPP-GMR の研究

研究課題名（英文） Study of CPP-GMR using Heusler alloy electrodes

研究代表者

古林 孝夫 (FURUBAYASHI TAKAO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・主席研究員

研究者番号：80354348

研究成果の概要（和文）：高記録密度ハードディスクドライブに必要な低抵抗かつ高出力の読み取りヘッドへの応用を目指し、高いスピン分極率を持つ Co 基ホイスラー合金を用いた面直巨大磁気抵抗（CPPGMR）素子の開発を行った。スペーサ層として Ag を用いたエピタキシが高い MR 値を示すことを見出した。種々の合金を検討した結果、 $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 磁性層を用いた素子において室温で 40% を超える MR 比を得た。

研究成果の概要（英文）：Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance (CPP-GMR) devices having low resistance and high MR outputs were developed by using Co-based Heusler alloys with high spin polarization. It was found that epitaxial films with a spacer layer of Ag gives remarkably high MR values. MR ratios exceeding 40% were obtained by using magnetic layers of $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造機能材料

キーワード：磁性材料、スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

電子の持つ電荷と磁気モーメントを組み合わせて利用するスピントロニクスは代表的なナノテクノロジーとして急激な発展を遂げてきた。当初、強磁性金属と非磁性金属からなる多層膜の面内方向に電流を流した current-in-plane 磁気抵抗効果（CIP-GMR）に始まり、その後、膜面に垂直に電流を流す current-perpendicular-to-plane 構造により大きな磁気抵抗効果が得られることがわかってきた（CPP-GMR）。これに加え、強磁性体層を絶縁体層で隔てた構造を作り、強磁性体層

間のトンネル電流が2つの強磁性体層の相対的な磁化方向の関係によって変化するトンネル磁気抵抗効果（TMR）が見いだされ、これが数 100% に及ぶ磁気抵抗を発現するため、TMR 素子は現在応用に向けて盛んに研究されている。

GMR あるいは TMR の最も重要な応用の一つは磁気ハードディスクの読み取りヘッドである。記録密度のさらなる増大のためには、より小型で高感度の磁気ヘッドが求められる。CIP-GMR を用いたヘッドはすでに広く用いられており、さらに高感度で高密度化に

適した構造を持つ TMR ヘッドに置き換えられつつある。しかしながら TMR ヘッドの問題点は絶縁体層を介した伝導を利用するため、本質的に電気抵抗が高く、高い磁気抵抗率を保ったまま低い抵抗値の素子を得ることが困難なことにある。このことは高密度化のために不可欠なより高いデータ転送速度を実現する上でのネックとなると考えられている。

TMR 素子の高抵抗の問題を克服し、より高密度記録を実現するための手段として CPP-GMR の利用が考えられる。TMR に対し、金属層を介した電気伝導をコントロールすることによって得られる CPP-GMR は本質的に低抵抗であり再生ヘッド用素子として TMR よりも有望であると考えられる。しかしながら、現時点ですでに室温で 500% を超える抵抗変化率が得られている TMR に対し、CPP-GMR は 10% 程度に留まっており、従来のような強磁性電極を用いた CPP-GMR では TMR ヘッドを超える性能は期待できない。CPP-GMR において高い MR 値を得るためにブレークスルーが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、CPP-GMR の磁場感度を増大させ、さらなる高性能再生ヘッドを実現させる手段として、強磁性電極に伝導電子が完全に分極したハーフメタルを強磁性電極としたハーフメタル CPP-GMR 素子で高い MR 値の実現を目指す。

キュリー点が室温以上という観点から、現在最も有望視されているハーフメタルがホイスラー合金であるが、理論的にハーフメタル性が予想されても実際には完全なスピンの分極は得られていない。これは、薄膜において合金組成のずれや熱力学的な要因により高分極率を発現する L2₁ 規則構造が実現されておらず、完全なスピン分極が得られていないことが原因と考えられている。しかしながら、最近になって Co 基フルホイスラー合金、Co₂FeAl_xSi_{1-x}(CFAS)を用いた TMR が室温で 100% を超える抵抗変化率を示すことが見いだされ、それにより 70% を超えるスピン分極率が CFAS で実現されていると考えられている。本研究はこの Co 基フルホイスラー合金を用いて CPP-GMR、TMR 素子よりもはるかに低い電気抵抗でありながら高い GMR の得られる CPP-GMR 素子の実現を目的とした。

3. 研究の方法

CPP-GMR 用の薄膜は室温の MgO(100)単結晶基板上に超高真空マグネトロンスパッタ装置によって作成した。われわれはまず IrMn 反強磁性層によるピン止めを用いたスピバルブ型素子を作成した。代表的な積層構造は MgO 基板側から、MgO/Cr(10)/Ag(100-200)/Heusler(20)/Ag(5)/Heusler(5)/Co₇₅Fe₂₅(2)/Ir₂₂Mn₇₈(10)/Ru である。括弧内の

数字は膜厚(nm)、Heusler はホイスラー合金を表す。スペーサ層は、高い電気伝導度と長いスピン散乱長を持つことが求められる。またバッファ層は CPP-GMR 素子を作成したときの下部電極となるので電気伝導度が高いことが望ましい。このような観点からわれわれはスペーサ層およびバッファ層として Ag を選択している。また、Ag はホイスラー合金と良好な格子マッチングを示し、ここで述べるすべての合金系について、上述の積層構造で上部のホイスラー合金層までエピタキシャル成長が確認されている。ホイスラー合金の規則度を高めるために、それぞれのホイスラー合金層を成長させた後で熱処理を行っている。また、IrMn による 1 方向異方性を得るために、成膜後に 250-300°C で磁場中熱処理を行った。

スピバルブ型構造は素子全体の中で IrMn の部分の電気抵抗が大きく、定量的な議論のために必要な CPP-GMR の効果の本質的な部分である Heusler/Ag/Heusler の 3 層構造の寄与が見えにくいという難点がある。そこでわれわれは IrMn を取り除き、代表的な積層構造として MgO/Cr(10)/Ag(100)

/Heusler(*n*)/Ag(5)/Heusler(*n*)/Ag(5)/Ru の擬スピバルブ型素子についても研究を行った。CPP-GMR へのバルクと界面の寄与を分離するとともに、ホイスラー合金のスピン拡散長を求める目的で、ホイスラー合金層の厚さ *n* を変えた試料を作成した。

膜面に垂直な方向での電気抵抗測定のために、薄膜は電子線リソグラフィによってサブミクロンサイズに加工した。素子の磁気抵抗は直流 4 端子方によって測定した。擬スピバルブ型素子ではピン止め層がないので、微細加工した素子での 2 層間の静磁気相互作用によって反平行状態が実現される。

4. 研究成果

(1) Co₂FeAl_xSi_{1-x} (CFAS)

Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} についてスピバルブ型 CPPGMR 素子を作成した。下部ホイスラー層 (フリー層)のみを 400°C で熱処理した試料、及びこれに加えて上部ホイスラー層 (ピンド層)も 400°C で熱処理した試料を作成して比較した。電子線回折の結果熱処理を行わないホイスラー層は完全に不規則の A2 相であるのに対し、熱処理を加えることに規則度の高い B2 相になることがわかった。室温での MR 比は下部ホイスラー層のみを熱処理した場合は 6.9%であったが、上部ホイスラー層も熱処理することにより 12.3%に上昇した。すなわち、規則度を上げることによりスピン分極率も上昇し、その結果 MR が増大したと考えられる。

次に両方のホイスラー層の膜厚を 2.5nm から 22nm の間で変化させた擬スピバルブ型

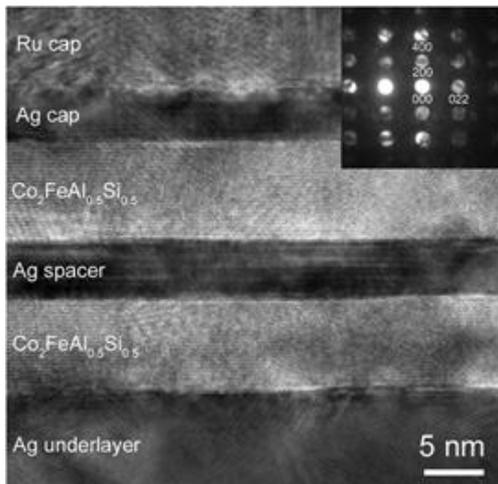


図 1: CFAS/Ag/CFAS 擬スピバルブ素子の断面 TEM 写真及び電子線回折像。

素子を作成し、MR の膜厚依存性を調べた。試料は成膜後に 500°C で熱処理を行っている。CFAS 層は B2 構造であった。TEM 観察の結果、界面は非常に平坦で Ag, CFAS とともに (001) 面でのエピタキシャル成長をしていることがわかった。面内の方位関係は Ag[110] と CFAS[100] が平行である。厚さ 2.5nm の試料について、室温で 34%、10K で 80% という高い MR 比を得た。図 2 に MR の抵抗変化に素子面積をかけたもの ΔRA の CFAS 膜厚依存性を示す。膜厚の増大とともに増加するが次第に飽和する傾向を示す。これは CFAS 層のスピ散長が膜厚に比べて小さいため、バルクの電気抵抗が MR に寄与しなくなるためである。Valet-Fert のモデルによってフィッティングした結果、バルク抵抗及び界面抵抗のスピ非対称性パラメータ、それぞれ β 及び γ 、並びに CFAS のスピ散長 l_{SF} について図に示す値を得た。大きな β 及び γ の値はこの合金の高いスピ分極率によるものと考えられる。特に低温で界面の寄与 γ が大きくなっていることが特徴である。 l_{SF} が短いために膜厚を増大させても MR は増えないが、界

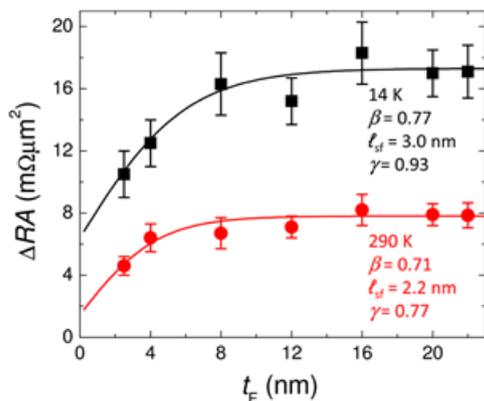


図 2: CFAS/Ag/CFAS 擬スピバルブ素子の ΔRA の膜厚依存性。

面散乱の寄与 (図で膜厚 0 への外挿値) が大きく、2.5nm という薄い膜でもある程度の MR が得られる。ヘッドへの応用に関しては膜厚を薄くすることが求められており、この点では有望である。

(2) $\text{Co}_2\text{MnGa}_x\text{Sn}_{1-x}$ (CMGS)

バルク合金の PCAR 測定の結果、0.72 とかなり大きなスピ分極率が得られている。また CMGS は $L2_1$ の規則化傾向が高く、この点で薄膜においても高いスピ分極率が期待できると考えた。

CMGS を用いてスピバルブ型 CPP-GMR 素子を作成した。積層構造は、MgO/Cr(10)/Ag(75)/CMGS(20)/Ag(5)/CMGS(5)/CoFe(2)/IrMn(10)/Ru(8) である。各 CMGS 層を成長させた後でそれぞれ 600°C までの温度で熱処理を行いその効果を調べた。 ΔRA は 400°C で最大 4.0 $\text{m}\Omega\cdot\mu\text{m}^2$ を示した後、減少する。一方、RA は 400°C 以上で急激に増加し始める。この原因について検討するために、熱処理温度が 400°C と 520°C の CPP-GMR 素子の断面 TEM 観察を行った。400°C で熱処理した CPP-GMR 素子の断面 TEM 像からはすべての層がエピタキシャル成長していることがわかった。これに対し 520°C で熱処理した CPP-GMR 素子では、Ag スペースの一部が消失して、上下 CMGS が接触しているのがわかった。NBED 像では上下 CMGS とともに $L2_1$ 構造に規則化している。このように上下のホイスラー合金層が $L2_1$ 構造に規則化しているにもかかわらず MR 比が下がったのは、高い規則度を得るための熱処理温度で積層構造が熱的に不安定となり壊れてしまうからである。積層構造を維持しつつ、 $L2_1$ 構造に規則化するホイスラー合金層とスペース層の適当な組み合わせがみだされれば、さらに MR 比を向上させることができると期待される。

(3) $\text{Co}_2\text{FeGa}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ (CFGG)

MgO(001) 単結晶基板の上に下から Cr(10)/Ag(100)/CFGG/Ag(5)/CFGG/Ag(5)/Ru(8) (数字は厚さ、nm) とした。すべての層を成膜した後に CFGG の規則化のために 500°C で 30 分熱処理をしている。このようにして作製した多層膜を電子ビームリソグラフィと Ar イオンエッチングを用いて

微細加工を行い CPP-GMR 素子を作製した。バルク合金の PCAR 測定によると $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_x\text{Ge}_{1-x})$ 合金の P は、Ga 添加とともに増加し $x=0.5$ で 0.69 という高い値を示した。この P の増加は $L2_1$ 規則度の増加によるものである。HREM 像より CFGG と Ag はエピタキシャル関係にあり、界面は平坦であることがわかる。またナノビーム電子回折像と HAADF 像から上下 CFGG とともに B2 構造であることがわかった。CFGG 膜厚を 12 nm としたとき、300 K で $\text{MR}=41.7\%$ 、 $\Delta RA=9.5 \text{ m}\Omega\cdot\mu\text{m}^2$ 、10 K で $\text{MR}=129.1\%$ 、

$\Delta RA=26.4m\Omega\cdot\mu m^2$ という高い値が得られた。高い MR 比は、CFGG の高い P に起因していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① H. S. Goripati, M. Hayashi, T. Furubayashi, T. Taniguchi, H. Sukegawa, Y. K. Takahashi and K. Hono, Current induced alignment of bi-quadratic interlayer exchange coupled magnetic layers in Heusler based magnetoresistive pillars, J. Appl. Phys., vol. 110, 2011, 123914-1, 7, 査読有.
- ② T. M. Nakatani, S. Mitani, T. Furubayashi, and K. Hono, Oscillatory antiferromagnetic interlayer exchange coupling in $Co_2Fe(A_{10.5}Si_{0.5})/Ag/Co_2Fe(A_{10.5}Si_{0.5})$ films and its application to trilayer magnetoresistive sensor, Appl. Phys. Lett., vol. 99, 2011, 182505-1, 182505-3, 査読有.
- ③ Y.K. Takahashi, A. Srinivasan, B. Varaprasad, A. Rajanikanth, N. Hase, T.M. Nakatani, S. Kasai, T. Furubayashi and K. Hono, Large magnetoresistance in current-perpendicular-to-plane pseudo spin valve using a $Co_2Fe(Ge_{0.5}Ga_{0.5})$ Heusler alloy, Appl. Phys. Lett., vol. 98, 2011, 152501-1, 152501-3, 査読有.
- ④ H. S. Goripati, T. Furubayashi, T.M. Nakatani, Y. K. Takahashi and K. Hono, The effect of substitution of Fe with Cr on the giant magnetoresistance of current perpendicular-to-plane spin valves with Co_2FeSi , J. Appl. Phys., vol. 109, 2011, 043901-1,6, 査読有.
- ⑤ T.M. Nakatani, T. Furubayashi and K. Hono, Interfacial resistance and spin-dependent scattering in the current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using $Co_2Fe(A_{10.5}Si_{0.5})$ Heusler alloy and Ag, J. Appl. Phys., vol. 109, 2011, 07B724-1, 3, 査読有.
- ⑥ T. Furubayashi, K. Kodama, T.M. Nakatani, H. Sukegawa, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Structure and transport properties of current -perpendicular-to-plane spin valves using $Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}$ and Co_2MnSi Heusler alloy, J. Appl. Phys., vol. 107, 2010, 113917-1, 7, 査読有.
- ⑦ N. Hase, B. Varaprasad, T.M. Nakatani, H. Sukegawa, S. Kasai, Y.K. Takahashi, T. Furubayashi and K. Hono, Current -perpendicular-to-plane spin valves with a $Co_2Mn(Ga_{0.5}Sn_{0.5})$ Heusler alloy, Appl. Phys. Lett., vol. 96, 2010, 202501-1, 3, 査読有.
- ⑧ T.M. Nakatani, T. Furubayashi, S. Kasai, H. Sukegawa, Y.K. Takahashi, S. Mitani and K.

Hono, Bulk and interfacial scatterings in current-perpendicular -to-plane giant magnetoresistance with $Co_2Fe(A_{10.5}Si_{0.5})$ Heusler alloy layers and Ag spacer, Appl. Phys. Lett. vol. 96, 2010, 202501-1,3, 査読有.

⑨ T. Furubayashi, K. Kodama, H. S. Goripati, Y. K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Interlayer exchange coupling in $Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}/Cr/Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}$ trilayers, J. Appl. Phys., vol. 105, 2009, 07C305-1, 3, 査読有.

⑩ K. Kodama, T. Furubayashi, H. Sukegawa, T. M. Nakatani, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance of a spin valve using Co_2MnSi Heusler alloy electrodes, J. Appl. Phys., vol. 105, 2009, 07E905-1, 3, 査読有.

⑪ 古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, ホイスラー合金ハーフメタル探索とその CPP-GMR への応用, 電子情報通信学会技術研究報告, 108, 2008 25-29, 査読無.

⑫ T. Furubayashi, K. Kodama, H. Sukegawa, Y. K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Current-perpendicular-to -plane giant magnetoresistance in spin-valve structures using epitaxial $Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}/Ag/Co_2FeAl_{0.5}Si_{0.5}$ trilayers, Appl. Phys. Lett., 93, 2008, 122507-1, 3, 査読有.

[学会発表] (計 29 件)

- ① 中谷友也、林将光、三谷誠司、古林孝夫、宝野和博, 反強磁性結合 CPP-GMR 素子を用いた 3 層膜センサーの検討, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012/3/17, 早稲田大学、東京.
- ② 高橋有希子、A. Srinivasan、B. Varaprasad、A. Rajanikanth、長谷直基、中谷友也、葛西伸哉、古林孝夫、三谷誠司、宝野和博, $Co_2Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})$ を用いた CPP-GMR 素子の微細構造と磁気・伝導特性, 日本金属学会 2011 年秋期大会, 2011/11/8, 沖縄コンベンションセンター, 那覇.
- ③ T. Nakatani, M. Hayashi, S. Mitani, T. Furubayashi and K. Hono, Spin torque noise properties in exchange biased spin-valve and trilayer CPP-GMR devices using $Co_2Fe(A_{10.5}Si_{0.5})$ Heusler alloy layers, 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, 2011/10/31, JW Marriot Desert Ridge Resort, Scottsdale, USA.
- ④ T. Furubayashi, T. Nakatani, H.S. Goripati, H. Sukegawa, Y. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Composition dependence of current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using $Co_2FeAl_{1-x}Six$ Heusler alloys, 5th International Workshop on Spin

Currents, 2011/9/27, 仙台国際センター, 仙台.

⑤ 古林孝夫, 中谷友也, 長谷直基, H. Goripati, 高橋有紀子, 宝野和博, 高スピン分極ホイスラー合金の材料開発と CPPGMR への応用, 日本磁気学会第 177 回研究会(招待講演), 2011/9/27, 朱鷺メッセ, 新潟.

⑥ 中谷友也, 林将光, 古林孝夫, 宝野和博, Ag スペーサー層を介した $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{10.5}\text{Si}_{0.5})$ ホイスラー合金薄膜の層間交換結合と CPP-GMR 特性, 第 35 回日本磁気学会学術講演会, 2011/9/27, 朱鷺メッセ, 新潟.

⑦ T. Furubayashi, T. Nakatani, H.S. Goripati, H. Sukegawa, Y. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using $\text{Co}_2\text{FeAl}_{1-x}\text{Si}_x$ Heusler alloys, IEEE International Conference on Magnetism, 2011/4/30, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan.

⑧ T.M. Nakatani, T. Furubayashi and K. Hono, Large interfacial scattering in CPP-GMR devices using $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}_{10.5}\text{Si}_{0.5})$ and Ag, 55th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2010/11/16, Hyatt Regency Atlanta, USA.

⑨ 古林孝夫, 中谷友也, H. S. Goripati, 介川裕章, 高橋有紀子, 猪俣浩一郎, 宝野和博, $\text{Co}_2\text{FeAl}_{1-x}\text{Si}_x$ ホイスラー合金を用いた CPP-GMR 素子における MR の組成依存性, 第 34 回日本磁気学会学術講演会, 2010/9/7, つくば国際会議場, つくば.

⑩ 中谷友也, 古林孝夫, 葛西伸哉, 介川裕章, 高橋有紀子, 三谷誠司, 宝野和博, $\text{Co}_2\text{FeAl}_{10.5}\text{Si}_{0.5}$ ホイスラー合金 CPP-GMR のスピン依存散乱, 第 34 回日本磁気学会学術講演会, 2010/9/7, つくば国際会議場, つくば.

⑪ 長谷直基, 中谷友也, 葛西伸哉, 高橋有紀子, 古林孝夫, 宝野和博, NiAl 耐熱層を挿入した CPP-GMR スピンバルブ, 第 34 回日本磁気学会学術講演会, 2010/9/7, つくば国際会議場, つくば.

⑫ 長谷直基, 中谷友也, 葛西伸哉, 高橋有紀子, 古林孝夫, 宝野和博, $\text{Co}_2\text{MnGaSn}/\text{Ag}$ 界面に挿入した CoFe 層の磁気抵抗効果への影響, 第 34 回日本磁気学会学術講演会, 2010/9/7, つくば国際会議場, つくば.

⑬ N. Hase, T.M. Nakatani, B. Varaprasad, S. Kasai, Y.K. Takahashi, T. Furubayashi and K. Hono, CPP spin-valves using heat-resistant NiAl layers, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2010, 2010/7/14, 仙台国際センター, 仙台.

⑭ T.M. Nakatani, T. Furubayashi, S. Kasai, H. Sukegawa, Y.K. Takahashi, S. Mitani and K. Hono, Bulk scattering contribution to CPP-GMR of $\text{Co}_2\text{FeAl}_{10.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Ag} / \text{Co}_2\text{FeAl}_{10.5}\text{Si}_{0.5}$ trilayer, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2010,

2010/7/14, 仙台国際センター, 仙台.

⑮ 古林孝夫, 中谷友也, HARI Goripati, 小玉恒太, 介川裕章, 高橋有紀子, 猪俣浩一郎, 宝野和博, ホイスラー合金エピタキシャル膜を用いた CPP-GMR 素子, 日本金属学会 2010 年春期大会, 2010/3/30, 筑波大学, つくば.

⑯ 古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, ハーフメタル薄膜の作製と応用, 第 50 回真空に関する連合講演会, 2009/11/4, 学習院大学, 東京.

⑰ 古林孝夫, 小玉恒太, 中谷友也, 介川裕章, 高橋有紀子, 猪俣浩一郎, 宝野和博, エピタキシャルホイスラー合金層と Ag スペーサー層を用いたスピバルブの CPP-GMR, 第 33 回日本磁気学会学術講演会, 2009/9/12, 長崎大学, 長崎.

⑱ 古林孝夫, 小玉恒太, 中谷友也, B. Varaprasad, A. Rajanikanth, S. Karthik, 高橋有紀子, 介川裕章, 猪俣浩一郎, 宝野和博, ハーフメタルホイスラー合金の材料開発と CPP-GMR への応用, 第 30 回ナノマグネティクス専門研究会, 2009/6/26, 化学会館, 東京.

⑲ T. Furubayashi, K. Kodama, T.M. Nakatani, H. Sukegawa, R. Shan, W. Wang, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Development of Heusler materials and high $\Delta R/R$ in CPP-GMR, IEEE International Magnetism Conference 2009, 2009/5/7, Sacramento convention center, Sacramento, USA.

⑳ 古林孝夫, 中谷友也, 小玉恒太, 介川裕章, 高橋有紀子, 猪俣浩一郎, 宝野和博, ホイスラー合金エピタキシャル膜を用いた CPP-GMR 素子の作製, 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009/4/2, 筑波大学, つくば.

㉑ 古林孝夫, 小玉恒太, 介川裕章, 高橋有紀子, 猪俣浩一郎, 宝野和博, ホイスラー合金 $\text{Co}_2\text{FeAl}_{10.5}\text{Si}_{0.5}$ を用いた CPP-GMR 素子の作製と伝導特性, 日本金属学会 2009 年春期大会, 2009/3/30, 東京工業大学, 東京.

㉒ 小玉恒太, 古林孝夫, 介川裕章, 中谷友也, 高橋有紀子, 猪俣浩一郎, 宝野和博, Co_2MnSi ホイスラー合金を用いた CPP-GMR, 日本金属学会 2009 年春期大会, 2009/3/30, 東京工業大学, 東京.

㉓ 古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, ホイスラー合金ハーフメタル探索とその CPP-GMR への応用, 磁気記録・情報ストレージ研究会, 2008/11/21, 早稲田大学, 東京.

㉔ T. Furubayashi, K. Kodama, H. Goripati, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Interlayer exchange coupling in $\text{Co}_2\text{FeAl}_{10.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Cr} / \text{Co}_2\text{FeAl}_{10.5}\text{Si}_{0.5}$ trilayers, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2008/11/14, Hilton Austin, Austin, USA.

㉕ K. Kodama, T. Furubayashi, T.

Nakatani, H. Sukegawa, K. Inomata and K. Hono, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance of a spin valve using Co₂MnSi Heusler alloy electrodes, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2008/11/14, Hilton Austin, Austin, USA.

②⑥ T. Furubayashi, K. Kodama, H. Sukegawa, Y.K. Takahashi, K. Inomata and K. Hono, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in spin-valve structures using epitaxial Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/Ag/Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} trilayers, 53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2008/11/13, Hilton Austin, Austin, USA.

②⑦ 古林孝夫、小玉恒太、H. Goripati、高橋有紀子、猪俣浩一郎、宝野和博、Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}/Cr/Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} 3層膜における層間磁気結合、第32回日本磁気学会学術講演会、2008/9/14、東北学院大学、多賀城。

②⑧ 小玉恒太、古林孝夫、中谷友也、介川裕章、猪俣浩一郎、宝野和博、Co₂MnSiホイスラー合金を用いたCPP-GMR、第32回日本磁気学会学術講演会、2008/9/14、東北学院大学、多賀城。

②⑨ 古林孝夫、小玉恒太、介川裕章、高橋有紀子、猪俣浩一郎、宝野和博、ホイスラー合金Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5}エピタキシャル膜によるCPP-GMR、第32回日本磁気学会学術講演会、2008/9/13、東北学院大学、多賀城。

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

① 名称：磁性薄膜素子

発明者：古林孝夫、小玉恒太、高橋有紀子、介川裕章、猪俣浩一郎、宝野和博

権利者：(独)物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2008-219619

出願年月日：2008年8月29日

国内外の別：国内

② 名称：Co₂基ホイスラー合金とそれを用いたスピントロニクス素子

発明者：高橋有紀子、アナアタクリシュナン スリニバサン、ボラプラガタバラプラサド、アラナボルラジニカンス、シンハジェイヴァーダン、林将光、古林孝夫、宝野和博

権利者：(独)物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2011-002410

出願年月日：2011年1月7日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

http://www.nims.go.jp/apfim/kakenhiB_CPP.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古林 孝夫 (FURUBAYASHI TAKAO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・主席研究員

研究者番号：80354348

(2) 研究分担者

宝野 和博 (HONO KAZUHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・フェロー

研究者番号：60229151

高橋 有希子 (TAKAHASHI YUKIKO)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・主幹研究員

研究者番号：50421392

(3) 連携研究者

介川 裕章 (SUKEGAWA HIROAKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・研究員

研究者番号：30462518