

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25249087

研究課題名(和文) 高スピン分極ホイスラー合金を用いた超高密度磁気記録用磁気センサーの開発

研究課題名(英文) Development of read sensors for ultra high density magnetic recording using Heusler alloys with high spin polarization

研究代表者

古林 孝夫 (Furubayashi, Takao)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主席研究員

研究者番号：80354348

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：高密度記録を実現するためのセンサー素子として面直電流巨大磁気抵抗(CPP-GMR)に着目し、高スピン分極ホイスラー合金を用いた素子を作成した。エピタキシャル膜の結晶方位依存性、新規スペーサー材料の開発により大きな磁気抵抗出力が得られた。また高密度磁気記録のために有望と考えられる面内スピンバルブ型素子についても研究し、ホイスラー合金の高いスピン分極率のより大きな出力が得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：We studied CPP-GMR devices using Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) (CFGG) Heusler alloy for FM layers. New materials of CsCl-type B2 alloys, NiAl, CuZn and AgZn, for the spacer layer. For NiAl, we prepared epitaxial layers with the different crystal orientations, [100] and [110], and examined the influence on the MR. The alloys CuZn and AgZn were selected as bcc alloys without heavy or magnetic elements for eliminating strong spin and spin-orbit scattering effects in the spacer layer. Large MR was observed for AgZn spacer layer. We also examined lateral spin valves using CFGG and showed that large output voltage is obtained by the high spin polarization of the Heusler alloys.

研究分野：磁性材料、磁性物理、スピントロニクス

キーワード：CPP-GMR 面内スピンバルブ素子 ホイスラー合金 スピン分極

## 1. 研究開始当初の背景

ハードディスクの主要な構成要素として読み取りヘッドがある。読み取りヘッドは記録媒体からの磁界を電圧出力として検出する磁気センサーであり、現在はトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子、すなわち 1 nm 程度の薄い絶縁体膜を介した 2 層の強磁性体層の磁化が互いに平行か反平行かでトンネル電流が大きく変化する素子、を用いたヘッドが使われている。記録密度を現状の 3 倍以上の 2 Tbit/in<sup>2</sup> に高めるためには、ヘッド素子の縦横の大きさ及び総膜厚としていずれも 20nm 程度以下とすることが必要とされる。

小型化のために生ずる第一の問題は素子の抵抗値である。抵抗値は面積に反比例して大きくなるが、高いデータ転送速度のためには素子抵抗を低くする必要がある。抵抗×面積 (RA 値) を小さくし、同時に十分な出力を得るために大きな磁気抵抗変化率 (MR 比) が必要である。現在主流である TMR ヘッドは、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、低い RA 値の素子を得ることは困難である。

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面直電流巨大磁気抵抗 (CPP-GMR) の利用が有望である。これは TMR での絶縁体層を金属のスペーサ層で置き換えたものであり、本質的に電気抵抗が低く高速素子に適しているが、100% を超える磁気抵抗比が容易に得られる TMR に対し、通常の強磁性材料を用いた CPP-GMR ではその値は数% と低く、実用化のためには飛躍的な増大が求められていた。

我々はこれまで、高い磁気抵抗 (MR) 値を得るために高いスピントランスポート率を持つ Co 基ホイスラー合金を探索し、それらの新強磁性合金を電極とした CPP-GMR 素子の開発を進めてきた。スペーサ層の選択として電気伝導や格子整合の観点から Ag が適当であることを世界で始めて見だし、Co<sub>2</sub>Fe(Al<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>) との 3 層膜において 30%、さらに新たに見出した合金 Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) を用いることにより世界最高値の 42% (RA=0.02 μm<sup>2</sup>) の磁気抵抗比を得ている。しかしながらに照らし合わせてみると、2Tb/in<sup>2</sup> の記録密度のためにはさらなる高 MR 化を実現する必要がある。

抵抗値の問題に加え、膜厚の制限も厳しい問題となってくる。従来の TMR 素子には一方の磁性層の磁化を固定するために反強磁性層を用いた交換結合スピントランスポート素子が使われているが、その効果を得るためには 20 nm 以上の積層膜が必要であり、2 Tbit/in<sup>2</sup> 仕様の 20 nm 以下という制限をクリアすることは難しい。この問題を解決のために全く新しい構造である面内スピントランスポート素子が有望である。この新型の素子においても高い磁気抵抗比を実現する必要がある。

## 2. 研究の目的

上述のような背景のもと、CPP-GMR 型の素子について MR 特性をさらに向上させ、2 Tbit/in<sup>2</sup> 対応再生ヘッド用磁気センサー開発への道筋を示すために、以下の研究を行う。

(1) 高いスピントランスポート率を持つホイスラー合金薄膜を強磁性電極に適用し、高い MR 値の実現を目指す。合金組成、作成条件等の最適化によってスピントランスポート率を増大させる。また、新たな探索によって見出される可能性のある更にスピントランスポート率の高い新合金も採択する。

(2) CPP-GMR における膜の結晶方位の影響を調べる。これまで (001)[110]Hesler // (001)[100]Ag このエピタキシャル膜しか調べられていない。結果を踏まえ実用化に必須の多結晶薄膜を用いた素子へと展開する。

(3) スペーサ層としてこれまで用いられてきた Ag に加え、非磁性ホイスラー合金等を取りあげ、界面散乱の効果を増大させ高 MR 値をねらう。

(4) 新しいタイプの素子である面内スピントランスポート素子について、ホイスラー合金を用いた作製プロセスを確立し、高い出力の素子を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) これまであまりデバイスに用いられることのなかった C1b 型構造のハーフホイスラー合金 NiMnSb を用いて薄膜を作成し、異方性磁気抵抗測定及び CPP-GMR 素子の作製を行った。

(2) (001) 方位にホイスラー合金を (001) 方位でエピタキシャル成長させるために MgO (001) 単結晶基板が用いられてきたが、本研究ではサファイア (11-20) 基板を用いて Ta、W をバッファ層として用いることにより (110) 方位でホイスラー合金をエピタキシャル成長させ CPP-GMR 素子を作成しその特性を調べた。

(3) 新しいスペーサ材料として B2 型規則合金に着目した。比較的電気伝導度が高くスピントランスポート効果の効果が小さいと考えられる CuZn、および AgZn に着目しスペーサ材料に適用した。また、導電性酸化物 Mg<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.8</sub>O (MTO) を用いることにより高出力電圧を持ちデバイスの作製を試みた。

(4) 面内スピントランスポート素子の開発のためホイスラー合金薄膜を再選に切り出し、表面を汚染することなく in situ で非磁性細線と結合させるためのプロセスを開発した。これにより Cu 及び Ag を非磁性細線に用いた素子を作成した。

## 4. 研究成果

(1) C1b 型 NiMnSb 合金薄膜をスパッタにより作成し、負の異方性磁気抵抗によりハーフメタル性が示された。Ag をスペーサ層とし、NiMnSb/Ag/NiMnSb の層状構造による CPP-GMR 素子を作成した。室温で 4.2%、10K

で 13.2%とこれまで NiMnSb で得られたものよりも大きな MR 値を得た。

(2) Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) (CFGG) ホイスラー合金を用い、サファイア(11-20)基板に Ta、W をバッファ層とし、CFGG/Ag/CFGG の層状構造の CPP-GMR 素子を作成した。結晶方位が CFGG (110)、Ag(111)のエピタキシャル成長であることを確認した。最適化した熱処理条件の下で、室温で面積当たり磁気抵抗変化量として 9 m<sup>2</sup>・μm<sup>2</sup>を得た。この値は同じ材料・条件の下で(001)方位にエピタキシャル成長させた場合の約 10 m<sup>2</sup>・μm<sup>2</sup>に比べ小さな値となっている。この原因としては結晶構造の違いによって CFGG (110/Ag(111)界面での格子ミスマッチが大きいこと、界面での電子散乱によるものと考えられる。実際 CFGG と類似の結晶構造を持つ B2 型規則合金、NiAl をスペーサー層の用いた場合(110)と(110)の場合で大きな差はみられなかった。

(3) B2 型規則合金 CuZn 及び AgZn をスペーサー層に、磁性層には CFGG を用いた CPP-GMR 素子を作成した。

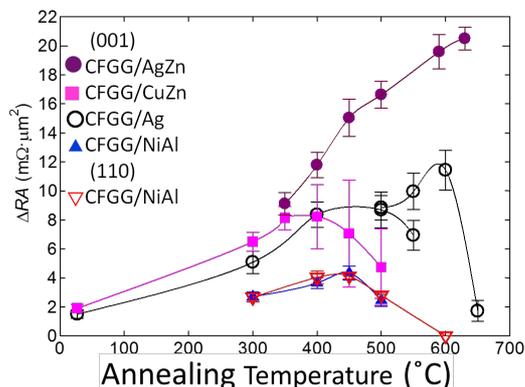


図 1: 各種スペーサー材料を用いた CPP-GMR 素子の熱処理温度に対する磁気抵抗変化量。

図 1 に示すように CuZn、AgZn とともに 350 °C 以下の熱処理温度では従来の Ag スペーサーの場合に比べ大きな値が得られている。さらに熱処理温度を高めると CuZn の場合は値が低下するが AgZn についてはさらに上昇し最大 21 m<sup>2</sup>・μm<sup>2</sup> と従来に比べ倍の大きな値が得られた。

TEM を用いた構造解析の結果、Zn は熱処理によって拡散することが示された。CuZn の場合は拡散によって層状構造に変化が生じそれが磁気抵抗の低下につながるものと考えられる。これに対し AgZn の場合は Zn が抜けても CFGG/Ag/CFGG の層状構造が保たれ、さらに Zn の拡散に伴って CFGG の L21 規則構造が増大することが解った。このことが大きな磁気抵抗の原因と考えられる。

(4) 新たに開発したプロセスにより Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>)を用いて図 2 に示すような面内スピバルブ型巨大磁気抵抗素子を作製した。Cu を非磁性細線材料として用いた試料で、4K で 54 mΩ、室温で 13 mΩ の大きな磁気抵抗出力が得られた。磁気抵抗の温度依

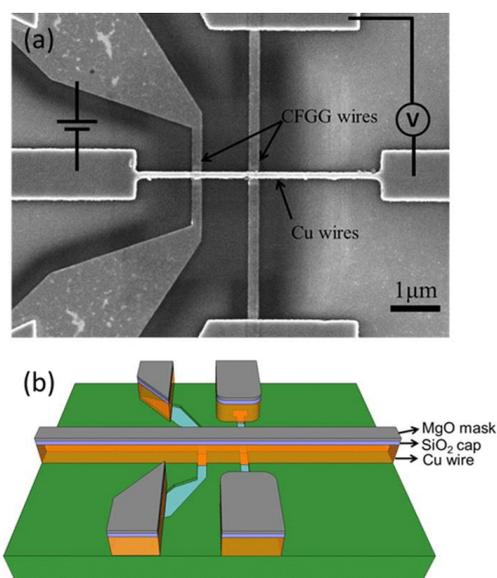


図 2: 面内スピバルブ型巨大磁気抵抗素子の SEM 新及び構造模式図。

存性の検討から、Cu 中のスピン拡散が温度による磁気抵抗の低下の主因であり、ホイスラー合金のスピン分極率は室温においても高いことが示された。

## 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 8 件)

Ikhtiar, S. Kasai, Y. K. Takahashi, T. Furubayashi, S. Mitani, and K. Hono, Temperature dependence of magneto-transport properties in Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>)/Cu lateral spin valves, *Appl. Phys. Lett.* 108, 062401 (2016), DOI 10.1063/1.4941549. 査読有。

B. Kwon, Y. Sakuraba, H. Sukegawa, S. Li, G. Qu, T. Furubayashi, and K. Hono, Anisotropic magnetoresistance and current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in epitaxial NiMnSb-based multilayers, *J. Appl. Phys.* 119, 023902 (2016), DOI 10.1063/1.4939557. 査読有。

T. Furubayashi, T.T. Sasaki, Y. Sakuraba, Y. K. Takahashi and K. Hono, Enhancement of current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in Heusler-alloy based pseudo spin valves by using a CuZn spacer layer, *J. Appl. Phys.* 118, 163901, (2015), 10.1063/1.4933397. 査読有。

Y. Du, T. Furubayashi, T.T. Sasaki, Y. Sakuraba, Y. K. Takahashi and K. Hono, Large magnetoresistance in current-perpendicular-to-plane pseudo spin-valves using Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) Heusler alloy and AgZn spacer, *Appl. Phys. Lett.* 107, 112405 (2015), DOI 10.1063/1.4930229. 査読有。

Y. Du, T. Furubayashi, Y. K. Takahashi, Y. Sakuraba and K. Hono, Polycrystalline CPP-GMR Pseudospin Valves Using 001 Tex-

tured Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) Layer Grown on a Conductive (Mg<sub>0.5</sub>Ti<sub>0.5</sub>)O Buffer Layer, IEEE Trans. Magn. 51, 4401204 (2015), DOI 10.1109/TMAG.2015.2442592. 査読有.

J.M. Chen, S.T. Li, T. Furubayashi, T.K. Takahashi and K. Hono, Crystal orientation dependence of current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance of pseudo spin-valves with epitaxial Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy layers, J. Appl. Phys. 115, 233905, (2014), DOI 10.1063/1.48182736. 査読有.

Y. Sakuraba, S. Kokado, Y. Hirayama, T. Furubayashi, H. Sukegawa, S. Li, Y.K. Takahashi, and K. Hono, Quantitative analysis of anisotropic magnetoresistance in Co<sub>2</sub>MnZ and Co<sub>2</sub>FeZ epitaxial thin films, Appl. Phys. Lett.104, 172407 (2013), DOI 10.1063/1.4874851. 査読有.

Ye Du, B. S. D. Ch. S. Varaprasad, Y. K. Takahashi, T. Furubayashi and K. Hono, 100 textured polycrystalline current-perpendicular-to-plane pseudo spin-valves using Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) Heusler alloy, Appl. Phys. Lett.103 (2013) 202401, DOI 10.1063/1.4829633. 査読有.

〔学会発表〕(計 38 件)

J. Chen, Y. Sakuraba, S. Li, T. Furubayashi and K. Hono, Enhancement of L21 ordering and spin-polarization of Co<sub>2</sub>FeSi thin film by substitution of Fe with Ti, 応用物理学会春季講演会, 2016/3/19-22, 東京工業大学(東京都・目黒区).

Y. Du, T. Furubayashi, T.T. Sasaki, Y. Sakuraba, Y. K. Takahashi and K. Hono, CPP-GMR devices using Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) full Heusler alloy and a AgZn alloy spacer, 13th Joint MMM-Intermag Conference, 2016/1/11-16, San Diego, USA.

Y. Du, T. Furubayashi, Y. K. Takahashi, Y. Sakuraba and K. Hono, Polycrystalline CPP-GMR pseudo spin-valves using <001> textured Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) layer grown on conductive Mg<sub>0.5</sub>Ti<sub>0.5</sub>Ox buffer layer, Intermag 2015, 2015/5/11-15 Beijing, China.

桜庭裕弥, S. Li, 古林孝夫, 宝野和博, Co基ホイスラー合金薄膜におけるバルクスピンの偏極率と異方性磁気抵抗効果(招待講演), 日本金属学会 2015 年秋期講演大会, 2015/9/16-18, 九州大学(福岡県・福岡市).

J. Chen, 桜庭裕弥, 古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, Enhancement of L21 ordering and spin-polarization of Co<sub>2</sub>FeSi thin film by substitution of Fe with Ti, 日本金属学会 2015 年秋期講演大会, 2015/9/16-18, 九州大学(福岡県・福岡市).

古林孝夫, DU Ye, 佐々木泰祐, 桜庭裕弥, 高橋有紀子, 宝野和博, ホイスラー合金を用いた CPPGMR におけるスペーサー材料の効果, 日本金属学会 2015 年秋期講演大会, 2015/9/16-18, 九州大学(福岡県・福岡市).

DU Ye, 古林孝夫, 佐々木泰祐, 桜庭裕弥, 高橋有紀子, 宝野和博, CPP-GMR devices using Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) full Heusler alloy and a AgZn alloy spacer, 2015/9/13-16, 応用物理学会秋季講演会, 名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市).

DU Ye, 古林孝夫, 佐々木泰祐, 桜庭裕弥, 高橋有紀子, 宝野和博, CPP-GMR devices using Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) full Heusler alloy and a AgZn alloy spacer, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015/9/8-11, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).

S. Li, 高橋有紀子, 桜庭裕弥, 古林孝夫, 宝野和博, Improvement of MR output in Co<sub>2</sub>MnGa<sub>0.25</sub>Ge<sub>0.75</sub> Heusler alloy based CPP-GMR devices through composition tuning, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 2015/9/8-11, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).

T. Furubayashi, Y. Du, J. Chen, S. Li, T.T. Sasaki, Y. Sakuraba, Y. K. Takahashi and K. Hono, Effects of spacer materials in Heusler-alloy-based CPP-GMR devices for read sensors, The 26th Magnetic Recording Conference (招待講演), 2015/8/16-18, Minneapolis, USA.

古林孝夫, Y. Du, J. Chen, S. Li, 佐々木泰祐, 桜庭裕弥, 高橋有紀子, 宝野和博, ホイスラー合金を用いた CPP-GMR における界面の効果, 第 64 回ナノマグネティクス専門研究会(招待講演), 2015/6/26, 中央大学駿河台記念館(東京都・千代田区).

古林孝夫, 高橋有紀子, 佐々木泰祐, 宝野和博, Enhancement of CPP-GMR by a CuZn alloy spacer layer, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015/3/11-14, 東海大学(神奈川県・平塚市).

Ikhtiar, S. Kasai, A. Itoh, Y. K. Takahashi, T. Ohkubo, S. Mitani and K. Hono, Polycrystalline CPP-GMR devices using <001> textured Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) Heusler alloy layer and conductive Mg<sub>0.5</sub>Ti<sub>0.5</sub>Ox buffer layer, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015/3/11-14, 東海大学(神奈川県・平塚市).

Y. Du, T. Furubayashi, Y. K. Takahashi, Y. Sakuraba, K. Hono, Polycrystalline CPP-GMR devices using <001> textured Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) Heusler alloy layer and conductive Mg<sub>0.5</sub>Ti<sub>0.5</sub>Ox buffer layer, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015/3/11-14, 東海大学(神奈川県・平塚市).

J.M. Chen, S.T. Li, T. Furubayashi, T.K. Takahashi, T.T. Sasaki and K. Hono, Crystal orientation dependence in all-B2-trilayer current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance pseudo spin-valves using Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy and NiAl spacer, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015/3/11-14, 東海大学(神奈川県・平塚市).

Y. Sakuraba, Y. Hirayama, T. Furubayashi, H. Sukegawa, Y. K. Takahashi, S.T. Li and K. Hono, Novel approach to investigate spin-polarization

in half-metallic Heusler compounds via anisotropic magnetoresistance effect (invited), The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials, 2014/11/3-7, Honolulu, USA.

J.M. Chen, S.T. Li, T. Furubayashi, T.K. Takahashi and K. Hono, Crystal orientation dependence of band matching in all-B2-trilayer current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance pseudo spin-valves using Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy and NiAl spacer, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials, 2014/11/3-7, Honolulu, USA.

T. Furubayashi, Y. K. Takahashi and K. Hono, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance using a Heusler alloy for ferromagnetic layers and B2-ordered CuZn for a spacer layer, The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials, 2014/11/3-7, Honolulu, USA.

J.M. Chen, S.T. Li, T. Furubayashi, Y.K. Takahashi, T.T. Sasaki and K. Hono, Crystal orientation dependence of band matching in all-B2-trilayer current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance pseudo spin-valves using Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy and NiAl spacer, 日本磁気学会学術講演会, 2014/9/2-5, 慶応義塾大学 (神奈川県・横浜市) .

古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, bcc型 Cu基合金をスペーサー層に用いた CPPGMR, 日本磁気学会学術講演会, 2014/9/2-5, 慶応義塾大学 (神奈川県・横浜市) .

②① Y. Du, T. Furubayashi, Y. K. Takahashi, Y. Sakuraba, K. Hono, CPP-GMR pseudo spin-valves using ferromagnetic Heusler layer Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>) and nonmagnetic Heusler spacer Cu<sub>2</sub>CrAl, 日本磁気学会学術講演会, 2014/9/2-5, 慶応義塾大学 (神奈川県・横浜市) .

②② Y. Sakuraba, Y. Hirayama, T. Furubayashi, H. Sukegawa, Y. K. Takahashi, S.T. Li and K. Hono, Quantitative analysis of AMR effect in half-metallic Heusler compounds films : comparison with magneto-transport in CPP-GMR devices, 2014/5/4-8, IEEE International Conference on Magnetism, Dresden, Germany.

②③ S.T. Li, J.M. Chen, Y. K. Takahashi, Y. Sakuraba, T. Furubayashi and K. Hono, CPP-GMR in all Heusler alloy Co<sub>2</sub>MnGe<sub>0.75</sub>Ga<sub>0.25</sub>/Cu<sub>2</sub>TiAl/Co<sub>2</sub>MnGe<sub>0.75</sub>Ga<sub>0.25</sub> pseudo spinValves, 2014/5/4-8, IEEE International Conference on Magnetism, Dresden, Germany.

②④ Ikhtiar, 葛西伸哉, 伊藤彰秀, 高橋有紀子, 大久保忠勝, 三谷誠司, 宝野和博, Magneto-transport properties of Co<sub>2</sub>FeGa<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>/Cu lateral spin valve devices, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014/3/17-20, 青山学院大学 (神奈川県・相模原市) .

②⑤ DU Ye, Varaprasad B., 古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, <001>-textured polycrystalline current-perpendicular-to-plane pseudo spin-valves using full Heusler alloy

Co<sub>2</sub>Fe(Ga<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub>), 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014/3/17-20, 青山学院大学 (神奈川県・相模原市) .

②⑥ CHEN Jiamin, LI Songtian, 古林孝夫, 高橋有紀子, 宝野和博, Structural and magneto-transport properties of CPP-GMR pseudo spin-valves with (110) epitaxial layers of Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 2014/3/17-20, 青山学院大学 (神奈川県・相模原市) .

②⑦ Y. Du, B. Varaprasad, T. Furubayashi, Y. K. Takahashi and K. Hono, (001)-textured polycrystalline current-perpendicular-to-plane pseudo spin-valves using full Heusler alloy, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013/11/4-8, Denver, USA.

②⑧ S. Li, Y. K. Takahashi, T. Furubayashi and K. Hono, Enhancement of giant magnetoresistance by L21 ordering in Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy current-perpendicular-to-plane pseudo spin valves, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013/11/4-8, Denver, USA.

②⑨ S. Li, Y. K. Takahashi, H. Goripati, T. Furubayashi and K. Hono, Current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance in pseudo spin valves with Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloy ferromagnetic layers and Cu/Ag spacers, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013/11/4-8, Denver, USA.

③⑩ J. Chen, S. LI, T. Furubayashi, Y. K. Takahashi and K. Hono, Structural and magneto-transport properties of CPP-GMR pseudo spin-valves with (110) epitaxial layers of Co<sub>2</sub>Fe(Ge<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>) Heusler alloys, 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013/11/4-8, Denver, USA.

他 8 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 5 件)

名称：磁気抵抗素子、当該磁気抵抗素子を用いた磁気ヘッド及び磁気再生装置

発明者：ドゥイエ/古林孝夫/佐々木泰佑/桜庭裕弥/高橋有紀子/宝野和博

権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2016-151330

出願年月日：2016/8/1

国内外の別：国内

名称：磁気抵抗素子、その用途及び製造方法、並びにホイスラー合金の製造方法

発明者：ドゥイエ/古林孝夫/佐々木泰祐/桜庭裕弥/高橋有紀子/宝野和博  
権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許  
番号：特願 2015-148660  
出願年月日：2015/7/28  
国内外の別：国内

名称：磁気抵抗素子、当該磁気抵抗素子を用いた磁気ヘッド及び磁気再生装置

発明者：古林孝夫、高橋有紀子、宝野和博  
権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許  
番号：PCT/JP2015/071313  
出願年月日：2015/7/28  
国内外の別：国外

名称：磁気抵抗素子、当該磁気抵抗素子を用いた磁気ヘッド及び磁気再生装置

発明者：古林孝夫/高橋有紀子/宝野和博  
権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許  
番号：特願 2014-15746  
出願年月日：2014/8/1  
国内外の別：国内

名称：磁気抵抗素子、当該磁気抵抗素子を用いた磁気ヘッド及び磁気再生装置

発明者：ドゥイエ/古林孝夫/高橋有紀子/宝野和博  
権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許  
番号：PCT/JP2014/059778  
出願年月日：2014/4/2  
国内外の別：国外

○取得状況（計 1 件）

名称：電流垂直型磁気抵抗効果素子  
発明者：ドゥイエ/古林孝夫/高橋有紀子/宝野和博

権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許  
番号：US patent 9589583  
取得年月日：2017/3/7  
国内外の別：国外

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

古林 孝夫 (Furubayashi, Takao)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主席研究員  
研究者番号：80354348

### (2)研究分担者

高橋 有紀子 (Takahashi, Yukiko)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・グループリーダー  
研究者番号：50421392

### (3)連携研究者

宝野 和博 (Hono, Kazuhiro)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・フェロー  
研究者番号：60229151

葛西 伸哉 (Kasai, Shinya)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員  
研究者番号：20378855

桜庭 裕弥 (Sakuraba, Yuya)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員  
研究者番号：10451618

佐々木 泰祐 (Sasaki, Taisuke)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員  
研究者番号：30615993

中谷 友也 (Nakatani, Tomoya)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・主任研究員  
研究者番号：60782646

### (4)研究協力者

LI Songtian (リー ソンチャン)  
IKHTIAR (イクティアル)  
DU Ye (ドゥ イエ)  
CHEN Jiamin (チェン ジアミン)