

機関番号：10101

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007 ～ 2010

課題番号：19048001

研究課題名（和文）

ハーフメタル系材料を用いた高効率スピン源の探索と創出

研究課題名（英文）

Exploration and creation of highly efficient spin sources using half-metallic ferromagnets

研究代表者

山本 眞史 (YAMAMOTO MASAFUMI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：10322835

研究成果の概要（和文）：電子の電荷に加えて、電子のスピンを併せて活用するスピントロニクスにおいてスピン源が必須である。本研究では、ホイスラー合金が潜在的に有する、スピン源として理想的なハーフメタル特性を、デバイス構造の中で実現するための重要な知見を明らかにした。具体的には、ホイスラー合金薄膜組成の適切な制御により、ハーフメタル特性に対して特に有害となる欠陥の抑制が可能となり、ハーフメタル特性が顕著に増大することを明らかにした。さらに、これに合わせてホイスラー合金と MgO バリアからなるエピタキシャルヘテロ界面構造の向上により、優れたデバイス特性が得られることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A highly efficient spin-polarized electron source or spin source is a key element for spintronic devices, in which both the charge and the spin of the electron are utilized as the information carrier. Heusler alloys thin films have attracted much interest as spin sources because of the half-metallic nature theoretically predicted for many of these alloys. It was found that detrimental defects can be reduced by appropriately controlling the film composition of Heusler alloys. It was also shown that the suppression of detrimental defects led to a significant enhancement of the half-metallic nature of Heusler alloy thin films in device structures. Excellent device characteristics were demonstrated for fabricated magnetic tunnel junctions with Heusler alloy electrodes and a MgO barrier by improving the interfacial structures in addition to the above-mentioned enhancement of the half-metallic nature.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,600,000	0	7,600,000
2008 年度	9,600,000	0	9,600,000
2009 年度	9,600,000	0	9,600,000
2010 年度	7,600,000	0	7,600,000
年度			
総計	34,400,000	0	34,400,000

研究分野：スピントロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：スピン源, ハーフメタル, ホイスラー合金, スピントロニクス, スピン偏極率

## 1. 研究開始当初の背景

次世代のエレクトロニクス, あるいは, 量子情報処理において, 固体中の電子の電荷とスピンの自由度を併せて用いるスピントロ

ニクスの研究が注目を集めている。スピントロニクスデバイスの研究において, スピン源は最も基本的な構成要素である。スピン源として理想的と考えられる材料系の有力候補

の一つは、1983年に de Groot によってその概念が提唱された、フェルミレベルにおいてスピン偏極率が 100%となるハーフメタル強磁性体である。理論的にハーフメタル特性が指摘されているハーフメタル系材料の中でも、Co 基ホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{YZ}$  (Y は遷移金属元素, Z は主族元素) は、強磁性転位温度が室温よりも十分に高いという特徴を有する。研究開始当時、本研究グループは、 $\text{Co}_2\text{YZ}$  薄膜と MgO トンネルバリアからなるヘテロ構造のエピタキシャル成長技術を提案、実証するとともに、室温で比較的良好的な強磁性トンネル接合デバイス特性を報告した。

## 2. 研究の目的

ハーフメタル系ホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{YZ}$  薄膜と MgO バリアを組み合わせた単結晶エピタキシャルヘテロ構造を技術の核として、 $\text{Co}_2\text{YZ}$  物質群を広く探索し強磁性体あるいは半導体に対する高効率スピン源を創出することを目的としている。さらに、ホイスラー合金薄膜をスピン源として活用するためには、異種材料とのヘテロ構造が必要となる。このため、強磁性トンネルデバイスおよび半導体へのスピン注入に共通するヘテロ構造である  $\text{Co}_2\text{YZ}/\text{MgO}$  ヘテロ構造におけるスピン輸送特性を決める支配要因を明らかにし、高いトンネルスピン偏極率をヘテロ構造の中で実現することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) ハーフメタル系ホイスラー合金物質群に着目し、高効率スピン源を実現するために、次の3つの課題について、研究代表者と研究分担者がそれぞれ担当し、相互に有機的に連携して研究を推進した。

①  $\text{Co}_2\text{YZ}$  薄膜/MgO バリアからなるヘテロ構造を用いたスピン源の製作技術。

②  $\text{Co}_2\text{YZ}$  薄膜および  $\text{Co}_2\text{YZ}/\text{MgO}$  ヘテロ界面の評価。

③ スピン依存トンネル特性の解明とヘテロ構造において高いスピン偏極率を実現するための指針の明確化。

(2) 上記の課題をさらに具体化した以下の研究テーマについて、特定領域内の他の研究グループとの相補的な関係による共同研究を推進した。①  $\text{Co}_2\text{YZ}$  薄膜および  $\text{Co}_2\text{YZ}/\text{MgO}$  ヘテロ界面の断面透過電子顕微鏡観察と電子回折による構造評価、② X 線磁気円二色性実験と理論検討による、界面近傍の電子的・磁気的状態の研究。

## 4. 研究成果

(1) 基盤技術として、ホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{YZ}$  薄膜を下部電極と上部電極の両方に用いた、すべての層がエピタキシャル構造からなり、かつ、界面の急峻性と平坦性に優れた

$\text{Co}_2\text{YZ}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{YZ}$  強磁性トンネル接合 (MTJ) 製作技術を開発した ( $\text{Co}_2\text{YZ}$ :  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnGe}$ ,  $\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Al}$ )。さらに、室温において良好なデバイス特性を実証した。特に、 $\text{Co}_2\text{YZ}$  上部電極/MgO バリアからなるヘテロ構造は、MTJ におけるスピン源にとどまらず、半導体へのスピン注入源としても働くものであり、デバイス応用として重要な位置づけにある。

(2) ハーフメタル系ホイスラー合金の一つである  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  を下部・上部両電極に用いた、 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ ( $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ) におけるトンネル機構と電子構造を、トンネルスペクトロスコピーにより調べ、以下の知見を得た、

① 磁化反平行および平行に対する比較的広い電圧領域での  $dI/dV-V$  特性より、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  が明瞭なハーフメタルギャップを有し、フェルミレベルがハーフメタルギャップのほぼ中間に位置すること。

② 磁化反平行に対する  $V \sim \pm 4$  mV での  $d^2I/dV^2$  vs.  $V$  特性におけるピークの存在より、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ において、界面準位へのトンネルと、コレクタ電極でのホットエレクトロンによるマグノン励起を介したスピンプリップ過程が重要な役割を果たすこと。

(3) ハーフメタル特性が理論的に指摘されている  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  について、Co に対する Mn 組成を 2:1 よりも Mn 過剰にすることにより、ハーフメタル特性が向上し、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  を用いた強磁性トンネル接合のトンネル磁気抵抗比が、化学量論的組成の場合よりも、大幅に増大することを実証した。さらに、Mn 過剰の組成におけるスピン偏極率の増大は、ハーフメタル特性を阻害するとして理論的に指摘されていた、Mn サイトを Co が置換する  $\text{Co}_{\text{Mn}}$  アンチサイトが Mn 過剰の組成により抑制されるためというモデルにより説明できることを示した。また、高い TMR 比が  $\text{Co}_2\text{Mn}_a\text{Si}$  薄膜の Mn 組成  $a$  について、Mn 過剰 ( $a > 1$ ) の比較的広い領域で得られることを明らかにした。さらに、同様の結果が  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  薄膜についても得られることを示した。

(4) ハーフメタル系  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  と MgO バリアを用いたエピタキシャル MTJ のスピン輸送特性に対する支配要因をさらに明らかにするために、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  との格子ミスマッチが 0.8% と極めて小さい  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$  (CoFe) をバッファ層として用いた  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ を作製し、そのスピン輸送特性を、従来の MgO バッファ上に作製した  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ と比較して調べた。この結果、以下の成果を得た。① CoFe バッファの導入により、4.2 K で 1804%、室温で 344% の高いトンネル磁気抵抗 (TMR) 比を実証した。② また、規格化された TMR 比の温度依存性は、CoFe バッファあるいは

MgO バッファを用いた 2 つの  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ に対して、ほぼ同一に近いことを明らかにした。③ 構造評価により、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  下部・上部電極と MgO バリアの両方におけるミスフィット転位密度が、CoFe バッファを用いた  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ では低減し、MgO バッファを用いた  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  MTJ に比較して約  $2/3$  となっていることが分かった。④ これらの実験結果より、CoFe バッファの導入により得られた高い TMR 比は、直接的には、界面のミスフィット転位の低減により、コヒーレントトンネリングの寄与が増大することに由来すると考えられる。より広い観点から、この高い TMR 比の要因を考えると、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  の潜在的なハーフメタル性のために、少数スピンバンドのフェルミレベルにおける状態密度が本質的に低いこと、さらにそれに加えて、コヒーレントトンネリングの増大が重なったためと考えられる。

(5) Co 過剰の非化学量論的組成のホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  と MgO トンネルバリアの界面における Co と Mn の磁気状態を、特定領域における藤森グループとの共同研究により X 線磁気円二色性実験を通して明らかにした。すなわち、Co-rich の  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  薄膜の Co のスピンモーメントは、膜厚の広い範囲にわたって、化学量論的組成の  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  に対する理論値よりも大きく、この増加分は Co 過剰の  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  に予想される  $\text{Co}_{\text{Mn}}$  アンチサイトの存在によって説明できることを明らかにした。

(6) 以上、本研究の成果は、Co 基ホイスラー合金のハーフメタル特性を高効率スピン源として活用するための基礎的知見を明らかにしたものである。特に、本研究で得られた、 $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Si}, \text{Ge}$ ) 薄膜の組成として Mn 過剰の組成を用いることによるハーフメタル特性に対する阻害要因の抑制効果は顕著である。また、上記の知見によるハーフメタル特性の増大に合わせて、 $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}$  ヘテロ界面のエピタキシャル成長の改善により、低温 4.2 K で 1800% 程度、室温で 340% 程度の高いトンネル磁気抵抗比を実証している。以上の結果は、今後のハーフメタルホイスラー合金薄膜のスピン트로ニクスデバイス応用が非常に有望であることを示している。また、本研究で得られた知見、すなわち、(i)  $\text{Co}_2\text{MnZ}$  ( $Z = \text{Si}, \text{Ge}$ ) 薄膜組成の適切な制御と、(ii) ハーフメタル特性とコヒーレントトンネリングの併せた活用の重要性は、ハーフメタルホイスラー合金薄膜のスピン트로ニクスデバイスへの応用に大きな指針を与えるものである。

## 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 32 件)

- [1] T. Uemura, M. Harada, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, "Influence of GaAs surface structure on tunneling anisotropic magnetoresistance and magnetocrystalline anisotropy in epitaxial  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{n-GaAs}$  junctions", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, 102503 (3pp), 2011, 査読有.
- [2] D. Asakura, T. Koide, S. Yamamoto, K. Tsuchiya, T. Shioya, K. Amemiya, V. R. Singh, T. Kataoka, Y. Yamazaki, Y. Sakamoto, A. Fujimori, T. Taira, and M. Yamamoto, "Magnetic states of Mn and Co atoms at  $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{MgO}$  interfaces seen via soft x-ray magnetic circular dichroism", *Phys. Rev. B*, vol. 82, 184419 (8pp), 2010, 査読有.
- [3] T. Uemura, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, "Internal electric field influence on tunneling anisotropic magnetoresistance in epitaxial ferromagnet/n-GaAs junctions", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, 252106 (3pp), 2010, 査読有.
- [4] T. Marukame, T. Ishikawa, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, "Giant Oscillations in Spin-Dependent Tunneling Resistances as a Function of Barrier Thickness in Fully Epitaxial Magnetic Tunnel Junctions with a MgO Barrier", *Phys. Rev. B*, vol. 81, 134432 (5pp), 2010, 査読有.
- [5] T. Saito, T. Katayama, T. Ishikawa, M. Yamamoto, D. Asakura, T. Koide, M. Miura, and M. Shirai, "Interface Structure of Half-Metallic Heusler Alloy  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  Thin Films Facing an MgO Tunnel Barrier Determined by X-ray Magnetic Circular Dichroism", *Phys. Rev. B*, vol. 81, 144417 (6pp), 2010, 査読有.
- [6] M. Yamamoto, T. Ishikawa, T. Taira, G.-f. Li, K.-i. Matsuda, and T. Uemura, "Effect of defects in Heusler alloy thin films on spin-dependent tunnelling characteristics of  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$  and  $\text{Co}_2\text{MnGe}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnGe}$  magnetic tunnel junctions", *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 22, 164212 (9pp), 2010, 査読有.
- [7] S. Trudel, J. Hamrle, B. Hillebrands, T. Taira, and M. Yamamoto, "Magneto-optical investigation of epitaxial nonstoichiometric  $\text{Co}_2\text{MnGe}$  thin films", *J. Appl. Phys.*, vol. 107, 043912 (7pp), 2010, 査読有.
- [8] T. M. Nakatani, Y. K. Takahashi, T. Ishikawa, M. Yamamoto, and K. Hono, "Structural characterizations of  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$  magnetic tunnel junctions by transmission electron microscopy," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 322, Issue 3, pp. 357-361, 2010, 査読有.
- [9] 植村哲也, 山本真史, "Co 系フルホイスラー合金を用いたスピン流の創出と制

- 御”, まてりあ, vol. 49, pp. 566-569, 2010.
- [10] T. Ishikawa, H.-x. Liu, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Influence of film composition in Co<sub>2</sub>MnSi electrodes on tunnel magnetoresistance characteristics of Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi magnetic tunnel junction,” Appl. Phys. Lett., vol. 95, 232512 (3pp), 2009, 査読有.
- [11] K. Sawada, T. Uemura, M. Masuda, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling Magnetoresistance Simulation Used to Detect Domain-wall Structures and Their Motion in a Ferromagnetic Wire”, IEEE Trans. on Magnetism, vol. 45, pp. 3780 – 3783, 2009, 査読有.
- [12] T. Uemura, K. Sawada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Double magnetic tunnel junctions with cross-magnetization configurations for electrical detection of domain-wall structures”, Appl. Phys. Lett., vol. 95, 012502 (3pp), 2009, 査読有.
- [13] T. Uemura, Y. Imai, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling anisotropic magnetoresistance in epitaxial CoFe/n-GaAs junctions”, Appl. Phys. Lett., vol. 94, 182502 (3pp), 2009, 査読有.
- [14] T. Taira, T. Ishikawa, N. Itabashi, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Spin-dependent tunnelling characteristics of fully epitaxial magnetic tunnel junctions with a Heusler alloy Co<sub>2</sub>MnGe thin film and a MgO barrier”, J. Phys. D: Applied Phys., vol. 42, 084015 (9 pp), 2009, 査読有.
- [15] S. Ouardi, B. Balke, A. Gloskovskii, G. H. Fecher, C. Felser, G. Schoenhense, T. Ishikawa, T. Uemura, M. Yamamoto, H. Sukegawa, W.-H. Wang, K. Inomata, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, S. Ueda and K. Kobayashi, “Hard X-ray photoelectron spectroscopy of buried Heusler compounds”, J. Phys. D: Applied Phys., vol. 42, 084010 (7 pp), 2009, 査読有.
- [16] T. Ishikawa, N. Itabashi, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Half-metallic electronic structure of Co<sub>2</sub>MnSi electrodes in fully epitaxial Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi magnetic tunnel junctions investigated by tunneling spectroscopy (invited)”, J. Appl. Phys., vol. 105, 07B110 (6pp), 2009, 査読有.
- [17] T. Ishikawa, N. Itabashi, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Critical role of interface states for spin-dependent tunneling in half-metallic Co<sub>2</sub>MnSi-based magnetic tunnel junctions investigated by tunneling spectroscopy”, Appl. Phys. Lett., vol. 94, 092503 (3pp), 2009, 査読有.
- [18] T. Taira, T. Ishikawa, N. Itabashi, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Influence of annealing on spin-dependent tunneling characteristics of fully epitaxial Co<sub>2</sub>MnGe/MgO/Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> magnetic tunnel junctions”, Appl. Phys. Lett., vol. 94, 072510 (3pp), 2009, 査読有.
- [19] T. Uemura and M. Yamamoto, “Three-valued Magnetic Tunnel Junction for Non-volatile Ternary Content Addressable Memory Application”, J. Appl. Phys., vol. 104, 123911 (5pp), 2008, 査読有.
- [20] M. Masuda, T. Uemura, K.-i. Matsuda and M. Yamamoto, “Fabrication and Characterization of Fully Epitaxial Magnetic Tunnel Junction Field Sensors using a Co<sub>2</sub>MnSi Thin Film”, IEEE Transactions on Magnetism, vol. 44, no.11, pp. 3996 – 3998, 2008, 査読有.
- [21] G. H. Fecher, B. Balke, A. Gloskovskii, S. Ouardi, C. Felser, T. Ishikawa, M. Yamamoto, Y. Yamashita, H. Yoshikawa, S. Ueda, and K. Kobayashi, “Detection of the valence band in buried Co<sub>2</sub>MnSi-MgO tunnel junctions by means of photoemission spectroscopy”, Appl. Phys. Lett., vol. 92, 193513 (3pp), 2008, 査読有.
- [22] T. Saito, T. Katayama, T. Ishikawa, M. Yamamoto, D. Asakura, and T. Koide, “X-ray absorption spectroscopy and x-ray magnetic circular dichroism of epitaxially grown Heusler alloy Co<sub>2</sub>MnSi ultrathin films facing a MgO barrier”, Appl. Phys. Lett., vol. 91, 262502 (3pp), 2007, 査読有.
- [23] T. Uemura, T. Yano, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Structural and magnetic properties of Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>Al thin films epitaxially grown on GaAs substrate with MgO interlayer”, Thin Solid Films, vol. 515, pp. 8013-8016, 2007, 査読有.
- [24] T. Uemura, T. Marukame, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Four-state Magnetoresistance in Epitaxial CoFe-based Magnetic Tunnel Junction”, IEEE Trans. on Magn., vol. 43, pp. 2791-2793, 2007, 査読有.
- [25] T. Marukame, T. Ishikawa, S. Hakamata, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Fabrication of Fully Epitaxial Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>Al/MgO/Co<sub>2</sub>Cr<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>Al Magnetic Tunnel Junctions”, IEEE Trans. on Magn., vol. 43, pp. 2782-2784, 2007, 査読有.
- [26] K.-i. Matsuda, H. Niwa, Y. Akimoto, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Magnetic and Transport Properties of Nb/PdNi Bilayers”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17, pp. 3529-3532, 2007, 査読有.
- [27] S. Hakamata, T. Ishikawa, T. Marukame, K.-i. Matsuda, T. Uemura, M. Arita, and M. Yamamoto, “Improved tunnel magnetoresistance characteristics of magnetic tunnel junctions with a Heusler alloy thin film of Co<sub>2</sub>MnGe and a MgO tunnel barrier”, J. Appl. Phys., vol. 101, 09J513 (3pp), 2007, 査読有.
- [28] T. Marukame and M. Yamamoto, “Tunnel

magnetoresistance in fully epitaxial magnetic tunnel junctions with a full-Heusler alloy thin film of  $\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Al}$  and a MgO tunnel barrier”, *J. Appl. Phys.*, vol. 101, 083906 (8pp), 2007, 査読有.

[学会発表] (計 154 件)

- [1] G.-f. Li, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Epitaxial growth of Heusler alloy  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}$  heterostructure on Ge(001) substrate”, 2011 Int’l Magnetism Conf., HC-06, Taipei, Taiwan, April 29, 2011.
- [2] T. Uemura, M. Harada, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Electrical injection and detection of spin-polarized electrons in an epitaxial  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}/\text{n-GaAs}$  junction”, 2011 Int’l Magnetism Conf., BP-08, Taipei, Taiwan, April 26, 2011.
- [3] T. Akiho, M. Harada, T. Uemura, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Spin-dependent transport properties of  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{n-GaAs}$  tunnel junctions”, 2011 Int’l Magnetism Conf., BP-03, Taipei, Taiwan, April 26, 2011.
- [4] K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Superconducting proximity effect of spin-triplet pairs in  $\text{NbN}/\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Al}/\text{NbN}$  junctions”, 55th Annual Conf. on Magnetism & Magnetic Materials, Abstracts (CD-ROM), p. 28, AE-10, Atlanta, Georgia, USA, November 15, 2010.
- [5] T. Taira, H.-x. Liu, S. Hirata, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Giant tunnel magnetoresistance in half-metallic  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ -based fully epitaxial magnetic tunnel junctions”, 55th Annual Conf. on Magnetism & Magnetic Materials, Abstracts (CD-ROM), pp. 118-119, BH-10, Atlanta, Georgia, USA, Nov. 15, 2010.
- [6] M. Yamamoto, T. Marukame, T. Ishikawa, T. Taira, K.-i. Matsuda, and T. Uemura, “Giant oscillations of spin-dependent tunneling resistances as a function of MgO barrier thickness in fully epitaxial magnetic tunnel junctions of  $\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Al}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{Cr}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{Al}$ ”, 55th Annual Conf. on Magnetism & Magnetic Materials, Abstracts (CD-ROM), p. 165, CB-01, Atlanta, Georgia, USA, November 16, 2010.
- [7] Y. Miura, M. Shirai, T. Saito, T. Katayama, T. Ishikawa, M. Yamamoto, D. Asakura and T. Koide, “Structural and magnetic properties at  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}(001)$  interfaces studied by x-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculations”, 55th Annual Conf. on Magnetism & Magnetic Materials, Abstracts (CD-ROM), p. 165, CB-02, Atlanta, Georgia, USA, November 16, 2010.
- [8] H.-x. Liu, T. Taira, Y. Honda, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Highly spin-polarized tunneling characteristics at room temperature in magnetic tunnel junctions with a half-metallic Heusler-alloy spin source and a MgO barrier”, 55th Annual Conf. on Magnetism & Magnetic Materials, Abstracts (CD-ROM), pp. 370-371, ET-11, Atlanta, Georgia, USA, November 17, 2010.
- [9] H.-x. Liu, T. Taira, Y. Honda, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Highly spin-polarized tunneling in Heusler-alloy-based magnetic tunnel junctions with a  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  upper electrode and a MgO barrier”, 2010 Int’l Conf. on Solid State Devices and Materials, Extended Abstract (USB-MEMORY), p. 1122 – 1123, F-6-4, Tokyo, Japan, September 24, 2010.
- [10] M. Harada, T. Uemura, T. Akiho, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Electrical detection of a non-local signal in  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{n-GaAs}$  tunnel junctions”, 6<sup>th</sup> Int’l Conf. on the Physics and Application of Spin Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-VI), Abstracts, pp. 259-260, P2-46, Tokyo, Japan, August 3, 2010.
- [11] 植村哲也, 石川貴之, 原田雅亘, 平智幸, 松田健一, 山本眞史, 「ホイスラー合金によるスピン流の創出と制御」, 2010年(平成22年)春期第146回日本金属学会講演会 講演概要 p. 156 (S6.17), つくば市, 筑波大学, 2010年3月30日(基調講演).
- [12] T. Uemura, M. Harada, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Strong bias-voltage dependence of tunneling anisotropic magneto-resistance in epitaxial ferromagnet/n-GaAs junctions”, 11<sup>th</sup> Joint MMM-Intermag Conf., Digest (CD-ROM), p.1225, EU-17, Washington DC, USA, January 21, 2010.
- [13] T. Ishikawa, H.-x. Liu, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, M. Yamamoto, “Effect of the Mn composition in  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  electrodes on tunnel magnetoresistance characteristics of  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$  magnetic tunnel junctions”, 11<sup>th</sup> Joint MMM-Intermag Conf., Digest (CD-ROM), p.1888, HH-04, Washington DC, USA, January 22, 2010.
- [14] M. Yamamoto, T. Ishikawa, T. Taira, T. Marukame, K.-i. Matsuda, and T. Uemura, “Spin-dependent tunneling in half-metallic Heusler alloy-based magnetic tunnel junctions with a MgO barrier”, Int’l Conf. on Magnetism (ICM2009), Abstract, p.155, Tu-JPH6-01, Karlsruhe, Germany, July 28, 2009. [Invited Talk]
- [15] S. Hirata, T. Taira, T. Ishikawa, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Tunneling spectroscopy of magnetic tunnel junctions with Heusler alloy  $\text{Co}_2\text{MnGe}$

- electrodes and a MgO barrier”, Int’l Conf. on Magnetism (ICM2009), Abstract, p.54, Mo-A-5.4-07, Karlsruhe, Germany, July 27, 2009.
- [16] M. Harada, T. Uemura, Y. Imai, K.-i. Matsuda, and M. Yamamoto, “Tunneling anisotropic magneto-resistance in an epitaxial Co<sub>2</sub>MnSi/n-GaAs junction”, The 14th Int’l Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-14), Abstract, p. 195, M5e, Kobe, July 22, 2009.
- [17] 山本眞史「ホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合のスピンの依存トンネル特性」, 日本金属学会第3分科会シンポジウム予稿 pp. 5-8, 仙台市, 東北大学, 2009年1月6日(依頼講演).
- [18] M. Yamamoto, T. Ishikawa, K.-i. Matsuda, and T. Uemura, “Spin-polarized tunneling in fully epitaxial magnetic tunnel junctions with Heusler alloy thin films and a MgO barrier”, 2008 Material Research Society (MRS) Fall Meeting, Abstracts (CD-ROM), L2.6, Boston, MA, USA, Dec. 2, 2008. [Invited Talk].
- [19] T. Taira, T. Ishikawa, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Spin-dependent tunneling characteristics of Co<sub>2</sub>MnGe/MgO/CoFe tunnel junctions”, 53rd Magnetism and Magnetic Materials Conf., Abstracts (CD-ROM), p. 230, DD-02, Austin, TX, USA, Nov. 12, 2008.
- [20] T. Ishikawa, N. Itabashi, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura and M. Yamamoto, “Half-metallic electronic structure of Co<sub>2</sub>MnSi electrodes probed by tunneling spectroscopy”, 53<sup>rd</sup> Magnetism and Magnetic Materials Conf., Abstracts (CD-ROM), p. 232, DD-07, Austin, TX, USA, Nov. 12, 2008. [Invited Talk]
- [21] 石川 貴之, 板橋 直樹, 平 智幸, 松田 健一, 植村 哲也, 山本 眞史, 「Co<sub>2</sub>MnSi 電極を用いた強磁性トンネル接合におけるスピンの依存コンダクタンス特性」, 第32回日本磁気学会学術講演会概要集, 13pB-10, 宮城県多賀城市 (東北学院大学), 2008年9月13日. 学生講演賞 (桜井講演賞) 受賞.
- [22] 山本眞史, 植村哲也, 松田健一, 「ハーフメタル系ホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合デバイス」, 日本学術振興会 薄膜第131委員会 第241回研究会資料, 北海道釧路市, 2008年6月27日 (依頼講演)
- [23] T. Ishikawa, N. Itabashi, K. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Spin-dependent tunneling conductance in fully epitaxial Co<sub>2</sub>MnSi/MgO/Co<sub>2</sub>MnSi tunnel junctions”, IEEE Int’l Magnetism Conf. Europe 2008, Technical Digests (CD-ROM), p. 33, AC-07, Madrid, Spain, May 5, 2008.

[図書] (計1件)

- [1] M. Yamamoto, T. Marukame, T. Ishikawa, K.-i. Matsuda, and T. Uemura, “Highly Spin-Polarized Tunneling in Fully Epitaxial Magnetic Tunnel Junctions with a Co-Based Full-Heusler Alloy Thin Film and a MgO Barrier”, Advances in Solid State Physics 47, R. Haug (Ed.), Springer Berlin/Heidelberg, pp. 105-116, 2008.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://nsed.ist.hokudai.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 眞史 (YAMAMOTO MASAFUMI)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：10322825

### (2) 研究分担者

植村 哲也 (TETSUYA UEMURA)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号：20344476

松田 健一 (MATSUDA KEN-ICHI)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教  
研究者番号：80360931

### (3) 連携研究者

なし