

平成 22 年 4 月 23 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007 年度 ～ 2010 年度

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）Creation of highly efficient spin sources with half-metals

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

研究分野：工学

科研費の分科・細目：(分科) 電気電子工学 (細目) 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. 研究計画の概要

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盛んである.スピントロニクスにおいて,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一つはハーフメタルである.本研究の大きな目的は高効率スピン源の創出にある.本研究ではオリジナルの技術であるハーフメタル系ホイスラー合金 ( $\text{Co}_2\text{YZ}$ ) 薄膜と  $\text{MgO}$  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,高効率スピン源を創出することを目的とする.

## 2. 研究の進捗状況

(1)ハーフメタル系ホイスラー合金である  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  (CMS) を下部・上部両電極に用いた CMS/ $\text{MgO}$ /CMS 強磁性トンネル接合 (CMS MTJ) を製作し,すべての層が単結晶エピタキシャル層からなり,かつ,界面の急峻性と平坦性に優れた MTJ を実現した.この結果,わずかに Co 過剰側 (Mn 不足側) の CMS 電極 ( $\text{Co}_2\text{Mn}_{0.91}\text{Si}_{0.93}$ ) を用いた MTJ において,室温で 182%, 4.2 K で 705%の比較的高いトンネル磁気抵抗比 (TMR 比) を実証した.この結果は CMS の高いスピン偏極率を,デバイス応用に必要とされるヘテロ構造の中で実証したものであり,ホイスラー合金薄膜を用いたヘテロ構造製作技

術の基盤となるものである.

(2)CMS MTJ におけるトンネル機構を,トンネルスペクトロスコーピーにより調べ,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フリップ過程が重要な役割を果たしていることを明らかにした.

(3) $\text{Co}_2\text{MnSi}$  薄膜のハーフメタル特性に対する化学量論的組成からのずれの影響を実験的に調べ,以下の知見を明らかにした.すなわち,  $\text{Co}_2\text{Mn}_\alpha\text{Si}$  電極を用いたエピタキシャル構造の  $\text{Co}_2\text{Mn}_\alpha\text{Si}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{Mn}_\alpha\text{Si}$  MTJ の TMR 比の Mn 組成  $\alpha$  に対する依存性を調べ,TMR 比は 4.2 K においても,また,室温においても, Mn 組成を Mn 不足側 ( $\alpha < 1$ ) から Mn 過剰側 ( $\alpha > 1$ ) のある値まで増加させると共に,増加することを明らかにした.結果として, Mn 過剰側の  $\alpha = 1.29$  に対して, 4.2 K で 1135%, 室温で 236%の高い TMR 比を実証した.この結果は,ハーフメタル特性を損なうと理論的に指摘されていた  $\text{CoMn}$  アンチサイト (Mn サイトを Co 原子が占める欠陥) の発生が Mn 過剰の組成にすることによって抑制されることを明らかにしたものである.

## 3. 現在までの達成度

① 当初の計画以上に進展している.

(理由)

3 元系ホイスラー合金のハーフメタル特性を実現するためには,ハーフメタル特性を損

なう構造欠陥の抑制が重要であって、かつ、適切な組成制御によって、そのような欠陥の抑制が可能であることを明らかにした。この適切な組成制御は化学量論的な組成を要求するものではなく、 $\text{Co}_2\text{MnSi}$  の場合、Mn 組成を過剰側に設定するというものであり、許容される組成の範囲も比較的広い事がわかった。これらの知見は、ハーフメタル系ホイスラー合金を広くスピントロニクス of 電極材料として活用する上で、重要な知見となるものである。

#### 4. 今後の研究の推進方策

ホイスラー合金を用いた MTJ については、低温 4.2 K においてはハーフメタル特性を反映した高い TMR 比が得られるのに対して、室温では TMR 比が 4.2 K の 1/5 程度に低下するという問題がある。この TMR 比の温度依存性は、磁化反平行状態のトンネル抵抗の温度依存性由来している。今後は、この磁化反平行状態のトンネル抵抗の強い温度依存性を決めている要因を、ホイスラー合金電極のバルク領域および界面領域での、少数スピンの対するギャップ中の状態に着目して、明らかにする。さらに、この知見を元に、室温において、ハーフメタル特性を反映した、従来にない優れた MTJ デバイス特性を実現する。さらに、これらの結果を元に、ホイスラー合金からの MgO バリアを介した半導体チャネルへの高効率スピン注入のためのヘテロ構造製作技術の基盤を確立する。

#### 5. 代表的な研究成果

(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 30 件)

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) T. Ishikawa, H.-x. Liu, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto,

“Influence of film 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 junction,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 95, 232512 (3pp), 2009, 査読有.

- (4) T. Ishikawa, N. Itabashi, T. Taira, K.-i. Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto, “Half-metallic electronic structure of  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  electrodes in fully epitaxial  $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{MgO}/\text{Co}_2\text{MnSi}$  magnetic tunnel junctions investigated by tunneling spectroscopy (invited)”, *J. Appl. Phys.*, vol. 105, 07B110 (6pp), 2009, 査読有.
- (5) 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  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ -based magnetic tunnel junctions investigated by tunneling spectroscopy”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, 092503 (3pp), 2009, 査読有.

[学会発表] (計 95 件)

- (1) 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)*, Karlsruhe, Germany, 26 – 31 July, 2009. (Invited Talk)

[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*, vol. 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

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