

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分
平成28年3月18日現在

規則合金スピントロニクス材料の新展開

New development of ordered-alloy materials
for spintronics

課題番号：25220910

高梨 弘毅 (TAKANASHI KOKI)

東北大学・金属材料研究所・教授



研究の概要 次世代の情報通信技術を担うスピントロニクスが注目されている。スピントロニクスで使用されている磁性材料は、主としてFe, Co, Ni系のランダム合金であるが、それでは性能に限界がある。本研究では、より一層の高機能化、多機能化を目指して、 $C1_b$ 型ホイスラー合金および $L1_1$ 型規則合金に着目し、新たな材料展開を図る。また、機能性探求の新展開として、規則合金を用いた高いスピントロニクス機能の創出を目指す。

研究分野：材料工学 / 金属物性・材料

キーワード：磁性・電子・情報材料

1. 研究開始当初の背景

次世代の情報通信技術を担う新しいエレクトロニクスとしてスピントロニクスが注目されている。スピントロニクスで使用されている磁性材料は、Fe, Co, Ni系のランダム合金が依然として圧倒的に多い。しかし、それでは性能に限界があることは明らかで、新たな材料の探索が求められている。我々は規則合金に着目し、スピン分極率が高い材料としてホイスラー合金、磁気異方性が高い材料として $L1_0$ 型規則合金を用いて、スピントロニクス機能に関する研究を行ってきた。

伝導電子のスピン分極率はスピントロニクス素子の性能を決める最も重要な因子であり、スピン分極率が高いほど、磁気抵抗効果などの特性は向上する。ホイスラー合金の一部はハーフメタルと呼ばれ、スピン分極率が100%である。近年、デバイスに適合した低抵抗で大きな磁気抵抗変化率(MR比)が得られる膜面垂直通電型巨大磁気抵抗効果(CPP-GMR)において、より大きなCPP-GMRを得る競争が激化している。デバイス応用のためには、室温で100%以上のMR比が求められるが、大きな温度変化が深刻な問題であり、まだ70%程度の値に留まっているのが現状である。

スピン分極率に加えて、磁気異方性も重要な因子である。スピントロニクス素子への応用のためには、高い磁気異方性と同時に、小さな電流でスピン注入磁化反転を実現させるために、磁化のダンピング定数が小さいことが重要である。 $L1_0$ 型規則合金の多くはPtやPdなどの重い金属を含むためスピン軌道

相互作用が大きく、磁化のダンピング定数も大きい。したがって、高い磁気異方性と低い磁気ダンピング定数を両立させた規則合金材料の開発が必要である。

また、最近のスピントロニクスの新たな展開として、スピンゼーバック効果の発見を契機に、熱磁気効果と融合したスピントロニクスが注目され、新しい熱電素子や冷却素子としての応用が期待されている。規則合金は、スピントロニクスにとっても有用な材料であることが期待される。

2. 研究の目的

ホイスラー合金を用いて、さらなるCPP-GMRの向上(室温100%以上)と高いスピン注入効率を実現させる。そのために、 $L2_1$ 型のみならず、 $C1_b$ 型に材料系を拡張する。我々がこれまで培った成膜技術を用いて良質な薄膜を作製し、高機能化を実現する。高い磁気異方性に加えて、高いスピン分極率と低い磁気ダンピング定数を有する多機能合金を開発する。そのために、Pt等の重い元素は使用せず、あくまでFe, Co, Ni等の3d遷移金属を用いた規則合金を作製する。もともと結晶対称性の低い $L1_1$ 型規則構造に着目し、我々が開拓してきた単原子層積層技術によってFeCoNi系 $L1_1$ 型規則合金薄膜を作製し、多機能化を実現する。また、これらの規則合金を用いて、従来のスピントロニクスのみならず、熱磁気効果と融合したスピントロニクス機能の創出に展開する。優れたスピントロニクス機能を示す規則合金材料について、異常ネルンスト効果やペルチエ効

果などのスピントロニクス機能も併せて調べ、高いスピントロニクス機能を得るための、材料創製の指導原理を明らかにする。

3. 研究の方法

高機能化に関しては、まずこれまで取り組んだ $L2_1$ - Co_2MnSi 系の CPP-GMR の向上を図る。次に $C1_b$ 型への展開を図る。多機能化に関しては、MBE を用いた単原子層積層制御によって単結晶基板上に $L1_1$ - $CoNi$ エピタキシャル薄膜の作製を試みる。また、MBE を用いた基礎研究を続けつつ、一方で実用的な観点からスパッタ法を用いた作製にも取り組む。スピントロニクスに関しては、上記の規則合金試料を用いて、ペルチェ冷却効果および異常ネルンスト効果の測定を行い、他の物理量や理論計算との系統的比較から、材料創製の指導原理を確立する。

4. これまでの成果

研究目的で掲げた高機能化、多機能化、スピントロニクスへの展開の3つの課題について、相互に関連させながら、並行して研究を進めてきた。高機能化に関しては、平成 25 年度は、これまで取り組んできた $L2_1$ - Co_2MnSi 系の CPP-GMR の向上を図った。平成 26 年度は、非磁性中間層として新規材料(Ag-Mg) を使用することにより、CPP-GMR の向上を実現した。平成 27 年度は、 $C1_b$ 型 NiMnSb への展開を図り、CPP-GMR の室温観測に成功した。多機能化に関しては、平成 25 年度および平成 26 年度は、MBE による単原子層積層制御によって単結晶基板上に $L1_1$ - $CoNi$ エピタキシャル薄膜の作製を試みた。平成 27 年度は、 $L1_1$ - $CoNi$ エピタキシャル薄膜の特性評価を行いつつ、FeCo 系への展開にも取り組んだ。スピントロニクスに関しては、平成 25 年度は、CPP-GMR 素子を用いたペルチェ冷却効果のサイズ依存性を明らかにした。平成 26 年度および平成 27 年度は、様々な規則合金における異常ネルンスト効果の測定を行い、磁気異方性や異常ホール効果などの他の物理量や理論計算との系統的比較から、メカニズムに関する重要な知見を得た。

5. 今後の計画

高機能化については、引き続き強磁性金属材料であるホイスラー合金を用いた CPP-GMR の向上と高いスピン注入効率の実現を目標とし、素子の作製と磁気伝導特性の評価を継続する。強磁性金属層の材料特性の改良に加え、GMR 構造の中間層として、Ag-Mg 層の組成や膜厚などの最適化を図ることにより、GMR のさらなる向上を目指す。さらに、 $C1_b$ 型ホイスラー材料について、NiMnSb 以外の物質も試みる。多機能

化については、引き続き MBE を用いた単原子層積層制御による $L1_1$ - $CoNi$ 薄膜の作製を行うとともに、対象を(111)配向 Ni/Co 多層膜にも拡張し、高い磁気異方性と低いダンピング定数の両立を目指す。さらに、応用を視野に入れ、スパッタ法による $L1_1$ - $CoNi$ 薄膜の作製に挑戦する。ペルチェ効果の研究については、サイズ依存性のメカニズム解明を目指す。異常ネルンスト効果の研究については、対象を Ni/Co 多層膜にも拡張し、系統的な測定を行う。また、ハーフメタルホイスラー合金材料についても異常ネルンスト効果の測定を行い、異常ホール効果や逆スピンホール効果との関連性を調べ、メカニズムの解明を通して、大きな異常ネルンスト効果のための材料創製指針を明らかにする。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. “Fully epitaxial $C1_b$ -type NiMnSb half-Heusler alloy films for currentperpendicular-to-plane giant magnetoresistance devices with a Ag spacer”, Z. Wen, T. Kubota, T. Yamamoto and K. Takanashi, Scientific Reports, **5**, 18387-1-10 (2015).
2. “Size dependence of Peltier cooling in ferromagnet/Au nanopillars”, S. Bosu, Y. Sakuraba, T. Kubota, I. Juarez-Acosta, T. Sugiyama, K. Saito, M. A. Olivares-Robles, S. Takahashi, G. E. W. Bauer, and K. Takanashi, Appl. Phys. Exp., **8**, 083002-1-4 (2015).
3. “Material dependence of anomalous Nernst effect in perpendicularly magnetized ordered-alloy thin films”, K. Hasegawa, M. Mizuguchi, Y. Sakuraba, T. Kamada, T. Kojima, T. Kubota, S. Mizukami, T. Miyazaki, and K. Takanashi Appl. Phys. Lett., **106**, 242405-1-4 (2015).
4. “Current perpendicular to film plane type giant magnetoresistance effect using a Ag-Mg spacer and $Co_2Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si$ Heusler alloy electrodes”, H. Narisawa, T. Kubota, and K. Takanashi, Appl. Phys. Exp., **8**, 063008-1-4 (2015).
5. “Interface magnetic anisotropy for monatomic layer-controlled Co/Ni epitaxial multilayers”, A. Shioda, T. Seki, J. Shimada, and K. Takanashi, J. Appl. Phys., **117**, 17C726-1-4 (2015).

ホームページ等

http://magmatelab.imr.tohoku.ac.jp/kiban_S.html