

研 究 報 告 書

「スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索」

研究期間：平成19年10月～平成23年6月

研究者：高橋 有紀子

1. 研究のねらい

本研究は、微細化による限界を目前にした半導体デバイスに代わると期待されているスピントロニクスデバイスの実現に必要とされる、キュリー点が室温以上のハーフメタルの探索を行い、それをを用いて高特性の磁気抵抗素子を開発することを目的とする。

スピントロニクスは電子の電荷に加えスピンをも積極的に利用しようとする技術で、主に電荷のみを利用してきたエレクトロニクスに代わる次世代のデバイス技術として注目されている。中でも、磁気ストレージの中核をなしているハードディスクドライブ(HDD)の再生ヘッドとして用いられているトンネル型磁気抵抗(TMR)素子や巨大磁気抵抗(GMR)素子の高性能化はユビキタス社会に不可欠な高密度大容量データストレージを可能とする基幹技術として注目されている。また、高速・低消費電力のプログラマブルロジックメモリとして期待されるスピン FET(spin filed effect transistor)の開発は、微細化の限界に到達しつつある半導体デバイスの代替技術として注目されている。これらのスピントロニクスデバイスには、室温でハーフメタルを示す材料が必須である。

室温でハーフメタルを示す材料の1つにCo基ホイスラー合金が挙げられる。それは、理論的にハーフメタル性(フェルミレベルでのスピン偏極率が100%)が予言されている[1]こと、およびキュリー点が室温以上であり応用上有利であるためである。しかし、Co基ホイスラー合金を用いたTMR素子では、低温では500%を超える高い値が報告されているものの実用的に重要である室温では100%以下の低い値にとどまっていた[2]。MR比の大きな温度依存性の原因の1つに、フェルミレベル(E_f)がダウンスピンの価電子帯または伝導帯の近くに存在するため、構造の不規則化による状態密度の変化の影響を受けやすいということが挙げられる。Co基ホイスラー合金は X_2YZ で表され、 $L2_1$ 規則構造ではハーフメタルが予測されるが、X原子とY原子の置換(DO_3 型の不規則)、Y原子とZ原子の置換(B2型の不規則)あるいはX、Y、Zのすべての原子の置換(A2型の不規則)による不規則化によりハーフメタル性が失われることが明らかになっている[3]。合金状態図によると、Co基ホイスラー合金の $L2_1/B2$ の規則・不規則変態点が低く、 $L2_1$ 構造への規則化傾向が弱い。そのために完全な $L2_1$ 規則構造を得ることは難しく、 DO_3 、B2やA2といった不規則構造が実現する。このようなCo基ホイスラー合金において、高いスピン偏極率を実現するには2つの方法があり、完全な $L2_1$ 構造を実現する、あるいは不規則状態のもとでも高いスピン偏極率を実現する方法を探索する、である。本研究では、工業的な応用を念頭に後者の方法を選択した。まず、理論的にハーフメタルが予測されているCo基ホイスラー合金を選択し、それに第4元素を添加することにより E_f を制御し不規則構造でも高いスピン偏極率を示す材料の探索を行った。さらに、探索した材料を磁気抵抗素子などのデバイスの応用し高スピン偏極率に起因する高特性を示すことで、材料の有効性を示す事を目的とした。

参考文献

- [1] I. Galanakis, P.H. Dederichs, and N. Papanikolaou, *Phys. Rev. B* **66**, 174429 (2002).
- [2] Y. Sakuraba, M. Hattori, M. Oogane, Y. Ando, H. Kato, A. Sakuma, T. Miyazaki, H. Kubota, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 192508 (2006)
- [3] Y. Miura, M. Shirai, and K. Nagao, *J. Appl. Phys.*, **95**, 7225, (2004).

2. 研究成果

本研究では、Co基ホイスラー合金に第4元素を添加することによる E_f の制御により高いス

ピン偏極率を持つ材料を開発し、実デバイスにその材料を応用することにより材料の有効性を示すことが目的である。以下に、①高スピン偏極率材料の探索、②探索材料のスピンロニクスデバイスへの応用、という2つの項目に分けて成果を報告する。

① 高スピン偏極率材料の探索

はじめに

本研究では材料探索が目的なので、簡便かつ迅速にスピン偏極率を測定する必要がある。そのために、探索材料をバルクで作製し、点接触アンドレーフ反射(PCAR)法[1]により材料のスピン偏極率を評価した。PCAR法で評価するスピン偏極率は伝導電子のそれであり、状態密度から予測されるスピン偏極率とは必ずしも一致しない。PCAR法では、超伝導体と常伝導体の点接触を作製し、そのコンダクタンス曲線を測定する。このときに、スピン偏極率が大きければアンドレーフ反射が抑制されるために、コンダクタンスが減少する。すなわち、スピン偏極率の大きな材料ほど、超伝導ギャップ中のコンダクタンスが小さいということになる。測定したコンダクタンス曲線は拡張 BTK モデル[2]でフィッティングしスピン偏極率を見積もった。注意したいのは、測定が超伝導転移点以下で行われるので、得られたスピン偏極率は低温の値になる。本研究の場合、超伝導材料として Nb を用い、測定温度は 4.2 K である。

3 元素ホイスラー合金と第 4 元素の組み合わせは非常に多く、そのすべてを実験で試すことは不可能であるし時間の無駄である。材料の選択は、次のような指針に従って行った。まず理論的にハーフメタルが示されているホイスラー合金を選択する。しかし実際には、ホイスラー合金の L_{21} 構造への規則化傾向は弱いので、必ず不規則状態が発生する。そのためにスピン偏極率は 100% よりもかなり小さい値となる。選択したホイスラー合金の状態密度曲線(DOS)より、不規則状態でもスピン偏極率の低下を抑えるように E_F や DOS を制御できるような第 4 元素を選択する。さらに、4 元素ホイスラー合金の熱力学的な相安定性とキュリー点が室温よりも十分に高いことを確認して、合金作製とスピン偏極率測定を行った。このような指針に基づいて材料探索を行った結果、60% を超えるような高いスピン偏極率を示す 4 元素ホイスラー合金を 20 種類以上開発した。3 元素のホイスラー合金のスピン偏極率が 55~60% であるので、第 4 元素を添加することによる E_F の制御により高スピン偏極率が実現したと言える。また、70% を超える極めて高いスピン偏極率を持つ材料も 3 種類見いだしている。70% を超えるスピン偏極率は、ホイスラー合金の中では世界で最高の値である。ここでは、74% の高いスピン偏極率を実現した $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})$ について報告する。

Co_2MnGe の Ga 添加による高スピン偏極率の実現

Co_2MnGe は理論的にハーフメタルが示され、キュリー点も 905K と高くスピントロニクスデバイス材料として有望である。しかし、PCAR法で評価したスピン偏極率は 59% であった。ハーフメタルの理論予測に対して非常にスピン偏極率が低いのは、不規則構造の影響のためと考えられる。一方で Co_2MnGa は理論的にはハーフメタルではないが、 E_F 付近にアップスピン電子の大きな状態の山がある。そこで、Ge と価電子数が 1 つ違う Ga で Ge を置換することにより、 Co_2MnGe のフェルミレベル付近のアップスピン電子の状態を増やすことにより高いスピン偏極率の実現を試みた。

$\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}_{1-x}\text{Ga}_x)$ のサンプルはアーク溶解により作製し、相平衡状態を得るために He 雰囲気中 673 K、168 時間の熱処理を行った。X線回折法(XRD)および透過型電子顕微鏡(TEM)による構造解析により、すべての合金において L_{21} 構造に規則化している。 L_{21} 規則度は Ga 量の増加とともに低下するものの、 DO_3 型の不規則も低下する。また示差熱分析の結果、Ga の添加量 x が 0.25 以下では $L_{21}/B2$ の規則・不規則変態に対応する吸熱ピークが観測されないことから、

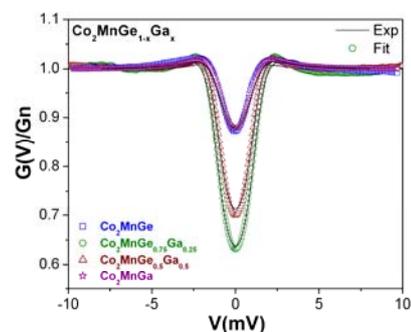


図 1 Co_2MnGe 、 Co_2MnGa 、 $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})$ のコンダクタンス曲線

L2₁構造への規則化傾向が非常に強い金属間化合物であることがわかる。図 1 に Co₂Mn(Ge_{1-x}Ga_x)合金のコンダクタンス曲線を示す。Co₂MnGeとCo₂MnGaでは、コンダクタンス曲線の最小値が約 0.85 であるのに対しCo₂Mn(Ge_{0.75}Ga_{0.25})では約 0.70 と非常に小さくなっており、Co₂Mn(Ge_{0.75}Ga_{0.25})が本質的に高いスピン偏極率を持つことがわかる。拡張BTKモデルでフィッティングを行った結果、スピン偏極率は 74%と見積もられた。詳細な構造解析や理論計算の結果、高いスピン偏極率は Ga添加によるDO₃型の不規則(CoとMnの間の不規則)が減少したためと考えられる。

表面酸化の影響

高スピン偏極率材料の探索では数多くの材料のスピン偏極率を迅速に測定する必要があることから、バルクでの検討を行った。しかし、バルク試料は一度大気に晒すために表面が必ず酸化される。ホイスラー合金は酸化しやすいMnなどの元素を含むため、実際のスピン偏極率を評価するには表面酸化を避ける必要がある。そのために、酸化防止層のAlをキャップしたホイスラー薄膜を作製し、PCAR法によりスピン偏極率を評価した。サンプルを大気暴露した後にAlの表面が酸化され不動態であるアルミナを形成するので、大気暴露によりホイスラー合金薄膜表面が酸化することはない。なお、Al層の厚さは 0.7 nmと非常に薄く、Nbの超伝導針を接触させたときにAlの酸化層は針により破壊されている。酸化防止層をもうけることによりスピン偏極率はバルク試料で測定したものよりも 1 割程度高い値になる。例えば Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})では、バルク試料のスピン偏極率は 69%であるが、酸化防止層をもうけた薄膜試料では 75%である。なお、表面酸化層を設けてもバルクで測定したスピン偏極率の大小関係は維持されている。すなわち、材料探索では作製が比較的容易なバルクを使った検討で十分であり、高スピン偏極率を示す材料について薄膜を用いた詳細な検討を行えばよい。

② 探索材料のスピンロニクスデバイスへの応用

はじめに

材料探索の結果、いくつかの材料については 70%を超える高いスピン偏極率を示すことが明らかになった。これらの材料の有用性を示すために、本研究では電流垂直型の巨大磁気抵抗(CPP-GMR)素子を作成しその磁気抵抗(MR)比を評価した。CPP-GMRのMRはバルクと界面のスピン非対称性に依存するので、高スピン偏極率材料を使うことは高MRを得るために有効な方法である。またCPP-GMRの特性は伝導電子のスピン偏極率によるので、PCAR法で評価したスピン偏極率とよい対応を示すはずである。ここでは、材料探索によって見いだした高スピン偏極率材料である Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})と Co₂Mn(Ga_{0.5}Sn_{0.5})を用いた CPP-GMR素子の特性について報告する。

Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})を用いたCPP-GMR素子

Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})(以下CFGG)はバルクのスピン偏極率は 69%と高い値を示す。表面の酸化を抑えるためにCFGG薄膜の表面を 0.7 nmのAlで保護した薄膜では 75%のスピン偏極率である。CPP-GMR素子の膜構成は、MgO基板/Cr(10nm)/Ag(100nm)/CFGG/Ag(5nm)/CFGG/Ag(5nm)/Ru(8nm)であり、括弧の中の数字は膜厚である。下地のAgを 100nm

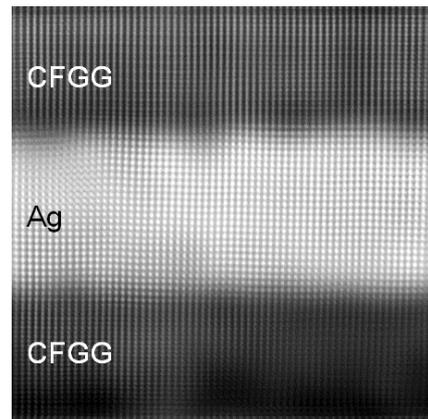


図 2 CFGG 膜厚 12 nm の CPP-GMR 素子の HAADF 像。

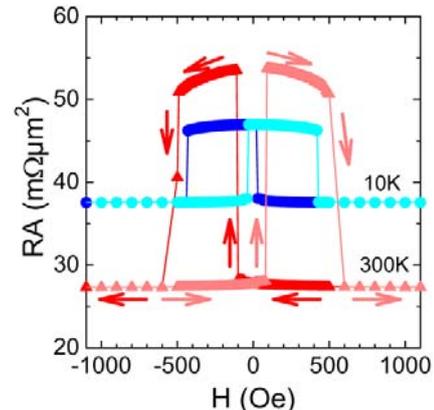


図 3 CFGG 膜厚 12 nm の CPP-GMR 素子の MR 曲線。

作製した後に表面平坦化のために300°Cで30分、すべての層を作製した後にCFGGの規則化のために500°Cで30分の熱処理を行った。20 nmのCFGG薄膜では、500°C以上の熱処理によりL₂₁構造が得られることを確認している。作製した多層膜は、電子ビームリソグラフィ、光リソグラフィとArイオンエッチングを用いて70×140 ~ 150×300 nmの楕円形のピラーに加工した。

図2にCFGGの層厚が12 nmのCPP-GMR素子のHAADF像を示す。下部CFGGから上部CFGGまでエピタキシャル成長している。強度は原子の重さに比例することを考慮すると、上下CFGG電極はB2構造であることがわかる。図3に、300 Kと10 Kで測定した磁気抵抗曲線を示す。300 Kでは、MR = 41.7%、 $\Delta RA = 9.5 \text{ m}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ 、10 KではMR = 129.1%、 $\Delta RA = 26.4 \text{ m}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ と、いずれも世界最高の値である。抵抗変化量のCFGG電極の厚さに対する変化をValet-Fertのモデル[3]によりフィッティングを行った結果、室温でのバルクスピン非対称性は0.77以上と見積もられた。このことから、高いMR比はCFGGの高いスピン偏極率によるものであることがわかる。以上のことから、PCAR法により見積もったスピン偏極率を基に高スピン偏極率材料を探索することは有効であることが示された。本方法による材料探索は、液体Heを使うものの薄膜作製や微細加工などの高度な技術を必要とせず短時間に行えることが特徴である。

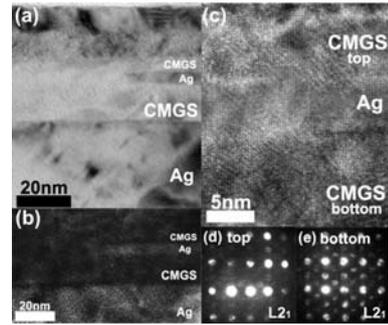


図4 CMGSを用いたCPP-GMR素子の断面TEM像。(a)明視野像、(b)Agマッピング、(c)高分解能像、(d)上部CMGSおよび(e)下部CMGSのナノビーム電子線解説像。

Co₂Mn(Ga_{0.5}Sn_{0.5})を用いたCPP-GMR素子

一方、Co₂Mn(Ga_{0.5}Sn_{0.5}) (以下CMGS)は72%の高いスピン偏極率を持つ材料であるが、スペーサ層にAgを用いたCMGS/Ag/CMGSのCPP-GMR素子は高いMR比を示さなかった。図4に断面TEMの観察結果を示す。L₂₁構造へ規則化させるために500°Cで熱処理をすると、スペーサのAgとCMGS電極が相互拡散し、Agのスペーサが一部消失していることがわかる。このことから、ある材料をデバイスへ応用するとき、スピン偏極率だけではなくスペーサとのマッチングも重要である。すなわち高スピン偏極率材料をデバイスへ応用するには、その性能を最大限に引き出せるような界面や非磁性材料が必要となる。

参考文献

- [1] R. J. Soulen, Jr., J. M. Byers, M. S. Osofsky, B. Nadgorny, T. Ambrose, S. F. Cheng, P. R. Broussard, C. T. Tanaka, J. Nowak, J. S. Moodera, A. Barry, and J. M. D. Coey, *Science* **282**, 85 (1995)
- [2] G. J. Strijkers, Y. Ji, F. Y. Yang, C. L. Chien, and J. M. Byers, *Phys. Rev. B* **63**, 104510 (2001)
- [3] T. Valet and A. Fert, *Phys. Rev. B* **48**, 7099 (1993)

3. 今後の展開

スピントロニクスデバイスの高性能化に関する研究の多くは、デバイスの特性を決める重要なパラメータの1つである材料を理論計算のみを頼りに選択し、高性能化のためにプロセスを最適化することに多くの労力を使っている。しかし、高い特性を実現するには、高スピン偏極率材料を使うことが非常に重要であり、その次にプロセスの最適化をすべきである。本研究で見出した高スピン偏極率材料をデバイスへ応用することにより、高特性が実現できたことがいい例である。今後はホイスラー合金のみならず、幅広い合金系で研究を展開することにより、80%を超える高スピン偏極率材料の開発が期待される。本研究ではホイスラー合金に着目したために4元系合金を取り扱った。しかしスピントロニクスデバイスが薄膜であり、かつ微細加工を必要とすることを考えると、薄膜でも組成調整のしやすい2元系の合

金で耐食性のよい材料を今後探索していく必要がある。

磁気ストレージの中核をなすハードディスクドライブ(HDD)は、データのデジタル化、デジタル家電の普及やストレージデバイスの省電力化などにより 2Tbits/in²を超える超高密度化が要求されている。現在HDDに使われている再生ヘッドは強磁性層の間に絶縁層を挟んだTMR素子であるが、低抵抗化が難しく高周波での応答に問題を抱えている。一方で、すべて金属で構成されるCPP-GMRは素子の抵抗が低く高周波動作には問題がない。しかし、さらにMR比を増加させる必要があり、2Tbits/in²を超えるには室温で 50%以上のMR比が必要とされている。本研究では高スピン偏極率材料を用いることにより、42%のMR比が実現した。50%を超えるにはさらに高いスピン偏極率を持つ材料を使う必要がある。また、CPP-GMR素子で高いMR比を得るためには、強磁性電極とスペーサ材料とのバンドマッチングがよいことも必要条件であり、最適なスペーサ材料の開発が求められる。

高スピン偏極率を用いることにより、CPP-GMR 素子以外のスピントロニクスデバイスの高性能化も期待される。現在 HDD の再生ヘッドとして使われているトンネル型磁気抵抗(TMR)素子の高性能化も期待できる。ホイスラー合金を電極として用いる場合には、スペーサ層として使う酸化物による表面酸化を防ぎ理想的な界面を実現することが大きな課題となる。また高スピン偏極率材料を用いることにより、高効率スピン注入の実現が期待される。これは、スピン MOSFET 実現のための重要な項目の1つである。超高密度磁気記録を期待されているレーストラックメモリでは低い電流での磁壁移動を求められているが、高スピン偏極率材料が有効である。また、次世代の磁気記録システムとして提案されているマイクロ波アシスト磁気記録において書き込みヘッドへの応用が期待されているスピントルク発振においても高スピン偏極率材料により大きな出力を得ることができる。最近では、垂直磁気異方性をもつ強磁性電極を使うことにより、スピン注入磁化反転や磁壁駆動電流の臨界電流の低減が報告されている。垂直異方性を持つ高スピン偏極率材料を使うことにより、臨界電流のさらなる低減が可能になる。

4. 自己評価

本研究では、高スピン偏極率材料を探索し、探索した材料のデバイスでの有効性を示すことが目的であった。Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})という新規高スピン偏極率材料において世界最高のGMR比が実現できたことから、本研究の目的は達成されたと考えている。また、PCAR法による高スピン偏極率材料の探索の有効性を示すことができたのも成果の1つである。一方で、材料探索で非常に多くの合金を検討したため、それぞれの材料の詳細な検討はほとんど行っていない。70%を超えるようなスピン偏極率を持つ材料については、スピン偏極率の増大メカニズムを物理的に解明していく必要がある。また、高スピン偏極率を示す材料系すべてのデバイス化も今後の課題である。

本研究で開発した材料を用いる、また今後材料探索を続けることにより、現在の特性を大きく超えるようなデバイスを実現することが今後の課題である。そのような研究の方向性を与えられたことは本研究の大きな成果であり、目的の8割程度は達成したと考える。

5. 研究総括の見解

スピントロニクス用電極材料として、現在使われている鉄・コバルト合金に比べて理論的に高いスピン偏極率が期待されるハーフメタルの研究開発が進められています。ハーフメタルでは、フェルミ準位におけるスピン偏極率が理想的には 100%となります。ハーフメタルとしては、コバルト鉄ベースのフルホイスラー合金を中心に研究が進められており、実際低温では 500%を超えるMR比が報告されていますが、室温では 100%程度のMR比しか得られていません。

高橋有紀子研究者は、高温でMR比が低下する原因が、理想的なL₂構造より規則度の劣るB₂構造ができていることにあると見て、熱力学的にL₂構造が安定かつバンド構造から高い偏極率の期待される4元ホイスラー合金を数十種類合成し、PCAR法によるスピン偏極度の評価を行いました。PCAR法というのは、超伝導体と磁性常伝導体の接合を利用して偏極度を評価する手法で、高橋研究者が日本では唯一実績をもっています。しかし、PCAR法で評

価した偏極度は、TMJデバイスを用いた偏極度に比べて低いという問題がありました。高橋研究者は、不動態酸化膜をつくって合金表面を保護しPCARの探針で酸化膜を破って測定する方法を開発しこの問題を克服しました。

3 元系のホイスラー合金に第 4 元素を添加することにより、フェルミ準位の位置を制御して、60%を超えるような高いスピン偏極率を示す 4 元系ホイスラー合金を 20 種類以上開発することができました。CMGG[Co₂Mn(Ge_{0.75}Ga_{0.25})]においてスピン偏極度の世界最高値 74%を達成したことは、特筆に値します。さらに、69%のスピン偏極率を示すCFGG[=Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5})]を用いて MgO 基板 /Cr(10nm)/Ag(100nm)/CFGG/Ag(5nm)/CFGG/Ag(5nm)/Ru(8nm) という CPP-GMR素子をつくり、室温で、MR = 41.7%、ΔRA = 9.5 mΩ μm²、10 KではMR = 129.1 %、ΔRA = 26.4 mΩ μm²と、いずれもCPPGMRとして世界最高の値を得ることに成功しました。高橋研究者は、本領域唯一の女性研究者です。育児と研究を両立させ、上記のようなすばらしい成果が得られたことは、賞賛に値することです。昨年は本多記念賞、本年は文部科学大臣表彰を受賞しました。今後、一層の発展が期待されます。

6. 主要な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1.	S. V. Karthik, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi, T. Ohkubo, and K. Hono “Spin polarization of quaternary Co ₂ Cr _{1-x} Fe _x Al Heusler alloys” <i>Appl. Phys. Lett.</i> 89 , 052505 (2006)
2.	A. Rajanikanth, D. Kande, Y.K. Takahashi and K Hono “High spin polarization in a two phase quaternary Heusler alloy Co ₂ MnAl _{0.5} Sn _{0.5} ” <i>J. Appl. Phys.</i> , 101 , 09J508 (2007)
3.	S. V. Karthik, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi, T. Ohkubo, and K. Hono “Microstructure and spin polarization of quaternary Co ₂ Cr _{1-x} V _x Al, Co ₂ V _{1-x} Fe _x Al and Co ₂ Cr _{1-x} Fe _x Al Heusler alloys” <i>Acta Mater.</i> 55 , 3867 – 3874 (2007)
4.	S. V. Karthik, A. Rajanikanth, T. M. Nakatani, Z. Gercsi, Y. K. Takahashi, T. Furubayashi, K. Inomata and K. Hono “Effect of Cr substitution for Fe on the spin polarization of Co ₂ Cr _x Fe _{1-x} Si Heusler alloys” <i>J. Appl. Phys.</i> , 102 , 043903 (2007)
5.	T. M. Nakatani, A. Rajanikanth, Z. Gercsi, Y. K. Takahashi, K. Inomata, and K. Hono “Structure, magnetic property and spin polarization of Co ₂ FeAl _x Si _{1-x} Heusler alloy” <i>J. Appl. Phys.</i> 102 , 033916 (2007)
6.	T. M. Nakatani, Z. Gercsi, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi and K. Hono “The effect of iron addition on the spin polarization and magnetic properties in Co ₂ CrGa Heusler alloy” <i>J. Phys. D: Applied Physics</i> , 41 225002 (2008)
7.	A. Rajanikanth, Y.K. Takahashi and K. Hono “The enhancement of spin polarization of Co ₂ MnSn by Fe doping” <i>J. Appl. Phys.</i> 103 , 103904 (2008)
8.	A. Narahara, K. Ito, T. Suemasu, Y. K. Takahashi, A. Rajanikanth, and K. Hono “Spin polarization of Fe ₄ N thin films determined by point-contact Andreev reflection” <i>Appl. Phys. Lett.</i> 94 , 202502 (2009)
9.	A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi and K. Hono “Suppression of magnon excitations in Co ₂ MnSi Heusler alloy by Nd doping” <i>J. Appl. Phys.</i> 105 , 063916 (2009)
10.	B. Varaprasad, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi and K. Hono “Highly spin polarized Co ₂ MnGa _{0.5} Sn _{0.5} Heusler compound”

	<i>Acta Mater.</i> 57 , 2702–2709 (2009)
11.	S. V. Karthik, T. M. Nakatani, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi, and K. Hono “Spin polarization of Co–Fe alloys estimated by point contact Andreev reflection and tunneling magnetoresistance” <i>J. Appl. Phys.</i> 105 , 07C916 (2009)
12.	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 $\text{Co}_2\text{MnGa}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}$ Heusler alloy” <i>J. Appl. Phys.</i> 108 , 093916 (2010)
13.	B. S. D. Ch. S. Varaprasad, A. Rajanikanth, Y. K. Takahashi and K. Hono “Enhanced spin polarization of Co_2MnGe Heusler alloy by substitution of Ga for Ge” <i>Appl. Phys. Express.</i> 3 , 023002 (2010)
14.	H. S. Goripati, T. furubayashi, S. V. Karthik, 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 Heusler alloy” <i>J. Appl. Phys.</i> 109 , 043901 (2011)
15.	N. Hase, T. M. Nakatani, S. Kasai, Y. K. Takahashi, and K. Hono “Enhancement of current–perpendicular–to–plane giant magnetoresistance by insertion of $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ layers at the $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ga}_{0.5}\text{Sn}_{0.5})/\text{Ag}$ interface” <i>J. Appl. Phys.</i> 109 , 07E112 (2011)
16.	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 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ge}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})$ Heusler alloy” <i>Appl. Phys. Lett.</i> (2011), in press
17.	高橋有紀子、古林孝夫、宝野和博 “電子顕微鏡によるスピントロニクス素子の微細構造解析” 表面科学、 32 ,139,(2011) 研究紹介

(2)特許出願

研究期間累積件数:5件

発明者: 中谷友也、アマナブルラジヤニカンス、高橋有紀子、宝野和博

発明の名称: Co基ホイスラー合金

出願人: 物質・材料研究機構

出願日: 2007年10月24日

発明者: パラプラサッド、アマナブルラジヤニカンス、高橋有紀子、宝野和博

発明の名称: Co基ホイスラー合金

出願人: 物質・材料研究機構

出願日: 2008年8月1日

発明者: アマナブルラジヤニカンス、高橋有紀子、宝野和博

発明の名称: Co基ホイスラー合金

出願人: 物質・材料研究機構

出願日: 2008年8月29日

発明者: アマナブルラジヤニカンス、高橋有紀子、宝野和博

発明の名称: Co基ホイスラー合金とこれを用いた磁性素子

出願人: 物質・材料研究機構



出 願 日: 平成 20 年 11 月 25 日

(3) その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

学会発表:

1. 「点接触アンドレーフ反射法によるハーフメタル探索」

高橋有紀子、A. Rajanikanth、宝野和博、第12回シリサイド系半導体研究会「スピン注入技術に関する最近の研究動向と微細構造評価技術」主催: 応用物理学会シリサイド系半導体と関連物質研究会、2008年9月6日、名古屋

2. 「スピントロニクス素子の構造と特性」

高橋有紀子、中谷友也、長谷直基、A. Rajanikanth、B. Varaprasad、H.S. Goripati、S.V. Karthik、古林孝夫、宝野和博

2010年金属学会春季講演大会 2010年3月30日 筑波大学

著作: スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線

第24章 「スピントロニクス材料と微細構造制御」

高橋有紀子、宝野和博、2009年シーエムシー出版