

「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する
革新材料・プロセス研究」
平成21年度採択研究代表者

H24 年度 実績報告

木村 崇

九州大学 稲盛フロンティア研究センター
次世代エレクトロニクス材料研究部門・教授

電荷レス・スピン流の三次元注入技術を用いた超高速スピンドバイスの開発

§1. 研究実施体制

(1) 木村グループ(九州大学)

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
木村 崇	九州大学	教授	H21.10～
家形 諭	九州大学	特任助教	H22. 4～

② 研究項目

- ・ 多端子スピン生成技術による三次元巨大スピン流の生成
- ・ 三次元巨大スピン流注入による厚膜磁性体の磁化反転の実証

(2) 能崎グループ(慶応義塾大学)

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
能崎 幸雄	慶応義塾大学	准教授	H21.10～

② 研究項目

- ・ 合成スピン流方向の高速変調技術の確立
- ・ スピントルクの最適化による低電力・高速磁化反転技術の開発

(3) 宮尾グループ(九州大学)

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
宮尾 正信	九州大学	特任教授	H21.10～
浜屋 宏平	九州大学	准教授	H21.10～

② 研究項目

- ・ 高品質強磁性フルホイスラー合金の MBE 成長技術の確立
- ・ プレーナー素子構造用サブミクロン微細加工技術の確立

(4) 伊藤グループ(関西大学)

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
伊藤 博介	関西大学	准教授	H21.10～

② 研究項目

- ・ スピン注入磁化反転の計算機シミュレーション
- ・ ホイスラー合金等ハーフメタルの電子状態の計算機シミュレーション

§ 2. 研究実施内容

2-1 これまでの研究の概要

本研究の目的は、電荷レス・スピンの高効率生成技術、厚膜ナノ磁性体への三次元スピン注入技術を確立し、スピン RAM の微細化限界を打破する革新的スピン注入磁化反転技術を開発することである。

これまでに、スピン生成源の多端子化を考案し、純スピン流最大値の向上、消費電力の低減を実証した。また、室温ハーフメタル特性が期待されるホイスラー合金を理論的に予測し、それらの高品質薄膜成長技術を確立した。更に、ホイスラー薄膜のデバイス化を行い、純スピンの生成効率が従来素子に比べ桁以上向上することを明らかにした。これらの成果により、従来のスピン注入技術では実現不可能な巨大スピン流を生成する技術を確立した。また、厚膜ナノ磁性体へのスピン注入においては、側面が上面に比べて有効な吸収面であることを実験的に明らかにしており、計算機シミュレーションでは、スピン偏極方向を高速に変調することで、磁化反転速度が高速化できることを実証している。

2-2 研究内容

・ナノピラー構造における巨大スピンの生成

図1に示すようなナノピラー形状をベースとした純スピン流生成デバイス構造を作製し、電流による発熱や電流誘導磁界の影響を最小限にすることで、素子の許容電流密度が、従来の横型スピンバルブ素子に比べ、5倍以上大きくなる『新奇純スピン流生成素子構造』を提案・実現し、巨大スピンの生成技術

を確立した。更に、本素子構造においても、スピン生成源の多端子化が有効であることを示すと共に、純スピン流注入によるナノ磁性体の磁化反転を実現した。

・スピン生成源の高性能化

ホイスラー合金による生成効率の改善が、スピン偏極率の向上であるものを裏付けるために、同程度の電気抵抗率を持ち、スピン偏極率がそれほど大きくない鉄シリサイド (Fe_3Si) ホイスラー合金との比較実験を行った。図は、CFS および FS におけるスピン偏極率の電気抵抗率依存性

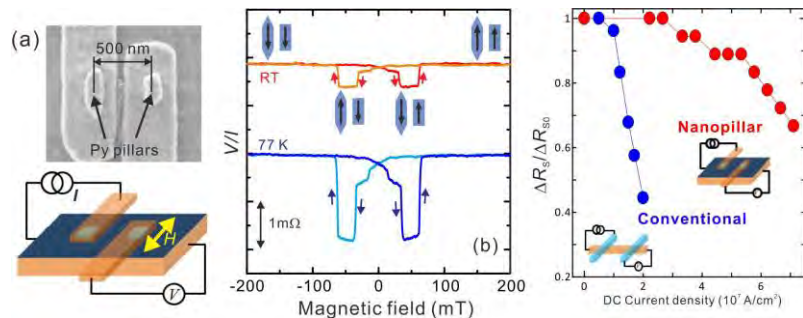


図 1. 試作したナノピラー型純スピン流デバイスと (b) 観測された非局所スピン信号 (c) ナノピラー型と従来型の許容電流密度の比較

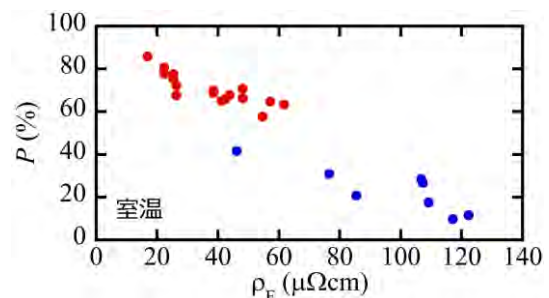


図 2. CFS および FS 生成源のスピン偏極率と電気抵抗率の関係

である。図に示すように、CFS が FS に比べて、大きなスピン偏極率を有することが確認でき、また、電気抵抗率の減少と共に、スピン偏極率が増大する傾向があることも判明した。

・純スピン流注入下のナノ磁性体ダイナミクスの検出

スピン流の高速変調を実現するために、純スピン流生成端子をコプラナー線路化することで、高周波電流の入力が可能な多端子純スピン流デバイスを開発・試作した。更に、生成されたスピン流が実際に高速変調されていることを確認するために、異方性磁気抵抗効果を用いた新奇なナノ磁性体のダイナミクスの高感度検出技術を開発し、磁化ダイナミクスが純スピン流により変調されることを実験的に確認した。

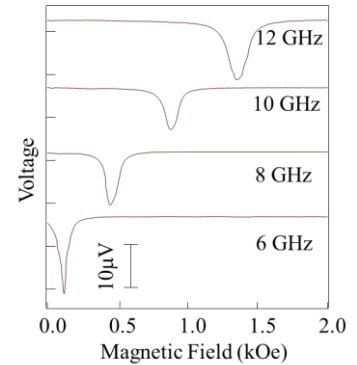


図 3. 異方性磁気抵抗効果を用いたナノ磁性体共鳴スペクトルの検出

・数値計算による三次元スピン注入の有効性

三次元スピン注入の有効性を理論的に明確化するために、既が開発している純スピン流を考慮したマイクロマグネティクスの数値計算プログラムを、体積を一定に保ったまま、膜厚を変化させた場合の磁性体ナノドットに関して、上面スピン注入、及び側面スピン注入法における反転スピン流強度を比較した。図に、反転スピン流の膜厚依存性を示す。図から確認できるように、上面スピン注入においては膜厚の増大(集積度の向上)に伴い、磁化反転に必要なスピン流の強度は極めて大きくなった。一方で、側面スピン注入に関しては、膜厚を変化させても、殆ど一定であり、側面スピン注入が上面スピン注入に比べ有効なスピン注入法であることが確認できた。更に、二端子注入法を用いることで、各端子のスピン流強度が半減されることが確認できた。

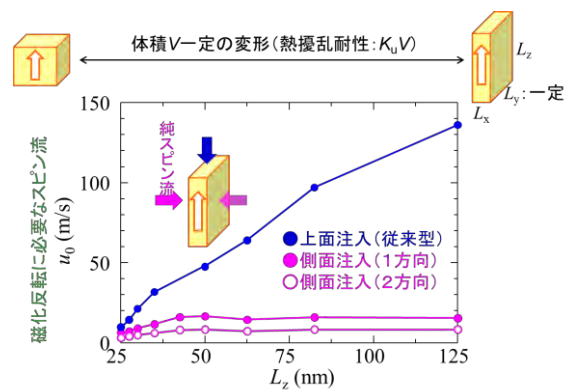


図 4. 上面、及び側面スピン注入法における反転スピン流の磁性体膜厚依存性

2-3 今後の見通し

多端子巨大スピン流の創出技術とホイスラー合金による純スピン流生成効率の向上を組み合わせた素子をいち早く試作し、側面スピン注入による磁化反転電流の低減、高速変調スピン流による磁化反転時間の高速化など、純スピン流ならではの特徴が技術を確立する。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

1. M. Kawano, S. Yamada, S. Oki, K. Tanikawa, M. Miyao, K. Hamaya, “Molecular Beam Epitaxy of Co_2MnSi Films on Group-IV Semiconductors”, *J. J. Appl. Phys.*, 52, CM06-1-4, 2013 (DOI: 10.7567/JJAP.52.04CM06)
2. S. Hu, T. Kimura, “Anomalous Nernst-Ettingshausen effect in nonlocal spin valve measurement under high-bias current injection”, *Phys. Rev. B*, 87, 014424, 2013 (DOI:10.1103/PhysRevB.87.014424)
3. S. Oki, M. Kawano, K. Tanikawa, H. Aoki, S. Yamada, M. Miyao, and K. Hamaya, “Generation and detection of a pure spin current using Co-based Heusler-alloy spin injector and detector: Comparison of Co_2MnSi and Co_2FeSi ”, *ECS Trans.*, 50, 245 2013 (DOI:10.1149/05010.0245ECST)
4. S. Oki, K. Masaki, N. Hashimoto, S. Yamada, M. Miyata, M. Miyao, T. Kimura, K. Hamaya, “Sign determination of spin polarization in L21 ordered Co_2FeSi using a Pt-based spin Hall device”, *Phys. Rev. B*, 86, 174412, 2012 (DOI:10.1103/PhysRevB.86.174412)
5. S. Yamada, J. Sagar, S. Honda, L. Lari, G. Takemoto, H. Itoh, A. Hirohata, K. Mibu, M. Miyao, K. Hamaya, “Room-temperature structural ordering of a Heusler-compound Fe_3Si ”, *Phys. Rev. B*, 86, 174406, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.174406)
6. S. Bakaul, S. Hu, T. Kimura, “Large pure spin current generation in metallic nanostructures”, *Appl. Phys. A*, 339, 7495, 2012 (Invited paper) (DOI:10.1007/s00339-012-7495-0)
7. K. Kiseki, S. Yakata, T. Kimura, “Efficient excitation and detection of standing spin wave in Permalloy film - Demonstration of spin wave resonator -”, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 212404, 2012 (DOI:10.1063/1.4766918)
8. S. Bakaul, W. Hu, T. Wu, T. Kimura, “Intrinsic domain-wall resistivity in half-metallic manganite thin films”, *Phys. Rev. B*, 86, 184404, 2012, (DOI:10.1103/PhysRevB.86.184404)
9. K. Nakada, S. Yakata, T. Kimura, “Noise-induced transition of mutual phase synchronization in coupled spin torque nano oscillators”, *IEEE Trans. Magn.*, 48, 11, 4588-4561 (2012) (DOI:10.1109/TMAG.2012.2201145)
10. S. Hu, K. Kiseki, S. Yakata, T. Kimura, “Ferromagnetic resonance in exchange-coupled NiFe/FeMn films and its control”, *IEEE Trans. Magn.*, 48, 11, 2889-2891, 2012 (DOI:10.1109/TMAG.2012.2201925)
11. S. Nonoguchi, T. Nomura, T. Kimura, “Longitudinal and transverse spin current absorptions in a lateral spin valve structure”, *Phys. Rev. B*, 86, 104417, 2012, (DOI:10.1103/PhysRevB.86.104417)
12. T. Nomura, S. Nonoguchi, T. Kimura, “Efficient inducement of bistable spin Hall effect using in-plane-magnetized V-shaped ferromagnetic wire”, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 082403, 2012 (DOI:10.1063/1.4747219)

13. S. Oki, S. Yamada, N. Hashimoto, M. Miyao, T. Kimura, K. Hamaya, “Effect of addition of Al to single-crystalline CoFe electrodes on nonlocal spin signals in lateral spin-valve devices”, *Appl. Phys. Exp.*, 5, 063004, 2012 (DOI:10.1143/APEX.5.063004)
14. S. Nonoguchi, T. Nomura, T. Kimura, “Nonlocal spin transports in nanopillar-based lateral spin valve”, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 132401, 2012 (DOI:10.1063/1.3698092)
15. K. Hamaya, N. Hashimoto, S. Oki, S. Yamada, M. Miyao, T. Kimura, “Estimation of the spin polarization for Heusler-compound thin films by means of nonlocal spin-valve measurements : Comparison of Co₂FeSi and Fe₃Si”, *Phys. Rev. B (Rapid Communication)*, 100404(R), 2012 (DOI:10.1103/PhysRevB.85.100404)
16. S. Oki, S. Yamada, T. Murakami, M. Miyao, K. Hamaya, “Influence of Al co-deposition on the crystal growth of Co-based Heusler-compound thin films on Si(111)”, *Thin Solid Films*, 520, 3419-3422, 2012 (DOI: 10.1016/j.tsf.2011.10.080)
17. T. Kimura, N. Hashimoto, S. Yamada, M. Miyao, K. Hamaya, “Room-temperature generation of giant pure spin currents using Co₂FeSi spin injectors”, *NPG Asia Materials*, 4, e9, 2012 (DOI:10.1038/am.2012.16)
18. K. Nakada, S. Yakata, T. Kimura, “Noise-induced synchronization in spin torque nano oscillators”, *J. Appl. Phys.*, 111, 07C920, 2012 (DOI:10.1063/1.3680537)
19. S. Nonoguchi, T. Nomura, Y. Ando, T. Kimura, “Electrical manipulation of spin polarization and generation of giant spin current using multi terminal spin injectors”, *J. Appl. Phys.*, 111, 07C505, 2012 (DOI:10.1063/1.3672245)
20. M. Miyata, K. Kiseki, S. Yakata, H. Wada, T. Kimura, “Formations of magnetic vortices in a chain array of triangle Py dots and an isosceles triangle Py dot”, *J. Appl. Phys.*, 111, 07B902, 2012 (DOI:10.1063/1.3673349)

(3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)