

木村 崇

九州大学 稲盛フロンティア研究センター・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ndeバイスの開発

### §1. 研究実施の概要

スピンRAM、スピンMOSFETなどの高機能スピndeバイスを高集積化する上での共通課題は、スピndeバイスを構成する強磁性体におけるスピンの熱擾乱耐性の向上と書き込み動作に相当する磁化反転の低電力化技術の開発である。現在のスピndeバイスでは、電荷流(電流)に重畳されたスピン流(スピン偏極電流)を、積層構造の膜面垂直方向から一次元的に注入することで書き込み動作を実現している。しかし、この手法は、電流によるジュール発熱を抑える為にスピン流の生成量に制限があると同時に、スピン侵入長(数 nm 程度)以下の極薄膜磁性体しか磁化反転ができない。従って、デバイスの極微化に伴い、反転層の体積が著しく低下し、磁化を安定化させる磁気エネルギーが減少するため、十分な熱擾乱耐性を得ることができなくなる。そこで本研究プロジェクトでは、プレーナ素子構造における電流を伴わないスピン流(電荷レス・スピン流)を用いて、スピndeバイスにおける革新的書き込みアーキテクチャを創出する。代表者が、これまで開発してきた高機能な電荷レス・スピン流制御技術を高性能化すると共に、スピン生成源の多端子化、反転層の埋め込み技術等を確立することで、厚膜ナノ磁性体への電荷レス・スピン流の三次元注入技術を開発する。更に、分担者の有する高精度スピндаイナミクス制御技術、高品質ホイスラー合金作成技術、及び第一原理計算やマイクロマグネティクスによる計算機実験を駆使して、最終的に優れた熱擾乱耐性を有し、極低消費電力で動作する超高速ナノスピndeバイスを開発する。

平成 22 年度の研究成果として、電荷レス・スピン流の制御技術として、複数のスピン生成源を有するプレーナ型スピンバルブを作製し、多端子スピン生成による電荷レス・スピン流の増大を確認すると共に、二つの強磁性電圧端子を用いた高感度スピン検出技術を開発した。更に、磁化に垂直なスピン流を用いることで、スピン流の吸収強度が、磁化に平行な縦スピン流に比べて増大することも確認した。これらの知見により、より効率的な電荷レス・スピン流の注入が可能となった。また、電荷レス・スピン流の高速制御に関しては、高周波回路設計に基づいたプレーナスピndeバイスを作製し、電荷レス・スピン流の高周波特性評価の実験に着手した。同時に、電荷レス・スピン流の高速変調の理論的考察も行い、スピン流の変調周期が非磁性層のスピン緩和時間よりも短くなると、スピン緩和が追従できなくなり、スピン蓄積が減少することが明らかになった。また、単結晶金属を用いることで、高速磁化反転に必要な不可欠な、強磁性薄膜のダンピング定数の低

減にも成功した。スピン生成源の高品質化においては、ホイスラー合金作製技術の更なる高度化をはかると共に、実際にホイスラー合金を用いて電荷レス・スピン流の生成を試みた。その結果、電荷レス・スピン流の生成効率が、これまでの素子の 20 倍以上になることが確認された。また、ホイスラー合金の第一原理計算に関して、 $\text{Co}_2\text{FeSi}$  薄膜への格子歪の導入が、ハーフメタル特性の安定化に繋がることを示した。また、三次元スピン流を考慮したマイクロマグネティクスシミュレータの実現に向けて、まずはスピン流の一次元的な空間分布を考慮したマイクロマグネティクス計算を行い、スピン注入による磁化反転を再現することに成功した。

また、最近提案されている各種ナノエレクトロニクス・デバイスの最新動向を把握・紹介することを目的として、各分野第一線の研究者を招き、『ナノエレクトロニクス・デバイスの新潮流』というテーマで、講演会を開催した。

## §2. 研究実施体制

### (1) 木村グループ(九州大学)

① 研究分担グループ長: 木村 崇(九州大学、教授)

#### 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(慶應義塾大学)

① 研究分担グループ長: 能崎 幸雄(慶應義塾大学、准教授)

#### 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 研究分担グループ長: 宮尾 正信(九州大学、特任教授)

#### 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 研究分担グループ長: 伊藤 博介(関西大学、准教授)

#### 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

### §3. 研究実施内容

#### 木村グループ

巨大電荷レス・スピン流の三次元注入技術の確立に向けて、本年度は、まず、図1(a)、及び(b)に示すような二つのスピン流生成端子を有するプレーナースピンバルブ素子を作製し、巨大スピン流の生成を試みた。図 1(c) は、非局所スピンバルブ測定の際に発生するスピン信号の磁場依存性である。得られた信号変化は、各端子を単一生成源とした場合の重ね合わせとなり、生成されたスピン流が二倍程度に増大したことを意味している。更に、非局所スピンバルブ測定において、検出端子も多端子化することにより、スピン信号の効率的検出技術も確立した[3]。更に最近では、生成端子を4つまで増やし、更なる、巨大スピン流の創出に成功している。

続いて、生成したスピン流を強磁性体に、効率よく吸収させるための素子構造を探索するべく、V 字形状を有するスピン生成源を作製し、“スピン流のスピン方向”と“スピン注入される磁性体の磁化方向”の相対角度を変化させ、スピン吸収強度の角度依存性を調べた。その結果、NiFe, Co においては、相対角度が 90 度のときに、スピン吸収が大きくなることを見出した。

更に、宮尾グループと共同で、高品質ホイスラー合金をスピン生成源として用いた素子も作製しており、生成効率が、これまで主に用いてきた多結晶パーマロイ(Py)電極の 10 倍以上に大きくなることを確認した。

このように、電荷レス・スピン流の生成・吸収技術に関して、高性能化が進んでおり、今後の磁化反転技術への展開を踏まえて、非磁性体中に埋め込まれたナノ磁石の磁区構造を検出するための磁気力顕微鏡の高感度観察技術を確認するとともに[2]、装置内にスピン流生成用の電流導入端子を設置した。次年度以降、本技術を用いて、電荷レス・スピン流注入による詳細な磁区構造の変化を調べる予定である。

#### 能崎グループ

純スピン流の交流化によるスピントルクトランスファー磁化反転の高速化を実現するためには、①交流スピン注入による純スピン密度の生成・拡散過程の理解、②交流純スピン流吸収に伴うスピントルクトランスファー効率の向上、および③交流純スピン流生成に適したデバイス設計が求められる。本年度は、まず①について、理論的な解析を進めた。特に、ハミルトニアンを出発点とする厳密な解析によりスピン流とそれに伴うスピン密度を計算した。その結果、スピン蓄積に用いる交

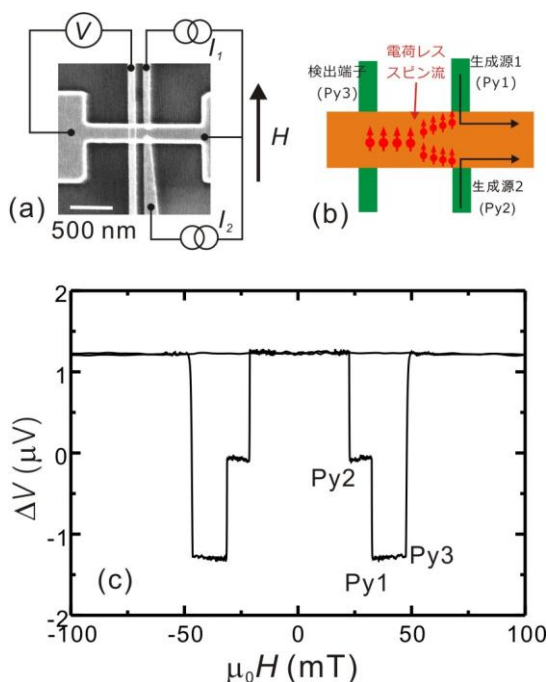


図 1 (a)試作した二つのスピン生成端子を有するプレーナースピンバルブ素子の SEM 像と(b)素子動作概念図。(c) 非局所スピンバルブ測定結果。

流電流の周波数が純スピン流伝送路として用いる Cu のスピン拡散時間(～100 ps)の逆数よりも高くなると、スピン注入源に蓄積されるスピン密度が減少することを明らかにした。これは、Cu 内でのスピン緩和速度よりも速い速度で注入スピンの極性が変化することに起因する。高速磁化反転を可能にする交流純スピン流の高周波化に向けて、伝送路の材料選定を含めたデバイス設計を今後行う。さらに、交流純スピン流の生成とそのスピントルクトランスファー効果の実験的検証に

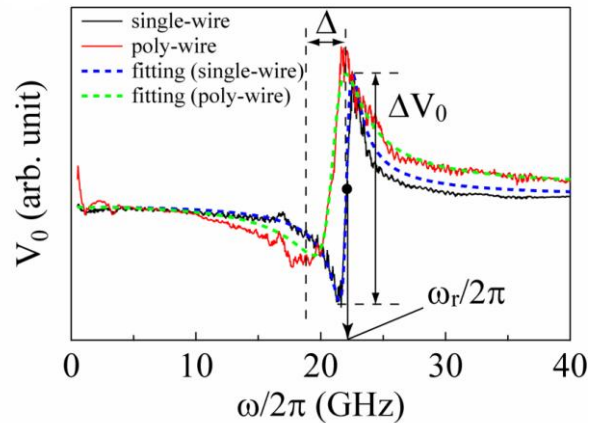


図2 単結晶 Fe 細線と多結晶 Fe 細線の強磁性共鳴スペクトル

向けては、木村グループと共同で素子の試作を行っており、スピン注入源への交流電流の印加や、純スピン流伝送路上の磁気微粒子について強磁性共鳴スペクトルの検出実験を行う予定である。また今年度は、磁化反転ダイナミクスの制御において重要な役割を果たす磁化ダンピング機構が結晶構造にどのように依存するかを詳しく調べた。その結果、単結晶化により強磁性 Fe 細線の Gilbert ダンピング定数を多結晶試料の3分の1程度にまで低減できることがわかった(図2)。今後、スピントルクトランスファー磁化反転の高速化に向けて、強磁性薄膜のダンピング定数制御の方法を確立したい。

### 宮尾グループ

低温 MBE 技術の高いスピン偏極率を有すると期待されるハーフメタルホイスラー合金材料系へ展開し、昨年度までに、L2<sub>1</sub> 規則構造を有する Co<sub>2</sub>FeSi 薄膜の結晶成長に成功している。

今年度は、木村グループと協力し、この Co<sub>2</sub>FeSi をスピン注入源とする横型スピン伝導素子を作製し、純スピン流の検出を試みた。図3(a)に今回作製した Co<sub>2</sub>FeSi 電極(CFS1,CFS2)と Cu チャネルを有する横型スピン伝導素子の電子顕微鏡写真を示す。純スピン流を検出するために、図のような電流・電圧端子配置で膜面内(図中  $H$  の方向)に磁場を印加して非局所電圧測定を行なった。ここで、CFS1とCuの接合面積は、約  $0.1 \times 0.1 \mu\text{m}^2$

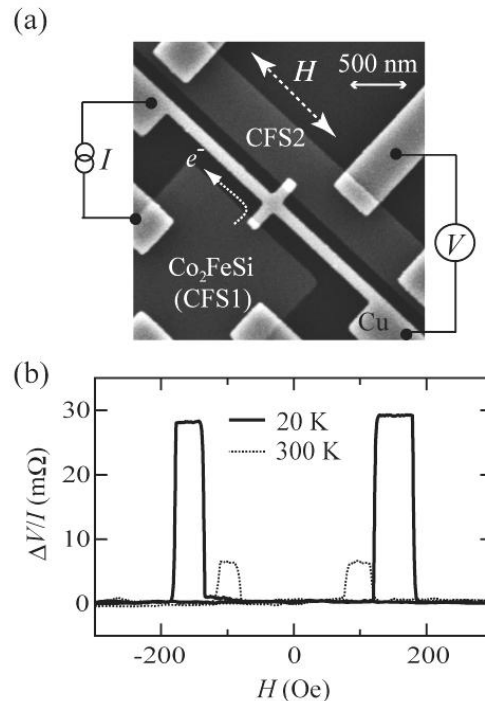


図3. (a) Co<sub>2</sub>FeSi/Cu からなる横型スピン伝導素子の一例。素子加工には電子線描画とドライエッチングを使用。(b) Co<sub>2</sub>FeSi 電極を利用した素子で検出に成功したスピン信号。

であり、CFS1 と CFS2 の電極間間隔は約  $0.6 \mu\text{m}^2$  である。図 3(b)は、得られた非局所抵抗の印加磁場依存性である。20 K および 300 K において、Cu 中の純スピン流輸送に起因する明瞭なヒステリシス曲線を得ている。注目すべき点は、20 K で  $\sim 28 \text{ m}\Omega$ 、300 K で  $\sim 6 \text{ m}\Omega$  と、比較的大きなスピン信号を得ている点である。これは、スピン注入源を Py とした場合と比較しても数倍大きな値である。今後、素子形状や微細加工条件等を最適化し、得られたスピン信号の解析を進めることで、作製した  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  電極が高いスピン偏極率を有していることを具体的に明らかにしていく予定である。

### 伊藤グループ

(1) 高効率なスピン注入の実現を目指し、高スピン偏極率を有するホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  の電子状態計算を行った。格子歪みを導入することで、温度・印加バイアスによるスピン注入効率の低下を抑制できる可能性があることを示した。

図 4(a)は第一原理バンド計算(GGA+ $U$ 法)により得られた  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  の少数スピン電子に対する電子状態密度である。バンド・ギャップ中にフェルミ準位が位置し、ハーフメタル的な電子状態(スピン偏極率+100%)が実現していることがわかる。この物質の結晶構造はバルクでは立方晶であるが、5%ほどの格子歪みを導入した正方晶においてもハーフメタルは維持されている。注目すべき点は、バンド・ギャップ中でフェルミ準位の位置が移動していることである。このことは、格子歪みによってフェルミ準位の位置を制御可能であること、すなわち有限温度・有限バイアス下におけるスピン注入効率を改善することが可能であることを示唆している。

(2) 高効率・高速なスピン注入磁化反転の実現を目指し、マイクロマグネティクス(LLG 方程式)に基づき磁化反転ダイナミクスを計算するためのシミュレーション・プログラムを開発した。

図 4(b)はスピン流による磁性体薄膜の磁化反転のシミュレーション結果である。磁化反転が起きるためのスピン流の強度に下限があること、スピン流の強度が増すにつれて反転時間が短くなることを確認した。今後は、計算を多端子スピン注入の素子構造へと拡張し、より効率的な磁化反転を実現するための素子構造を検討する。

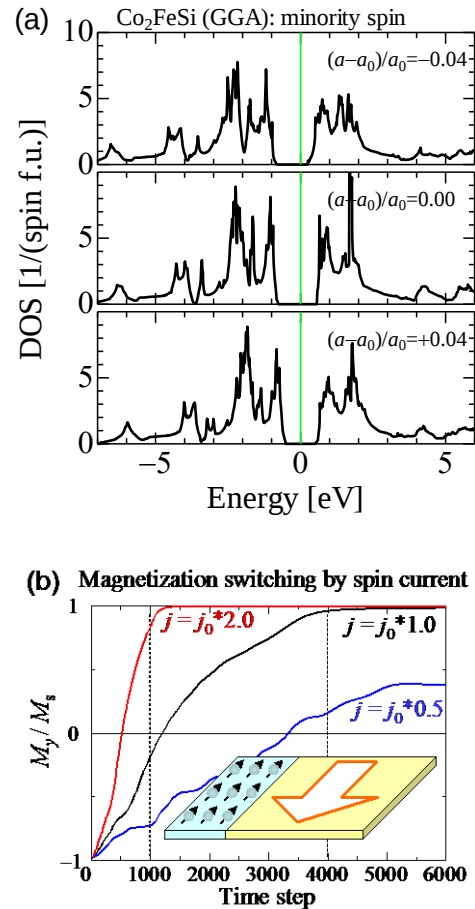


図 4 (a)  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  の電子状態密度。(b) スピン注入磁化反転のマイクロマグネティクス計算。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. T. Kimura, and M. Hara, "Nonvolatile multiple-valued memory device using lateral spin valve", Appl. Phys. Lett. 97, 182501 (2010).
2. S. Yakata, M. Miyata, S. Nonoguchi, H. Wada and T. Kimura, "Control of vortex chirality in regular polygonal nanomagnets using in-plane magnetic field", Appl. Phys. Lett., 97, 222503 (2010).
3. S. Yakata, Y. Ando, and T. Kimura, "Optimization of cleaning condition of Permalloy/Cu interface for efficient spin injection", IEEE TENCON 2010, pp. 126-128 (2010).
4. M. Miyata, S. Yakata, M. Hara, H. Wada, and T. Kimura, "Control of vortex chirality in polygonal nanomagnets", IEEE TENCON 2010, pp. 1878-1880 (2010).
5. S. Nonoguchi, Y. Ando, Y. Togawa, and T. Kimura, "Spin transport properties in polycrystalline Gd film and strip", IEEE TENCON 2010, pp. 1881-1884 (2010).
6. Y. Otani and T. Kimura "Spin current related phenomena in metallic nano-structures," Physica E 43, 735~740 (2011)
7. K. Kasahara, K. Yamamoto, S. Yamada, T. Murakami, K. Hamaya, K. Mibu, and M. Miyao, "Highly ordered Co<sub>2</sub>FeSi Heusler alloys grown on Ge(111) by low-temperature molecular beam epitaxy", J. Appl. Phys. 107, 09B105 (2010).
8. K. Hosono, A. Yamaguchi, Y. Nozaki, and G. Tatara, "Microscopic Theory of diffusive spin current with spin-orbit interaction", Phys. Rev. B 83, 144428 (2011).
9. K. Hosono, Y. Nozaki, A. Yamaguchi, and G. Tatara, "Time evolution of spin accumulation induced from electric field in ferromagnet", J. Appl. Phys., 109, 07C901 (2011).
10. M. Goto, H. Hata, A. Yamaguchi, Y. Nakatani, T. Yamaoka and Y. Nozaki, "Electrical detection of vortex states in a ferromagnetic disk using the rectifying effect", J. Appl. Phys., 109, 07D306 (2011)
11. Y. Kasatani, A. Yamaguchi, H. Miyajima, and Y. Nozaki, "Detection of ferromagnetic resonance in a single-crystalline Fe wire using a rectifying effect", J. Phys.: Conf. Ser., 266, 012013 (2011).
12. M. Goto, H. Hata, A. Yamaguchi, H. Miyajima, Y. Nakatani, T. Yamaoka, and Y. Nozaki, "Detection of vortex-core dynamics using current-induced self-bistable rectifying effect", J. Phys.: Conf. Ser., 266, 012080 (2011).
13. H. Itoh, S. Honda, and J. Inoue, "Electronic structure and spin-injection of Co-based Heusler alloy/ semiconductor junctions", Key Engineering Materials, 470, 54-59 (2011).

### (4-2) 知財出願

- ① 平成 22 年度特許出願内訳(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)