

「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

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ndeバイスの開発

## § 1. 研究実施の概要

Beyond CMOS として有力視されているスピン 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、スピン生成源から生成される電荷流(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、電荷流によるジュール発熱を抑える為にスピン偏極電流量を制限する必要があると同時に、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、デバイスの極微細化に伴い、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、磁化の熱擾乱耐性の低下が高集積化の壁となっていた。そこで本研究では、これまで研究代表者が精力的に研究してきたプレーナー素子構造における電荷流を伴わないスピン流(電荷レス・スピン流)の制御技術を多端子スピン注入素子に拡張し、代表者が発見したスピン吸収効果を厚膜ナノ磁性体に適用することで、電荷レス・スピン流の三次元注入を実現する。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、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 21 年度は、電荷レス・スピン流の制御において基盤となる面内スピンバルブ素子の高性能化を目指した素子作製プロセスの最適化、電荷レス・スピン流による磁化反転検出ツールとして最有力となる磁気力顕微鏡の高感度化、電荷レス・スピン流の高効率な生成のために重要となる Si 及び Ge 基板上への高品質ホイスラー合金の作製技術、及びそのホイスラー合金の界面状態がスピン生成効率にどのような影響を与えるかの理論的考察を行った。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 木村グループ

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

① 研究分担グループ長:能崎 幸雄(九州大学、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

① 研究分担グループ長:宮尾 正信(九州大学、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

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

- ・ 三次元巨大スピン流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

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

#### 木村グループ

H21年度末に、学科の共通設備として木村グループの実験室に新設された最新の電子線描画装置を用いて、2本の NiFe 細線とそれを橋渡しする Cu 細線で構成される面内スピバルブ素子作製技術の最適化を行った。図 1 は、作製された面内スピバルブ素子の電子顕微鏡写真である。試料は、2度のリフトオフプロセス(NiFe 細線とCu 細線)を繰り返し行うことで作製した。ここで、NiFe 細線と Cu 細線の接合界面は、イオンミリングによる NiFe 表面を清浄化することで作製した。ミリング条件、Cu 細線作製条件、ポストアニール条件を最適化を行い、現時点で、NiFe 細線間の間隔 500 nm のスピバルブ素子における非局所スピバルブ測定において、図2に示すような 1.5mΩ の変化を有するスピン信号を 77K で得ることに成功している。

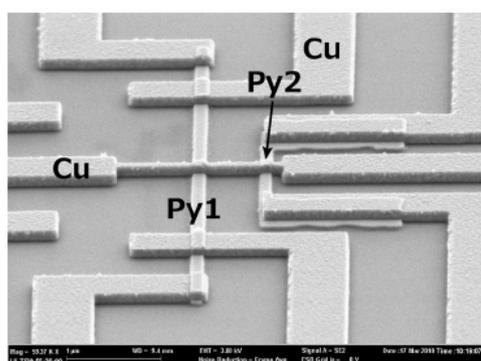


図 1. 作製した NiFe/Cu 面内スピバルブ素子の電子顕微鏡写真

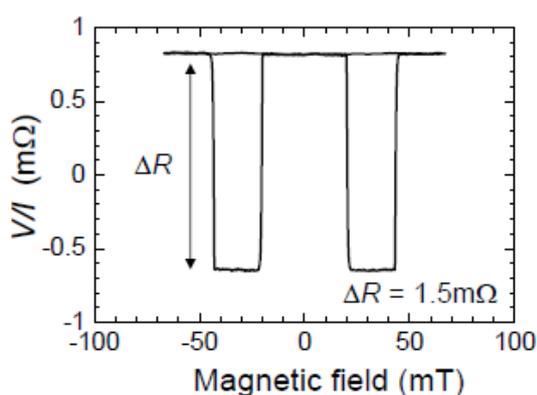


図 2. 作製条件を最適化した NiFe/Cu 面内スピバルブ素子において観測された非局所スピン信号(測定温度 77K)

更に、NiFe スピン注入源を2本に拡張し、多端子スピン注入を行うことで、非磁性体中により効率的にスピン蓄積を引き起こすことで、単端子スピン注入の約3倍のスピン蓄積信号を発生することに成功した。

また、CREST 経費で購入した磁界印加型の磁気力顕微鏡を用いて、三次元スピン注入前後のナノ磁性体の磁化状態を高感度且つ簡便に検出するシステムを構築した。

#### 能崎グループ

本年度は、巨大スピン流注入下での厚膜ナノ磁性体の磁化ダイナミクスを解明するためのデバイス設計、及び合成スピン流の高速方向変調を実現するための回路設計を行った。

#### 宮尾グループ

室温で高効率にスピン流を生成することのできる高スピン偏極材料の作製技術を確立することを目的に、これまでに Fe<sub>3</sub>Si というホイスラー系材料で確立している SiGe(111)基板上への低温

MBE 技術をハーフメタル(フルホイスラー合金)材料系へ高度化する。今回、ハーフメタル材料として期待されている  $L2_1$ - $Co_2FeSi$  の  $Ge(111)$  上への結晶成長を試みた。MBE 法を用いて膜厚 50 nm の  $Co_2FeSi$  薄膜を基板温度  $200^\circ C$  で作製した。 $Co_2FeSi/Ge$  界面近傍の高分解能断面電子顕微鏡写真を示す[図 3(a)]。驚くべきことに、原子レベルで急峻な  $Co_2FeSi/Ge$  界面を有したまま、エピタキシャル成長を実現した。さらに、界面近傍の  $Co_2FeSi$  薄膜層のナノ電子線回折パターンを測定したところ、 $L2_1$  規則構造の存在を示唆する明瞭な(111)および(113)パターンを観測した(挿入図)。図 3(b)には、 $^{57}Co$  線源のガンマ線照射によるメスbauer分光スペクトルの測定結果を示す。フィッティングの結果、90%以上のスペクトルが理想的な  $L2_1$  規則構造の Fe サイト(4a サイト)と一致した。つまり、サイトを占めるほとんどの Fe 原子が理想的な  $L2_1$  規則構造中の Fe で説明でき、 $200^\circ C$  という極めて低温で作製しているにも関わらず、バルク並みに規則度が高いことが示唆された。よって、高いスピン偏極率が期待され、スピン流生成効率の増大が見込まれる結果となった。

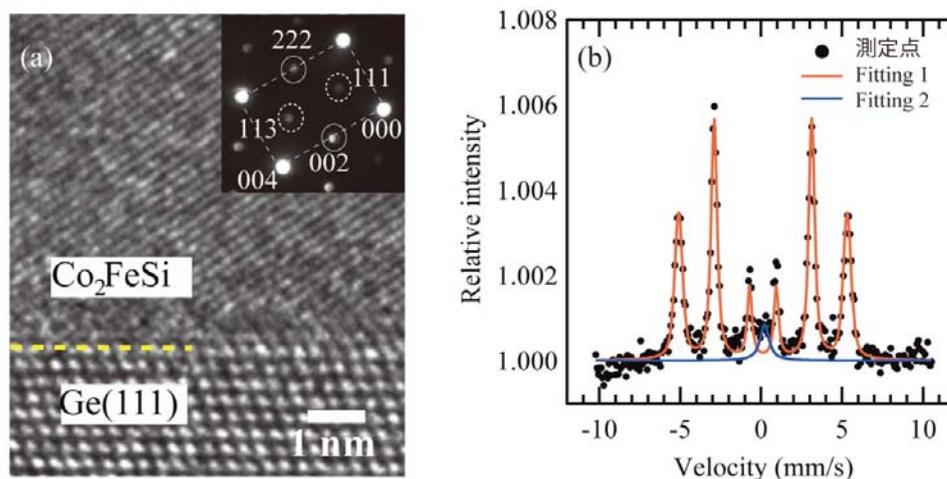


図 3. (a)  $Ge(111)$  面上に低温成長させた  $Co_2FeSi$  の高分解能断面電子顕微鏡写真とナノ電子線回折パターン(挿入図)。(b) メスbauer分光スペクトルの測定結果

### 伊藤グループ

本年度は、3台のワークステーションを立ち上げると共に、室温で安定したハーフメタル特性が期待できる Co 系ホイスラー合金において、組成を変化させた場合のバンド構造の詳細を第一原理計算により検討した。その結果、 $Co_{3-x}Mn_xSi$  においては、図4に示すように、 $x > 1$  で、ハーフメタル的特性を有することが判明した。

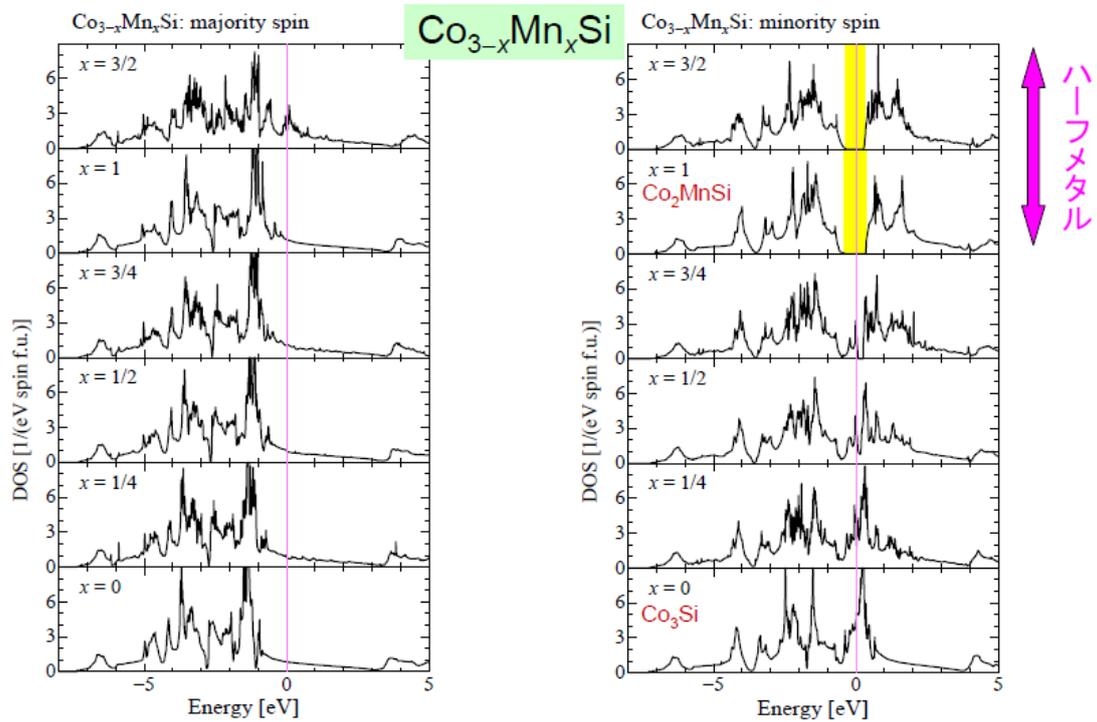


図 4.  $\text{Co}_{3-x}\text{Mn}_x\text{Si}$  における多数、及び少数スピン状態密度の第一原理計算結果

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ● 論文詳細情報

1. S. Yamada, K. Hamaya, K. Yamamoto, T. Murakami, K. Mibu, and M. Miyao, “Significant temperature-dependence of ferromagnetic properties for  $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{Si}(111)$  prepared by low-temperature molecular beam epitaxy”, Applied Physics Letters, vol. 96, Issue 8, 082511-1~3 (2010). (doi:10.1063/1.3330895)