

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06929

研究課題名(和文) エネルギーハーベスティング型巨大純スピン流生成技術の開発

研究課題名(英文) Development of giant pure spin current generation technique for energy harvesting.

研究代表者

沖 宗一郎(Oki, Soichiro)

大阪大学・基礎工学研究科・特任研究員(常勤)

研究者番号：40780838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：低消費電力動作が期待されているスピントロニクスデバイスにおいて、サブマイクロンスケールの強磁性体/非磁性体界面における熱流-スピン流変換[Nature Physics 6, 879 (2010)]は微細な素子の排熱も回収可能な技術である。

通常の電流-スピン流変換との効率を両立する強磁性体の探索のため、代表者の有する高品質・高性能な強磁性合金作製技術[Phys. Rev. B 88, 014402 (2013)]を応用し、Co-Fe系ホイスラー合金において、それぞれの性能指数と相関を実験的に明らかにし、単結晶Co₂FeSi薄膜を用いることで双方の性能指数が両立されることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Heat flow - spin current conversion at the ferromagnetic/nonmagnetic interface in sub-micron scale area is a technology that add value to spintronics devices with low power consumption. To investigate the relationship between electron - spin conversion efficiency and heat - spin conversion efficiency, we applied our high-quality ferromagnetic alloy fabrication techniques in Co-Fe based Heusler alloys. We experimentally clarified the heat - spin conversion efficiencies and correlation between electron - spin conversion efficiency. Higher efficiencies are demonstrated by using single crystal Co₂FeSi thin film.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス ホイスラー合金 純スピン流 スピнкаロリトロニクス

1. 研究開始当初の背景

「電荷」の性質を利用する電子デバイスに、電子の「スピン自由度」、つまり磁石の性質を付加させて新機能デバイスを創成する「スピントロニクス」という分野が注目を集めている。スピントロニクス素子は、不揮発メモリ機能を有するため、待機電力ゼロの低消費電力デバイスへの応用が期待されている。そのデバイス例として、スピン MOSFET が挙げられる[S. Sugahara and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* 84, 2307 (2004).]. スピン MOSFET は超高速・超低消費電力動作の他、再構成可能な論理素子への応用が可能など、次世代デバイスの中心的な存在になる特徴を有することが期待されている。これまで、申請者の研究グループでは、既存の Si-LSI との整合性を考慮して、Si や Ge といった半導体をチャンネルに用いたスピン MOSFET 作製技術の開発を行ってきた[K. Kasahara *et al.*, *Appl. Phys. Express.* 7, 033002 (2014).]. 室温動作可能なスピン MOSFET の実現のためには、強磁性体から半導体チャンネルへ高効率にスピンを注入し、それを検出する「高効率スピン注入・検出」の技術開発が重要となる。当時、強磁性体/非磁性体界面における熱流を利用したスピン注入効果である「スピン依存ゼーベック効果」[図 1; A. Slachter *et al.*, *Nature Phys.* 6, 879 (2010).] が報告され、Si-LSI の動作中のジュール発熱さえもスピントロニクス素子中で有効利用できるスピントロニクス素子の可能性が活発に研究・議論されていた。この現象を現行のスピントロニクス技術と融合することで、エネルギーハーベスティング技術を付加したスピントロニクス素子という、夢の超低消費電力デバイスの開発が期待されていた。

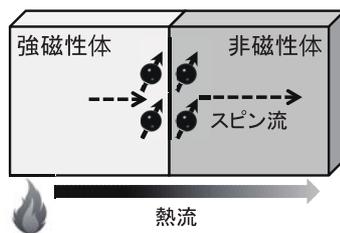


図 1. スピン依存ゼーベック効果。接合に生じている温度勾配によって、界面付近でスピンの密度に偏りが生まれ、スピンの流れ(スピン流)が生成される。

2. 研究の目的

既に代表者は、高効率にスピン流を生成する材料としてホイスラー合金系材料である $\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_{x+1}\text{Si}$ および $\text{Co}_2\text{FeSi}_{x-1}\text{Al}_x$ を高品質に形成する結晶成長技術を確立しており[*Thin Solid Films* 520, 3410 (2012); *Appl. Phys. Lett.* 105, 212402 (2013)など], これらホイスラー合金をスピン流生成部とする電流

誘起スピン注入において、巨大なスピン信号の生成・検出に成功している[*Appl. Phys. Exp.* 5, 063004 (2012); *Phys. Rev. B* 88, 014402 (2013)など].

本研究では、このようなスピントロニクス素子として求められる性能を十分満たしつつ、且つ廃熱を効率よく有効利用できる材料を探索・実証することを目的とした。

3. 研究の方法

代表者が有する低温 MBE 法を応用した組成制御技術を用いると、種々の単結晶ホイスラー合金薄膜を Si 基板上に作製することができる。これまでの研究[*Phys. Rev. B* 88, 014402 (2013); *Phys. Rev. B* 85, 100404(R) (2012)など]では、 $\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_{x+1}\text{Si}$ ホイスラー合金では、図 2 に示すような系統的な関係が見出されており、 x 値の変調によって「スピン偏極率 P 」が変化していることから、材料の「スピン状態密度」の系統的な変化が示唆されている。

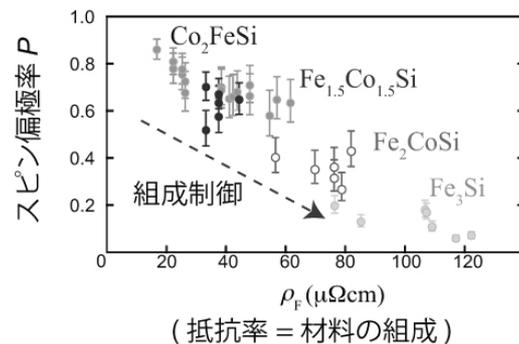


図 2. 材料組成の精密制御によるスピン偏極率 P の制御。[*Phys. Rev. B* 88, 014402 (2013)]

熱流-スピン流変換効率に相当する「スピン依存ゼーベック係数 S_S 」は一般的に、図に示すような強磁性材料特有のスピン状態密度に依存していると考えられており、 $\text{Co}_{2-x}\text{Fe}_{x+1}\text{Si}$ において、Fe と Co を精密に置換することで、 P を系統的に制御できることは、強磁性材料特有のスピン状態密度を意図的に制御していることを示唆しており、 S_S も同時に変化していることを期待させるものである。

今回、このような材料系において、スピン依存ゼーベック効果を観測し、種々の材料における熱流誘起スピン注入効果の性能指標であるスピン依存ゼーベック係数 S_S を見積もる。この結果を基に、 S_S と組成(x 値)の関係を明らかにし、スピン偏極率(P)とスピン依存ゼーベック係数(S_S)の両立が可能な組成を決定する。

4. 研究成果

(1) 熱流誘起スピン注入効果の観測可能な横型ナノスピン素子作製プロセスの確立

先行研究において、熱流誘起スピン注入の効率は電流誘起スピン注入と比較して高々数%であるため、極低温において数百 nm 以下の電極距離の横型ナノスピン素子を用いることで観測が可能になっている。単結晶ホイスラー合金において、電流誘起スピン流注入の効率は先行研究の材料と同等程度～約 10 倍のものまで様々あるが、熱流誘起スピン注入の効率については未知数であり、先行研究と同等程度の横型ナノスピン素子の作製が材料探索・性能比較の面で重要となってくる。単結晶ホイスラー合金を用いた横型ナノスピン素子の作製には、一般的なリフトオフ法による微細素子の作製が行えないため、図 3(a) のような電子線描画とイオンミリングを用いた横型ナノスピン素子の作製プロセスを確立した。

(2) 熱流誘起スピン注入効果の観測手法の確立

熱流誘起スピン注入効果の観測には、横型ナノスピン素子のスピン注入電極部分において、主に強磁性体/非磁性体接合界面に直流電流を印加する手法と、強磁性体だけに交流電流を印加し熱流注入を行う 2 つの手法がある。当初、直流電流による手法で熱流誘起スピン注入効果の観測を試みていたが、電流誘起スピン注入の効果大きい材料において、熱流誘起スピン注入の効果が小さいとその観測が困難になることが判明した。そこで交流電流源とロックインアンプを用いた測定系を新たに構築し、熱流誘起スピン注入効果のみを観測可能な交流電流による手法を確立した。

(3) 熱流誘起スピン注入効果の効率とその相関の解明

Co と Fe の組成比を段階的に変化させた単結晶ホイスラー合金 Co_2FeSi (CFS), Fe_2CoSi , Fe_3Si を用いた横型ナノスピン素子を作製し、電流誘起スピン流の観測から、スピン偏極率が過去に代表者が明らかにしたものと同様に順に小さくなることを確認した素子で、図 3(b) のようなスピン依存ゼーベック効果を観測し、その大小関係はスピン偏極率と異なり、 Co_2FeSi , Fe_3Si , Fe_2CoSi の順に小さくなることを明らかにし、さらにスピン依存ゼーベック効果の逆効果であるスピン流誘起熱流生成「スピン依存ペルチェ効果」の観測も同様に試み(図 4)、その大小関係がスピン依存ゼーベック効果と同様であることも明らかにした。以上の結果は単結晶ホイスラー合金 Co_2FeSi , Fe_2CoSi , Fe_3Si において、 Co_2FeSi がスピン偏極率・スピン依存ゼーベック係数ともに高い値を有することを示しており、一般的な熱電効果と同様にスピン依存ペルチェ係数がスピン依存ゼーベック係数に比例する関係であることを

示唆する結果である。

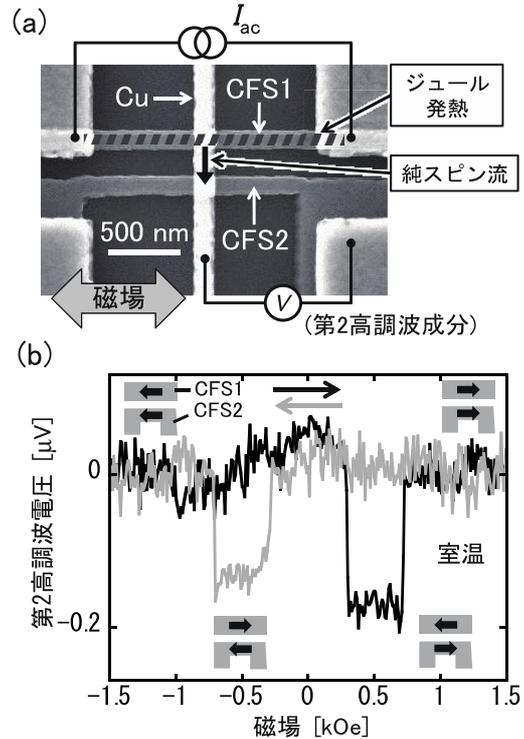


図 3. 横型スピンバルブ素子構造を用いたスピン依存ゼーベック効果測定: (a) 素子の SEM 像と測定のセットアップ. (b) 熱流により生成されたスピン流の検出を示す信号(スピン信号).

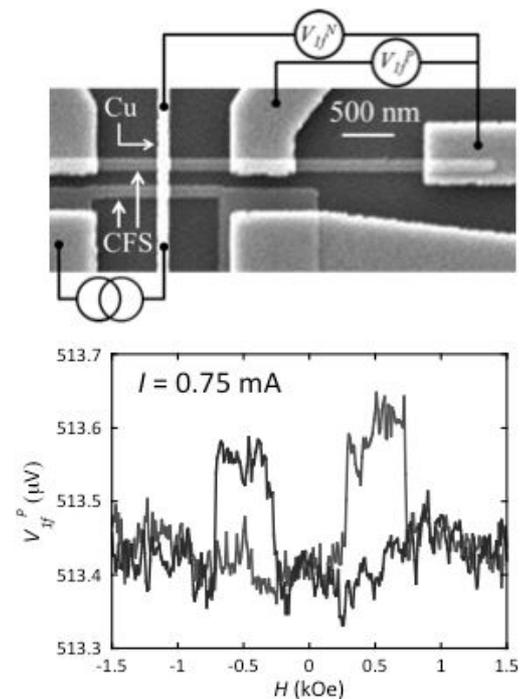


図 4. 横型スピンバルブ素子構造を用いたスピン依存ペルチェ効果測定: (上) 素子の SEM 像と測定のセットアップ. (下) スピン流により生成された熱流の検出を示す信号.

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕
なし

〔学会発表〕
なし

〔図書〕
なし

〔産業財産権〕
なし

出願状況
なし

取得状況
なし

〔その他〕
ホームページ等
<https://orcid.org/0000-0003-1929-6393>
<http://www.researcherid.com/rid/L-7065-2017>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
沖 宗一郎 (OKI SOICHIRO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・特任研究員
研究者番号：40780838

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
なし