

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22651055

研究課題名（和文） 巨大スピホール効果による電流誘起強磁性とスピン吸収トルク

研究課題名（英文） Current-induced ferromagnetism and spin torque due to large spin Hall effect

研究代表者

三谷 誠司 (MITANI SEIJI)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・グループリーダー

研究者番号：20250813

研究成果の概要（和文）：

スピホール効果は、非磁性体中において電流からスピン流が生成される現象であり、物理的に興味深い。しかし、この効果を用いたエレクトロニクス分野における機能開拓は進んでおらず、本研究では磁性制御や磁化反転といった新規機能に関する研究を行った。提案した素子の実証研究では、国外の著名なグループに先を越される形になったが、基礎的な研究の結果、種々の知見が得られ、合金元素の添加が大きなスピホール効果を得る有効な手段の一つであることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

Pure spin current can be generated from electric current through spin Hall effect in nonmagnetic materials, and therefore it is of particular interest in solid state physics. However, almost no functionality using spin Hall effect has been realized in the field of electronics. In this study, we have investigated control of magnetism and magnetization reversal using spin Hall effect. While our proposed device has been demonstrated by the other group in USA, some basic knowledge on possible functionalities of spin Hall effect has been obtained. In particular, it has been clarified that adding a second element is an effective way to enlarge spin Hall effect of materials.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	0	1,600,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	420,000	3,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：スピホール効果、スピン注入、強磁性、スピントルク、磁気素子

1. 研究開始当初の背景

磁場中の金属や半導体に、磁場（金属や半導体が強磁性体の場合には磁化）と直角方向に電流を流すと、磁場と電流の両方に対して直角の方向に電圧が生じる。これは既に良く

知られている（正常または異常）ホール効果である。一方、スピホール効果は、やや理解しにくい効果であるがホール効果の一種であり、Fig. 1 に示すように非磁性体に電流を流したときに表面や端部のスピン蓄積として

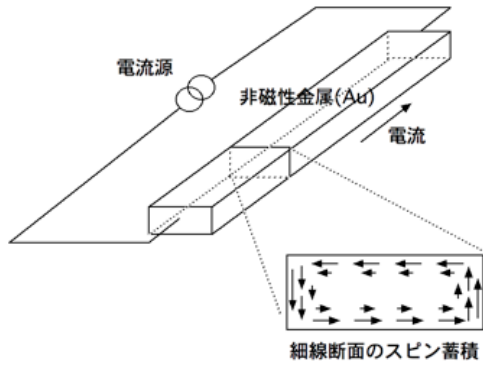


Fig. 1. スピンホール効果によるスピン蓄積。非磁性金属薄膜の表面および端部にスピン分極（スピン蓄積）が生成される。

現れる。そのスピントロニクス分野における重要性が強調されるようになってきたが、スピンホール効果を用いることによって、電流とスピン流を相互に変換することが出来るためである。しかし、応用に繋がるような具体的な機能開拓は十分には進んでいない。

スピンホール効果が基礎研究に留まり、スピントロニクスの機能性として広がりを持たずにいた理由はその大きさであり、Al 等では電流からスピン流を生成する効率（大まかにはホール角）は 0.01 未満である。このような背景の中、研究代表者らは Au のスパッタ薄膜が巨大なスピンホール効果を示すことを見いだし（参考文献 1 : Seki et al., Nature Mater. 7, 125 (2008)), 新規機能性の開拓について検討を始めた。

2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では、Au のスピンホール効果を利用した機能性の開拓として、磁性制御や磁化反転に関する現象の観測を試みる。具体的には、Au, Pt やそれらの合金等の大きなスピンホール効果の発現が期待される非磁性体に、フェルミレベル近傍に大きな状態密度を有し、常磁性状態と強磁性状態のエネルギー差の小さい NiPd 等の合金層を接触させ、スピンホール効果による NiPd 合金等へのスピン注入を行う (Fig. 2)。これによる常磁性-強磁性転移やキュリー温度の制御の可能性を検討する。また、同様の実験によって、NiFe 合金等の磁化反転の起こりやすい強磁性体にスピンを注入し、スピン吸収トルクによる磁化反転を試みる (Fig. 3)。

3. 研究の方法

大きなスピンホール効果を示す材料を得るために Au 等の重金属、および Au に Fe や Pt などの添加元素を加え他合金等について薄膜

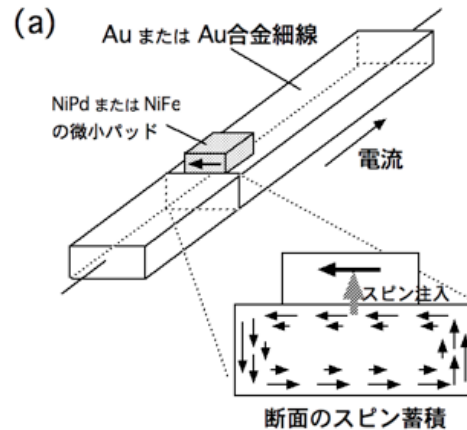


Fig. 2. 非磁性体を強磁性化する実験に用いる試料構造の模式図。

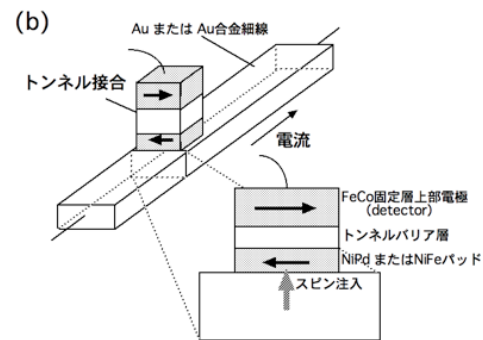


Fig. 3. スピンホール効果を利用したスピントルク磁化反転の実験に用いる試料構造の模式図。

試料を作製し、スピンホール効果の評価を行う。

Fig. 2 や Fig. 3 に模式図を示した素子について、スパッタ法、リソグラフィ法を用いた試料作製を行い、目的とする特性の評価を行う。評価手段としては、磁気光学カー効果や文献 1 と同様の電氣的測定などを用いる。電氣的測定では、エルステッド磁場とスピンホール効果によるスピントルクを分離して解析する必要があり、数値的な見積りの他に試料サイズ依存性を調べることも行う。

4. 研究成果

大きなスピンホール効果を示す材料系の選択に関して、スピンホール効果に及ぼす添加元素効果について検討を行った。Fe や Pt の添加によって Au のスピンホール効果が増大する可能性が知られており、詳細な振る舞いを調べた。Fig. 4 はその一例であり、Fe を少量添加した Au のスピンホール効果のデータ

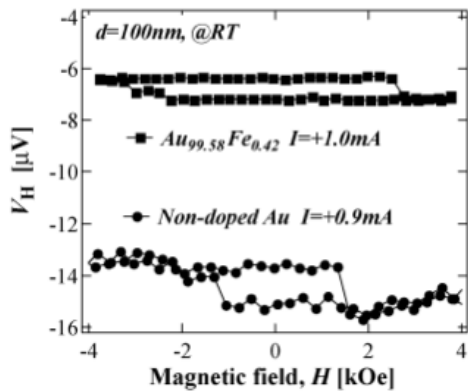


Fig. 4. Au および Fe を添加した Au 合金のスピホール効果。素子構造は参考文献 1 と同じであり、スピホール効果の検出に垂直磁化の FePt 合金電極を用いている。

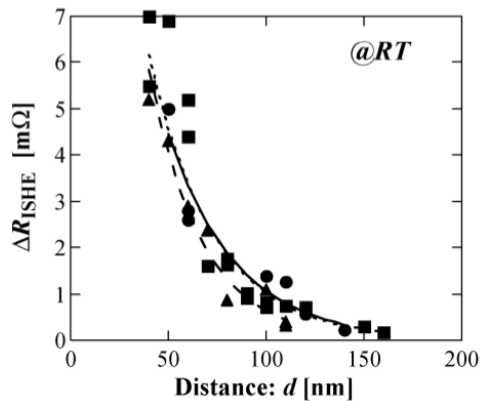


Fig. 5. Fe を添加した Au 合金のスピホール効果の Fe 添加 Au 合金細線長さ依存性。●、■、▲は、それぞれ Fe 添加量 0%、0.42%、0.95% の試料のデータ点であり、それぞれの曲線はモデルフィット。

である。添加元素により、電気抵抗率が変化するため、このデータだけからでは、スピホール効果の大きさ（スピホール角）は求められない。これに加え、電気抵抗率のデータや素子のサイズ依存性等（スピ拡散長をもとめるための、Fe 添加の Au 細線の長さ依存性 (Fig. 5) など）から解析を行い、Fe 添加の Au のスピホール角の大きさを得た。この評価において、Fe や Pt は Au の母合金中に最初から極微量の不純物として混ざっている

ため、スピホール効果の濃度依存性が重要である。Fe 濃度に対してスピホール角はほぼ一定 (0.07 程度) であり、重要なことは不純物濃度が増えてもスピホール角が減少しないことである。この挙動から、Fe 添加の Au の大きなスピホール効果の発現機構として、Fe 不純物における共鳴スキュー散乱が考えられる。Pt に関しても同様の結果が得られているが、Pt では添加によって少しスピホール角が増大する様子も見られており、Fe とは異なる役割を果たしていると思われる。理論研究グループからのサポートもあり、Fe や Pt の少量添加が Au のスピホール効果を大きくする微視的メカニズムの理論的解釈についても一定の進展が得られた (参考文献 2 : B. Gu et al. Phys. Rev. Lett. 105, 216401 (2010))。

スピントルクによる磁化反転そのものも本研究の基盤的研究項目であるため、スピ注入磁化反転の物質依存性や基礎的理解に関して研究を進めた。磁気ダンピング係数の低減は高効率スピ注入磁化反転の実現において不可欠であるが、磁気異方性の大きさや飽和磁化の大きさと直接的な相関を持っていない (Fig. 6)。磁気ダンピングの大きさを与える微視的機構の理解を進め、適切な大きさの磁気ダンピング、磁気異方性、飽和磁化を有する強磁性体の選択が重要かつ可能であることが分かる。これらの研究については、論文 (発表論文 (2) : S. Mitani, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 384003 (2011)) にその一部をまとめた。

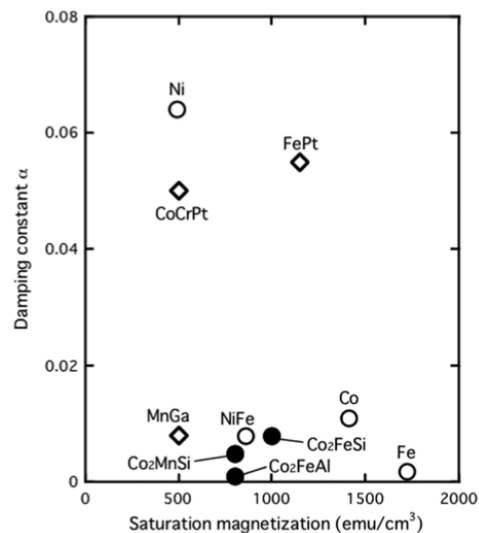


Fig. 4. 種々の強磁性材料の磁気ダンピング定数 (α) と飽和磁化 (M_s)。ダンピングと磁化の間には特定の相関は見られない。

Fig. 3 に模式的に示したスピントルク効果によるスピントルク磁化反転の実証は本研究のハイライトである。その理由は、スピントルク効果という基礎的物性を、はじめてエレクトロニクス分野において応用展開させるものであり、新現象の新技术への応用の好例となるためである。具体的には、スピン注入磁化反転による高集積度磁気ランダムアクセスメモリへの応用が考えられ、当該分野における最大の技術課題である書き込み電流密度の低減という課題を解決できる可能性がある。(正確には書き込み電流密度を下げられるかどうかは不明であるが、素子構造が根本的に変わるため、障害となっていた設計要件が大きく緩和される。) しながら、ごく最近、同様の実験の研究報告が、スピントロニクス分野を先導する世界的有力グループである米国コーネル大学の Liu, Ralph らによりなされ(参考文献 3: Liu et al., Science 336, 555 (2012)), 先を越された形となった。本研究では、Au や Pt を中心に大きなスピントルク効果を得て、それを活用することを検討したが、コーネル大の Liu らは Ta が Au や Pt の合金を超える大きなスピントルク効果を示すことを発見し、それを Fig. 3 の素子構造に適用している。その結果、実用化を展望できるレベルの電流値でのスピントルク磁化反転を実現しており、同時に新規アーキテクチャについても言及している。Liu らの成功より、本挑戦的萌芽研究の狙いは良かったことが示されたが、最適物質の発見については予見できなかった。(なお、Ta のスピントルク効果については、不明な点が多く残されており、一層の研究が必要である。)

スピントルク効果によるスピントルク磁化反転の世界初の実証については予定通りにはいかなかったが(他者が先行)、スピントルク効果とそれによるスピントルクの基礎的理解については種々知見・進展を得ており、現状では Rashba 効果の影響やトルクの作用する方向の問題が解決すべき課題となっている。また、それらは世界中を研究者をまき込む、今後のホットなトピックスになりつつある。本研究を通じて、基盤研究の段階に進むための基礎・要素を得ることができ、挑戦的萌芽研究の役割という意味ではある程度の達成がなされたと思われる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) S. Mitani, “Perpendicular magnetization of Co_2FeAl full-Heusler alloy films induced by MgO interface”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44, 384003-1-8 (2011). (査読あり)

(2) I. Sugai, S. Mitani and K. Takanashi,

“Influence of Fe impurity on spin Hall effect in Au”, *IEEE Trans. Magn.* 46, 2559-2561 (2010). (査読あり)

[学会発表] (計 2 件)

(1) H. Sukegawa, S. Kasai, T. Furubayashi, S. Mitani and K. Inomata, “Current-induced magnetization switching in Heusler alloy based devices”, International Magnetism Conference (Intermag), April 25-29, 2011, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan

(2) S. Mitani, “Magnetic tunnel junctions with unconventional materials and nanostructures”, 10th IEEE International Conference on Nanotechnology, August 17-20, 2010, KINTEX, Seoul, Korea.

[その他]

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/apfim/spin/index.j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三谷 誠司 (MITANI SEIJI)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・グループリーダー

研究者番号: 20250813

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

葛西 伸哉 (KASAI SHINYA)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・主任研究員

研究者番号: 20378855

林 将光 (HAYASHI MASAMITSU)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・主任研究員

研究者番号: 70517854

(4) 研究協力者

菅井 勇 (SUGAI ISAMU)

東北大学・金属材料研究所・大学院生

関 剛斎 (SEKI TAKESHI)

東北大学・金属材料研究所・助教

高梨 弘毅 (TAKANASHI KOKI)

東北大学・金属材料研究所・教授

近藤 浩太 (KONDOU KOUTA)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・NIMS ポスドク研究員

介川 裕章 (SUKEGAWA HIROAKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・磁性材料ユニット・研究員