

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25年6月11日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22681021

研究課題名（和文）スピン波を用いた超高速演算素子実現のための基盤構築

研究課題名（英文）Fundamental study of spin wave propagation for future logic circuit

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：スピン波を用いた次世代超高速論理演算素子の実現のため、強磁性薄膜におけるスピン波輸送物性を調べ、また、新規スピン波励起手法として、スピンホール効果の検討を行った。スピンホール効果によって、最大 50%を越える緩和定数の変調に成功した。また、低散逸スピン波媒体として強磁性絶縁体 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 単結晶薄膜に注目し、そのスピン波輸送を測定した。

研究成果の概要（英文）：For realizing the future logic circuit using the spin wave, fundamental properties of spin waves in ferromagnetic thin films have been investigated. The spin Hall effect can reduce the damping constant of ferromagnetic thin films down to 50 %, that is new candidate for exciting the spin wave. The spin wave properties of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ thin films deposited by have been also investigated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

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：スピンドバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) スピントロニクス

近年、スピントロニクス分野が世界的な研究潮流となっている。当該分野は、電子の持つ二つの自由度、すなわち電荷とスピンを組み合わせた新たなエレクトロニクスデバイスを実現し、現行半導体エレクトロニクスデバイスに新たな機能付加を行おうとするものである。スピントロニクスは CMOS のスケールリング限界を打破する新たなキーテクノロジーとしても注目を集めている。現在、最も注

目されているのは、磁気トンネル接合における高い磁気抵抗比を利用した磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM: Magnetic Random Access Memory)である。スピントロニクスデバイスの大きな特徴である情報の不揮発性を利用することで、素子のノーマリーオフ動作を可能とし、結果素子消費電力の大幅な低減が可能になると期待されている。

(2) スピンドダイナミクスとスピン流

スピントロニクス分野においても一つの大きな研究課題として注目されているのが、

スピンドायナミクスとスピン流である。磁気トンネル接合を MRAM として利用する場合、情報の書き換え、すなわちスピンの反転が必要となる。その際に生じるスピンドायナミクスに関しては現在精力的に研究が行われている。また、スピン波と呼ばれる磁化ダイナミクスが励起された状態では、電荷を伴わないスピンの流れ、すなわちスピン流が流れることが知られている。非磁性・強磁性積層膜においては、非磁性体の存在によって、強磁性共鳴の半値幅が増大することも報告されている。これはスピンプンピングと呼ばれる現象であり、後述するスピンホール効果の発見へとつながった。

2. 研究の目的

現行のスピントロニクスデバイスは主にスピン偏極した電流を用いているのに対して、本研究では、スピン波・スピン流を用いた次世代スピントロニクスデバイスの構築をめざす。スピン波は強磁性体における素励起の一つであり、数十マイクロメートルにわたる長い減衰長や、1000 m/s を容易に越える高い群速度、数 GHz から 100 GHz におよぶ高い共鳴周波数を有している。また、自己収束モードなど、多くの非線形モードが存在しており、これら機能をうまく使えば、数十 GHz で動作可能な、超高速論理演算素子の実現が期待される。

本研究の目的は、スピン波を用いた、上記超高速論理演算素子実現のための基盤を構築することである。現行のスピン波の励起・検出手法の一つであるアンテナ法の検証を行うとともに、強磁性・非磁性接合におけるスピンホール効果の定量評価を行い、新規スピン波励起手法としての有用性を探索する。また、スピン波の電子系への散逸が少ないと考えられる高機能酸化磁性薄膜におけるスピン波伝播を検出し、そのポテンシャルを探る。

3. 研究の方法

(1) スピン波の励起・検出手法の検討と評価

強磁性薄膜におけるスピン波の周波数・時間分解測定手法を検討する。特に従来手法であるアンテナ法によって、スピン波を周波数分解および時間分解検出を行うことでスピン波の分散関係を調べる。

(2) スピンホール効果を用いたスピン波の励起

スピンホール効果は非磁性金属内部におけるスピン軌道相互作用に起因する現象であり、電流から純スピン流を生成することができる。この純スピン流を強磁性体へ注入することで、強磁性体中の磁気モーメントにトルクを与えることができる。しかし電流-スピン流変換効率に相当するスピンホール角 θ の評価に関しては、多くの報告例がありながら定量的な一致には至っていない。本研究では、スピント

ルク強磁性共鳴法(ST-FMR)を用いることで、 θ の評価を行うと同時に、スピン流を用いた磁化の自励発振を試みる。

(3) 強磁性絶縁体 Fe_2O_3 単結晶薄膜におけるスピン波の励起と検出

スピン波の減衰長は強磁性体の Gilbert 緩和定数によって決定される。Gilbert 緩和定数の微視的起源に関しては、いまだ多くの議論があるが、金属の場合、主に伝導電子系への散逸が大きな原因となると考えられている。実際に液滴法などで作られたガーネット系強磁性絶縁体(YIG 等)では、金属系に比べて非常に小さな緩和定数となり、スピン波物性を調べるうえで有効な系である。

一方で、現在まで行われている酸化磁性薄膜についての研究は、多くの場合薄膜とはいえ、数 μm 程度の厚さを有するバルク単結晶であり、数十ナノメートル程度の薄膜に関する報告例はほとんどない。本研究では、スパッタ法で成膜した $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 絶縁体強磁性薄膜に注目し、そのスピン波をアンテナ法を用いて測定し、その輸送物性についての知見を得る。

4. 研究成果

(1) スピン波の励起・検出手法の検討と評価

膜厚 20-50 nm の Py 薄膜に絶縁体を介して透過型および反射型の 2 本のアンテナを形成し、ネットワークアナライザを用いた周波数分解測定手法、およびサンプリングオシロスコープの TDR モードを用いた時間分解測定手法によるスピン波の検出を行った。一例として、図 1 に TDR によるスピン波の時間分解検出結果を示す。太線が一方の電極におけるパルス磁界印加のタイミングを示し、

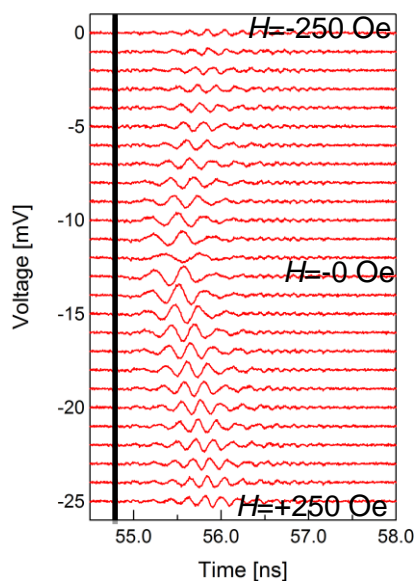


図 1 Py 薄膜(膜厚 20 nm)の Py 薄膜におけるスピン波伝播の検出。電極間隔距離は 10 μm である。

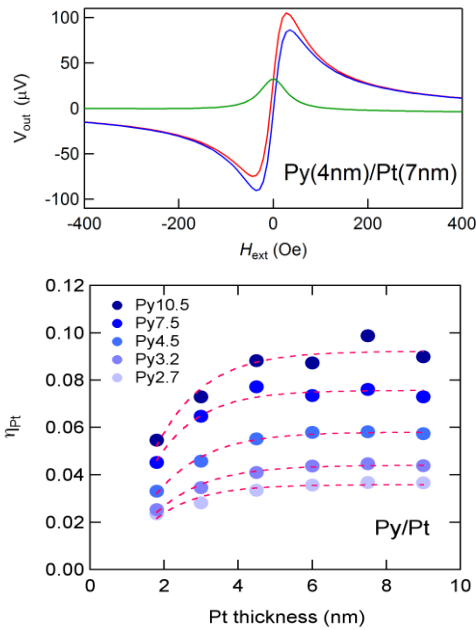


図 2(a) Py(4 nm)/Pt(7 nm) 積層膜における ST-FMR スペクトル。赤線が実験結果を、緑線と青線が対称および非対称成分を表す。(b) η の Py および Pt 膜厚依存性。

そこからしばらく遅れてスピン波に対応する誘導起電力が検出されている。外部磁場を正負に印加するのに伴い、到達時刻の遅れ、すなわち群速度の遅延が観測されている。また、固有周波数は増大する。これらの結果から、スピン波の分散関係を得ることができる。ただし、本測定で用いている Py は金属強磁性体であり、アンテナと薄膜間におけるカップリング、および TDR のパルス立ち上がり時間を反映して、高磁場領域では信号強度が減衰する。これらの点は誘導起電力をモデルフィッティングし、たとえば緩和定数などの評価を行う上では問題となることが分かった。

(2) スピンホール効果を用いたスピン波の励起

強磁性体として Permalloy, 非磁性体として、Pt、Pd 等を用いた二層膜において、ST-FMR の測定を行った。当該手法では、非磁性体を流れる交流電流によって生じる誘導磁場とスピン流が強磁性体にトルクを与え、共鳴スペクトルを得ることができる。典型的なスペクトルを図 2(a) に示す。得られたスペクトルは非対称である。現象論的なモデルによれば、対称成分と反対称成分の比率 η がスピンホール角に対応する量となる。得られた η は図 1(b) に示すように、非磁性体、磁性体の厚さに依存する。非磁性体厚さに対する依存性は、非磁性体におけるスピン拡散長を反映したものだとして解釈することができる。実際に特性長を評価するとおよそ 1 nm 程度

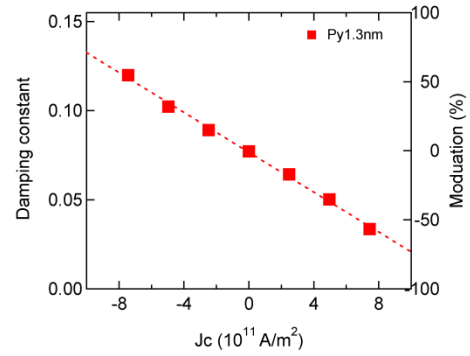


図3 Pt 中電流密度に対する有効緩和定数の変化。

となる。一方で強磁性体膜厚依存性については、強磁性体内部に交流電流が流れた結果、スピントランスファートルクによるスピン波励起が生じているものと考えられる。これら二つの効果が、従来研究におけるスピンホール角の定量的不一致の大きな原因であると考えられる。当該効果を除外し、真のスピンホール角を求めるために η の強磁性薄膜の厚さゼロ極限を取ると、Pt のスピンホール角は $\theta = 0.02$ と評価される。その他、Ta、Pd 等についてもスピンホール角の評価を行った。

スピン流による自励発振の可能性を調べるため、上記試料に直流電流を重畳し、有効的な緩和定数の変化を測定した。直流電流の印加によって、緩和定数は線形に増減し、最大で 50% を超える緩和定数の低減に成功した。これは、スピンホール効果がスピン波励起手法として大きなポテンシャルを有していることを示唆している。また、詳細な膜厚依存性によれば、 η は非磁性体の膜厚には依存するが、強磁性体の膜厚には依存しない。これは、上記 ST-FMR の場合と異なり、強磁性体中を流れる直流電流が不要なスピン波励起を生じないことを示している。

(3) 強磁性絶縁体 Fe_2O_3 単結晶薄膜におけるスピン波の励起と検出

スパッタ法を用いて MgO 基板上に作成した、強磁性絶縁体 Fe_2O_3 単結晶薄膜のスピン波をネットワークアナライザとアンテナ法を用いて周波数領域で測定した。図 4 に典型的なスペクトルを示す。(a) 励起電極における反射スペクトル、および (b) 検出電極における透過スペクトルとも、明瞭な信号が観測されている。外部磁場の印加に伴い、信号強度の増大、および半値幅の現象が観測されているが、これは、 Fe_2O_3 薄膜内部の不均一性を反映したものであると考えられ、実際に磁化過程と対応する。スピン波の群速度は Py 薄膜よりも数倍速く、今後膜質の改善によって、デバイスへの応用可能性が期待される。

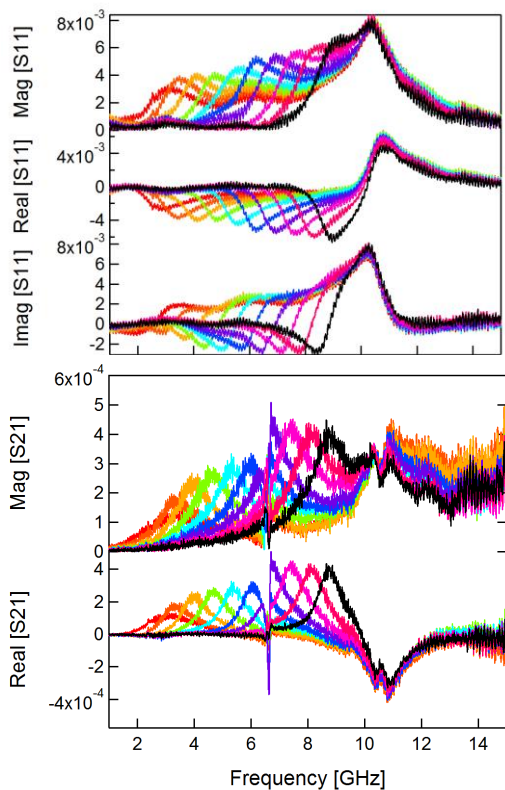


図 4 Fe_2O_3 単結晶薄膜におけるスピン波の検出結果。アンテナ間距離は $10\ \mu\text{m}$ である。(a) 励起アンテナにおける反射スペクトル。(b) 検出アンテナにおける透過スペクトル。10.5 GHz 付近に現れるピークはレファレンス信号によるものである。

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] (計 1 件)

- ① Kouta Kondou, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani, Kazuhito Tsukagoshi, and Shinya Kasai, "Evaluation of Spin Hall angle and Spin Diffusion Length by Using Spin Current-Induced Ferromagnetic Resonance", Applied Physics Express, 査読有, Vol.5, pp.073002-1-3, 2012

[学会発表] (計 7 件)

- ① 近藤浩太、介川裕章、三谷誠司、葛西伸哉、大谷義近、低温におけるスピントルク強磁性共鳴測定、日本物理学会第 68 回年次大会、2013/3/27、広島大学
- ② Y. Otani, K. Kondou, Y. Niimi, S. Kasai, H. Sukegawa & S. Mitani, "Thickness

dependence of SH angle evaluated by means of ST-FMR for $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pt}$ (or Pd) bilayer", Wilhelm und Else Heraeus Seminar on spin-orbit-driven transverse transport phenomena, Bad Honnef, Germany, 2012/12/4

- ③ Shinya Kasai, Kouta Kondou, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani and Kazuhito Tsukagoshi, "Spin current induced ferromagnetic resonance in ferromagnetic / non-magnetic bi-layer thin films", 2012/10/04, ICAUMS2012, 奈良
- ④ 近藤浩太、介川裕章、塚越一仁、三谷誠司、葛西伸哉、非磁性/強磁性接合におけるスピン流誘起強磁性共鳴の検出：材料依存性、2012 年日本物理学会秋季大会、2012/9/20、横浜国立大学
- ⑤ 近藤浩太、介川裕章、塚越一仁、三谷誠司、葛西伸哉、非磁性/強磁性接合におけるスピン流誘起強磁性共鳴の検出 II、日本物理学会 67 回年次大会、2012/3/26、関西学院大学
- ⑥ Shinya Kasai, YoshiChka Otani, Yasuhiro Fukuma, Kazuhito Tsukagoshi, Jun-ichiro Ohe, Sadamichi Maekawa, and Seiji Mitani, "RF voltage response induced by waveguide FMR in ferromagnetic / non-magnetic bi-layeres", ASRC Workshop on Magnetic Materials and Nanostructures, 2012/1/13, 日本原子力研究機構
- ⑦ 近藤浩太、柳原英人、喜多英治、介川裕章、塚越一仁、三谷誠司、葛西伸哉、非磁性/強磁性接合におけるスピン流誘起強磁性共鳴の検出、2011 年日本物理学会秋季大会、2011/9/23、富山大学

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし