

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600078

研究課題名(和文)電界誘起マグノン干渉効果

研究課題名(英文)Electric field induced magnon interference

研究代表者

安藤 和也 (ANDO, KAZUYA)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：30579610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：磁性絶縁体中の角運動量輸送はマグノンによって担われる。マグノンの持つ角運動量は金属/磁性絶縁体界面におけるスピン交換により伝導電子スピン流へと受け渡すことができ、このようなマグノン-伝導電子スピン流変換は絶縁体ベースのスピン트로ニクス基盤となる。本研究では、磁性絶縁体から金属へと流れ出す伝導電子スピン流の精密測定により、伝導電子スピン流と結合しないマグノンモードを発見した。さらにマグノン分裂によるスピン流増大現象とスピン系緩和時間の測定により、マグノン相互作用もスピン変換効率の小さなマグノンモードを生成することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Magnons are responsible for the angular momentum transport in magnetic insulators. The angular momentum of magnons can be transferred to conduction electrons at metal/magnetic insulator interfaces, which is the foundation of insulator-based spintronics. In this study, we revealed disappearance of the angular momentum conversion between magnons and conduction electron spins by measuring spin-current emission from a magnetic insulator. We also found that magnon splitting also creates the magnon mode that is disconnected to the conduction electron spin currents at metal/magnetic insulator interfaces.

研究分野：総合理工

キーワード：スピン트로ニクス

1. 研究開始当初の背景

電荷の流れである電流に対し、電子スピンの流れ「スピン流」を生成することも可能である。伝導電子により輸送される電流が金属及び半導体中でしか存在しないのに対し、スピン流は金属・半導体中の伝導電子型スピン流に加え、スピン系の素励起「マグノン」によって絶縁体中においても伝導する。マグノンスピン流の著しい特長は、その緩和長にある。金属系における伝導電子スピン流は典型的には数ナノメートルから数百ナノメートルで緩和してしまうのに対し、マグノンによって輸送されるスピン流はミリメートルオーダーの距離を伝導する。

これまでの研究により、金属/磁性絶縁体界面における界面スピン交換を用いることでマグノン-伝導電子スピン流変換が可能となることが明らかとなり、金属ベースのスピン트로ニクスと絶縁体ベースのスピン트로ニクスの融合が可能となった。これを契機に金属/磁性絶縁体接合におけるスピン트로ニクス研究が始まり、マグノンスピン流の制御手法の確立が求められることとなった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、金属/磁性絶縁体ヘテロ構造におけるマグノンスピン流制御手法を確立し、マグノンをベースとしたスピン트로ニクスの新たな可能性を拓くことにある。マグノンスピン流制御には電場によるマグノン位相制御と角運動量注入によるマグノンスピン流制御の2つの可能性があるが、この実現には金属/磁性絶縁体接合におけるマグノン-伝導電子スピン流変換の基礎的理解が必須である。本研究を推進するにあたり、磁性絶縁体表面のエッチングによりマグノン-伝導電子スピン流変換の精密測定が可能となり、その中で金属/絶縁体界面において伝導電子スピン流へと変換されないマグノンモードが存在することが明らかとなった。当初の計画では電界効果によるマグノン位相変調を中心に調べる予定であったが、上記発見はこれまで知られていなかったスピン트로ニクス現象であり、絶縁体ベーススピントロニクスの基盤となる物理である。さらに、金属/磁性絶縁体界面におけるスピン変換の精密測定が可能となったことから、非線形マグノン相互作用の寄与を定量的に明らかにするルートが開けた。金属/磁性絶縁体界面における非線形スピン変換は、磁性絶縁体への角運動量注入によるマグノンスピン流制御に非線形性をもたらす可能性があり、本研究では金属/磁性絶縁体界面におけるマグノン-伝導電子スピン流変換消失現象と非線形スピン変換の起源解明を目指した。

3. 研究の方法

マグノンと伝導電子スピン流が結合する簡単な系として、磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット (YIG: $Y_3Fe_5O_{12}$) と強いスピン軌道相互作用を示す常磁性金属 Pt を接合した Pt/YIG 二層構造を用いた。YIG はガーネット構造をもつフェリ磁性絶縁体であり、現在知られている中で最も小さい磁気ダンピングを示す磁性材料の一つである。磁気ダンピングはマグノンスピン流の緩和を支配するため、YIG 中のマグノンスピン緩和長はミリメートルオーダーであり、数ナノメートルから数マイクロメートルである伝導電子スピン流の緩和長と比較して桁違いに長く、絶縁体スピントロニクスの中心的な研究材料として用いられている。

本研究では Liquid-Phase-Epitaxy 法により成長した単結晶 YIG を用いた。YIG の表面は過酸化水素水と濃硫酸の混合溶液を用いたピラニアエッチングにより洗浄し、その後 Pt をスパッタリング法により成膜した。ピラニアエッチングに表面洗浄では、YIG をイオン交換水に 5 分間浸し、次に過酸化水素水と濃硫酸を 1 対 1 で混合した溶液で 10 分間洗浄した。この手順を 2 度繰り返し、最後にイオン交換水に 10 分間洗浄した。このプロセスにより、YIG から Pt へと注入されるスピン流が 1 桁程度増大することが確認され、絶縁体を含むヘテロ構造におけるスピン流の精密測定が可能となった。本測定では、マイクロ波の伝送路としてコプレーナーウェーブガイドを用いた。コプレーナーウェーブガイドの中央の信号線に高周波電流を流すことで信号線上に高周波磁場を発生させる。Pt/YIG 試料はコプレーナーウェーブガイドの中心に、厚さ $5 \mu\text{m}$ の絶縁性樹脂を挟んで配置した。マイクロ波によって非平衡なマグノンが励起されると、このマグノンから伝導電子スピン流へと角運動量移行が界面で見られる。Pt へと注入されたスピン流は逆スピンホール効果により起電力へと変換されるため、信号線と平行な向きに沿って外部磁場を印加し、マイクロ波吸収と同時に Pt 層に生じる起電力を測定することで、磁性絶縁体からのスピン流生成を精密に測定した。

4. 研究成果

金属/磁性絶縁体界面におけるマグノン-伝導電子スピン流変換に関する実験を行った結果、下記 2 点の重要な成果が得られた。

(1) マグノン-伝導電子スピン流変換のモード依存性

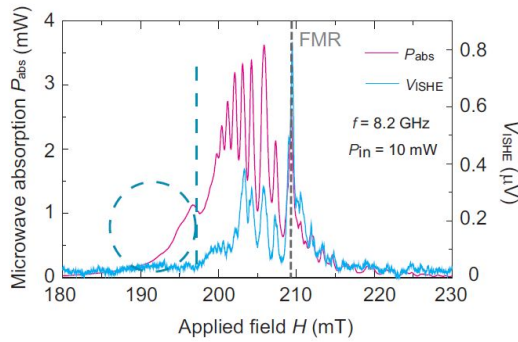


図1 .Pt/YIGにおいて測定した8.2 GHzのマイクロ波周波数におけるマイクロ波吸収スペクトルと逆スピホール電圧の測定結果。210 mTにおける信号が強磁性共鳴（FMR）によるものであり、205 mT以下において逆スピホール電圧 V_{ISHE} が極端に減少し、更に低磁場では電圧が消失した。

磁性絶縁体における角運動量輸送を担うマグノン、あるいはスピン波は、磁気双極子相互作用が支配的となる静磁スピン波、交換相互作用が支配的となる交換スピン波、さらに磁気双極子相互作用と交換相互作用が影響する双極子-交換スピン波の3つに分類される。静磁スピン波によるスピン流生成において、表面局在性の強い表面モードスピン波が高いスピン流生成効率を示すことがこれまでに明らかになっている。これは、金属との界面に存在するスピン波が磁性絶縁体からのスピン流生成を担うという一般的理解と整合しており、広く受け入れられてきた。このような表面モードスピン波は一樣モードの強磁性共鳴磁場よりも低磁場側に現れるが、本研究では、このような磁場領域において、極端にスピン流生成効率が低いスピン波モードが存在することを明らかにした。この結果を図1に示す。

図1の測定結果は、Ptの逆スピホール効果による電圧 V_{ISHE} と同時に測定したYIGのスピン波励起によるマイクロ波吸収強度 P_{abs} である。図1の結果は、205 mT以下の外部磁場で急激に逆スピホール電圧が小さくなり、更に低磁場側ではマイクロ波吸収信号は明確に観測されるものの、電圧信号は消失することを示している。逆スピホール効果による電圧はPtへと注入されたスピン流量に比例するため、この磁場領域ではマグノンが励起されながらも磁性絶縁体からのスピン流生成が消失したことを表す。一般にスピン流生成効率が高いとされてきた表面スピン波は、一樣モードの磁気共鳴よりもエネルギーが高いため、図1の結果では210 mTの強磁性共鳴磁場よりも低磁場側に対応する。本実験結果は、このような領域においても強磁性共鳴モード及び後退体積波モードと比較してスピン流生成効率が低い。さらに、電圧が消失する磁場領域は、表面スピン波が励起さ

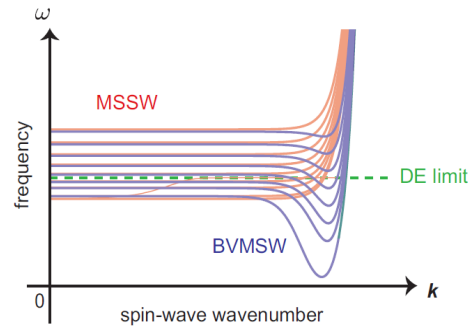


図2 . スピン波のエネルギー分散。MSSWとBVMSWは、それぞれmagnetostatic surface wave, とbackward volume magnetostatic spin waveを表す。DE limitはDamon-Eshbach limitであり、表面スピン波が励起される最大エネルギーに対応する。

れる最大エネルギーのDamon-Eshbach limit（図2）よりも高エネルギー領域に対応する。このような振る舞いはマイクロ波励起周波数を変えた場合にも系統的に変化し、5 GHzから10 GHzのマイクロ波励起周波数範囲では、いずれの周波数においてもDamon-Eshbach limitとともにスピン流の消失現象が観測された。これまでの計算により、膜厚方向のスピンを考慮することでこの磁場領域にもスピン波モードが励起されることを明らかにしており、このようなスピン波モードの空間プロファイルは表面磁気異方性に依存する。本現象の数値的解析により、金属/磁性絶縁体接合におけるマグノン-伝導電子スピン流の変換現象を定量的に理解することが可能となる。

(2) マグノン相互作用の効果

絶縁体中のスピン流を担うマグノンは角運動量を持つ素励起であり、分裂・結合過程が発現する。即ち1つのマグノンはエネルギー・運動量保存則を満たす範囲内で複数のマグノンに分裂することが可能である。金属/磁性絶縁体接合において一樣モードの非平衡マグノンが2つのマグノンに分裂することで、金属へと流れ出すスピン流が増大することがこれまでに知られていた。

上記現象の起源として、マグノン分裂によるスピン系の寿命変化がある。非平衡マグノンの持つ角運動量は常に格子系へと散逸しているため、マイクロ波からスピン系へと移行した角運動量をマグノン分裂過程により長寿命のマグノンへと受け渡すことで、定常状態でマグノン系が持つ角運動量が増大する。マグノンの持つ角運動量が金属を流れるスピン流を駆動するスピン圧に相当するため、長寿命マグノンへの角運動量移行により、

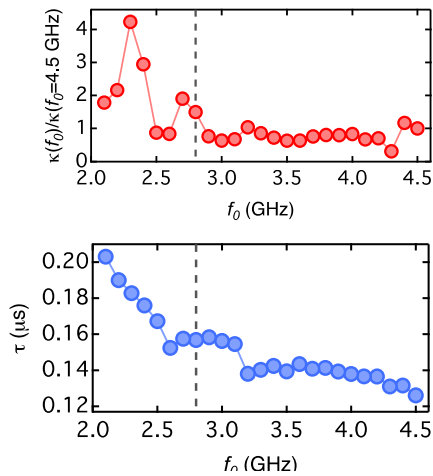


図3. スピン流生成効率のマイクロ波周波数依存性(上図)とスピン系の緩和時間のマイクロ波周波数依存性(下図)。スピン流生成効率は、(逆スピンホール効果による電圧)/(マイクロ波吸収強度)と定義している。

スピン流生成効率が增大することが期待される。実際、金属へと流れ出すスピン流量とスピン系の緩和時間を時間領域で測定した結果、マグノン分裂が生じるとスピン流が増大し、このときスピン系の緩和時間が長くなるという結果が得られた。マグノン分裂はマグノン数非保存のプロセスであるが、さらにマグノン数を保存する散乱においても同様のスピン流増大現象が観測され、スピン系の緩和・寿命変化が金属へと流れ出すスピン流量に強い影響を与えることが明らかとなった。

今回、2マイクロメートルのYIGを用いたスピン流生成実験において、スピン流の増大とスピン系の緩和時間の相関が破れることが明らかとなった。この実験結果を図3に示す。マグノン分裂が現れるためには一様モードのマグノンがエネルギー・運動量保存則を満たすように分裂する必要があるため、有限波数にエネルギー極小値を持つ特徴的なYIGのエネルギー分散の形から、マイクロ波励起周波数を下げていくと、ある周波数を境にこのエネルギー極小値へと一様モードマグノンの分裂が現れる。この周波数(図内点線)以下の周波数では、(逆スピンホール効果による電圧)/(マイクロ波吸収強度)で定義されるスピン流生成効率が增大している。このとき図3の下図に示すようにスピン系の緩和時間は増大しており、上記モデルと整合している。緩和時間測定にはパルスマイクロ波を用い、磁性絶縁体から流れ出すパルススピン流を逆スピンホール効果により検出することで見積もった。磁性絶縁体からのスピン流注入、逆スピンホール効果によるスピン流-電流変換の時間スケールは、磁性絶縁体中のスピン緩和時間と比べれば圧倒的に短い

ため、このような測定によりスピン系の緩和時間を直接測定することができる。

重要な結果は、マグノン分裂が表れる周波数よりもさらに周波数を下げ2.3 GHz以下となると、スピン流生成効率が減少することである。この周波数領域ではスピン系の緩和時間は増大を続けており、この絶縁体から生成されるスピン流の増大現象はスピン系の緩和時間変化のみでは解釈できないことを示している。

研究成果(1)の金属/磁性絶縁体接合において見出されたスピン流変換の消滅現象から、マグノン-伝導電子スピン流変換に寄与しないマグノンが存在することが明らかである。従って、図3の実験結果は、一様モードマグノンの分裂によりこのようなスピン変換効率の極端に小さなマグノンへと角運動量が受け渡されていることを示唆している。

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)

[学会発表](計 1 件)

立野祐真, 安藤和也,

「金属/絶縁体界面におけるスピン流生成現象の時間分解測定」,

第20回スピン工学の基礎と応用,

2015年12月4日, 東北大学(宮城県・仙台市)。

[その他]

ホームページ等

<http://www.ando.appi.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

安藤 和也 (ANDO Kazuya)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30579610