

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23588

研究課題名(和文) スピン渦度結合を用いた反強磁性スピン注入技術の開発

研究課題名(英文) Spin injection in antiferromagnet using spin vorticity coupling

研究代表者

山野井 一人 (YAMANOI, KAZUTO)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・助教

研究者番号：20847777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、巨視的な回転運動と電子スピンの結合であるスピン渦度結合を反強磁性を示すDyに適用することで、Dyを用いた非熱的スピン流生成技術の実現を目指した。まずはDyの薄膜化を目指して、スパッタ成膜の最適条件を探索し、高品質なDy薄膜を実現した。更にDy薄膜を用いたスピン注入実験から、反強磁性状態にてスピンポンピング効率の強い抑制効果の観測に成功した。上述の実験に成功した一方で、スピン渦度結合の実験では、Dy薄膜を伝搬した表面弾性波の信号強度が著しく低減してしまった。これを解決するために、Dyの更なる薄膜化を目指した。今後は薄膜化したDyを用いたスピン渦度結合の観測を試みる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

反強磁性体はデバイス応用上、多くの優れた特性を有しており、次世代デバイスの要素材料として注目されている。本研究では目標としていたスピン渦度結合を用いた反強磁性スピン注入の観測はできなかったが、常磁性、強磁性、反強磁性状態が温度によって発現するジスプロシウム(Dy)薄膜の成膜、更にスピンポンピング効果によるスピン注入に成功した。その結果、他の磁気状態に比べて反強磁性-Dyでは強いスピンポンピング効果の抑制が観測され、反強磁性-Dyにて長距離なスピン伝搬が実現されている可能性を示した。今回得られた成果は、Dy薄膜が反強磁性スピントロニクスデバイスの材料として有用であることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have study a non-thermal spin injection in antiferromagnetic Dy using spin-vorticity coupling(SVC).

(a)We succeeded the fabricate for a high-quality Dy film by optimizing the deposition conditions.  
(b)We demonstrated the non-linear change of the spin-pumping effect in a Dy/NiFe bi-layer using a temperature-induced magnetic phase transition of Dy.(c)Since the surface acoustic wave was suppressed by Dy film, the SVC could not be observed. As a solution to these problems, we succeeded in a thinner Dy 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 スピンドायナミクス ジスプロシウム スピン注入 反強磁性体

### 1. 研究開始当初の背景

デジタル技術の急速な発展による情報量の爆発的増大に伴い、情報記録デバイスの高記録密度化や低消費電力化が求められている。一方、ムーアの法則に基づく半導体デバイスの高性能化・集積化技術は、微細加工技術に由来する物理的限界が目前に迫っており、従来型デバイスの性能限界を打破する次世代デバイス技術の開発が必要不可欠である。その最有力候補が、電子が持つスピン角運動量をデバイス機能に活用するスピンドバイスである。スピンドバイスは、電子スピンの不揮発性を利用することにより、低消費電力なナノ電子デバイスを実現するだけでなく、GHz~THz の高い周波数領域で応答するため、室温動作可能な自励発振器や高周波フィルタなどの次世代情報通信機器、更には、ロジック回路まで様々な応用が期待されている。スピンドバイスを操作する上で最も重要な物理量は、スピン角運動量の流れである『スピン流』であり、その生成・伝搬・検出に關した多種多様な研究が実施されている。最近、特にスピン流を用いた新原理エネルギー変換技術が注目されており、Matsuoらが理論予言した物質の回転運動とスピン流の相互変換を実現する『スピン渦度結合』(Matsuo et al. PRL 2011)もその一つである。2017年には、表面弾性波の渦度(局所的な格子回転運動)を用いてスピン流が生成できることが実験的に検証され(図1, Kobayashi et al. PRL 2017)、Matsuoらの理論予言が実証された。スピン渦度結合によるスピン流生成の最大の特徴は、様々な物質において、結晶格子の非一様な渦度からスピン流を生成可能な点である。そのため、スピン渦度結合は材料を選ばない革新的スピン流生成メカニズムとして注目されている。

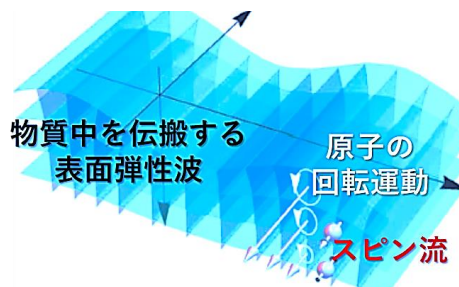


図1. 表面弾性波によるスピン渦度結合。(引用:非慣性系のスピントロニクス)

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、既存のスピンドバイスの性能を凌駕する次世代スピンドバイスの有力材料として注目されている反強磁性体にスピン渦度結合を適用することで、反強磁性体による非熱的スピン注入の実現を目指す。具体的には、圧電基板上的の2対の楕形電極間に反強磁性薄膜を作製し、表面弾性波を注入する。このとき、膜厚方向に非一様な渦度勾配が形成され、反強磁性体からスピン流が生成される。(図2 参照)

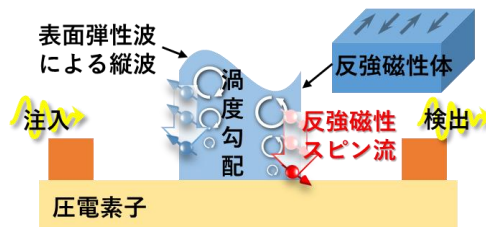


図2. 本研究で目指す素子構造

### 3. 研究の方法

本実験を達成するために、下記の3つの課題に取り組んだ。

#### (1) 高品質な反強磁性(Dy)薄膜を実現するための成膜条件の最適化と基本物性評価

スピンドバイスを操作する上で重要となるスピン流は、数~数百ナノメートル程度の伝搬長で消失する非保存流であるため、スピンドバイスを實現する上で反強磁性体の薄膜化は必須である。本研究でターゲットとした材料は、Dy(ジスプロシウム)である。Dyは温度によって常磁性、反強磁性、強磁性状態が生じるため、各磁気秩序状態でのスピン注入を評価する物質として極めて適している。一般的に物質の薄膜化によって、バルクとは磁気特性や結晶構造などが変化してしまう。そのため薄膜でも、バルクと同程度の物性値が得られる最適な成膜条件を結晶構造解析や磁気測定から調べた。

#### (2) 各磁気状態での高品質 Dy 薄膜のスピン輸送特性の評価

(1)で實現した高品質 Dy 薄膜と磁性金属 NiFe (ニッケルと鉄の合金)2 層膜にマイクロ波を照射した際の NiFe の磁化歳差運動によるスピンプンピング効果を利用して、Dy 薄膜へのスピン注入を實現する。各磁気状態での Dy 薄膜のスピン注入効率は、各温度下での磁化歳差運動時の NiFe のエネルギー吸収波形から見積もった有効ダンピング定数から各磁気秩序状態での Dy 薄膜のスピン吸収効率を評価した。

#### (3) スピン渦度結合を用いた高品質 Dy 薄膜からのスピン注入特性の評価

表面弾性デバイス上に Dy 薄膜と NiFe からなる 2 層膜を成膜し、片方の楕形電極から励起した表面弾性波が Dy 表面を伝搬することで、Dy 薄膜の膜厚方向に渦勾配が形成される。その結

果、スピン渦度結合によって、Dy 薄膜から NiFe にスピン流が注入される。NiFe 中ではスピントランスファートルクによってスピン波が励起される。スピン波励起によるエネルギー吸収をもう一方の楕型電極で評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高品質な反強磁性(Dy)薄膜を実現するための成膜条件の最適化と基本物性評価

マグネトロンスパッタ装置を用いて基板温度 350 °C で成膜した Dy 薄膜において、バルク試料と同様の磁気相転移(常磁性, 反強磁性, 強磁性)を実現することができた(図 3 参照)。この要因を明らかにするため、薄膜 X 線回折装置を用いて、各成膜条件での薄膜素子の結晶構造を調べた。その結果、図 3 のように 2 度の磁気相転移が観測された Dy 薄膜では、Debye ring に沿って分散した fcc(111) 面のリング状回折スペクトルに加え、hcp(002)面のスポット状回折スペクトルが得られた。スポット状回折スペクトルは、hcp(002)面が膜厚方向に優先配向していることの証左であり、Dy の反強磁性状態の発現には結晶軸が配向した hcp 構造を形成することが重要であることがわかった。

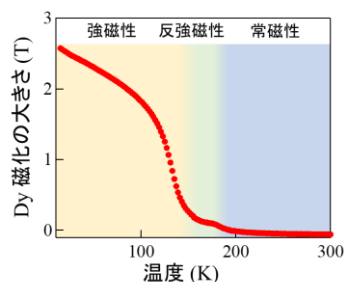


図 3. 200 mT の外部磁場下での Dy 薄膜の磁化の温度依存性

##### (2) 各磁気状態での高品質 Dy 薄膜のスピン輸送特性の評価

Dy/NiFe 多層膜と NiFe 単層(比較用素子) を作製し、各温度での有効ダンピングの温度依存性を調べた結果を図 4 に示す。Dy/NiFe 素子では、常磁性状態から反強磁性状態への相転移温度近傍では、有効ダンピングの極大が観測された一方で、反強磁性状態から強磁性状態への転移温度近傍ではスピン吸収効率が単調増加した。Matsuo らの理論研究(Phys. Rev. B 2014 & Phys. Rev. Lett. 2018) によると、スピン吸収効率は物質の横スピン感受率に比例する。常磁性-反強磁性相転移点近傍における Dy/NiFe 素子の有効ダンピングの極大は、Dy の電子スピンの熱ゆらぎによる横スピン感受率の増加に由来する。一方、強磁性-反強磁性相転移は秩序状態間の遷移であるため、熱ゆらぎの影響はほとんど見られず、有効ダンピングにも極大は生じなかった。興味深い点は、Dy の強磁性状態に対して反強磁性状態ではスピン吸収効率がけた違いに小さく、常磁性状態と同程度となることである。一般的に希土類金属は、冷却すると軌道角運動量が増加し、スピン軌道相互作用に由来するスピン散乱が増加して、スピン輸送距離が短くなり、スピン吸収効率が増大する。しかし今回の結果は、反強磁性状態において、スピン軌道相互作用が大きいにも関わらず長距離スピン輸送が実現できることを示唆する興味深い実験結果が得られた。

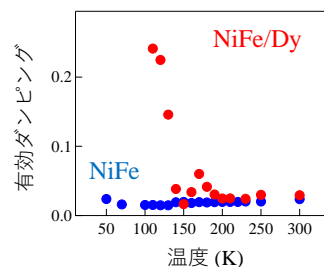


図 4. 各試料における有効ダンピングの温度依存性

##### (3) スピン渦度結合を用いた高品質 Dy 薄膜からのスピン注入特性の評価

圧電基板上に Dy 薄膜を成膜した素子を作製し、表面弾性波を励起したが、Dy 薄膜の伝搬後に表面弾性が観測できなかった。この原因として、今回用いた Dy 薄膜が重希土類金属であることに加えて、実現した高品質 Dy が 50 nm という比較的高膜厚などの理由から、Dy 薄膜を伝搬した表面弾性波の信号強度が著しく低減してしまったことが考えられる。この解決策として、高い結晶性を維持した Dy の更なる薄膜化を目指した。その結果、25 nm 膜厚でも高い結晶性や磁気相転移が発現する Dy 薄膜を実現することに成功した。今後は、今回作製した 25 nm 膜厚の高品質 Dy 薄膜を用いたスピン渦度結合の実験を試みる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Yamanoi, Y. Sakakibara, J. Fujimoto, M. Matsuo and Y. Nozaki
2. 発表標題 Modulation of spin sink efficiency using magnetic phase transition of NiFe/Dy system
3. 学会等名 MMM 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山野井 一人, 榊原 有理, 能崎 幸雄
2. 発表標題 磁気相転移を用いたDy 薄膜のスピン輸送特性の変調
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立野翔真, 栗宗勇貴, 松尾衛, 山野井一人, 能崎幸雄
2. 発表標題 NiFe薄膜を用いた表面弾性波中のアインシュタインドハース効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榊原有理, 山野井一人, 能崎幸雄
2. 発表標題 Dy薄膜の逆スピンホール効果の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山野井 一人, 榊原有理, 藤本純治, 松尾衛, 能崎幸雄
2. 発表標題 磁気相転移に伴うDy/NiFe 2層膜のスピンの吸収効率の変化
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榊原有理, 山野井一人, 能崎幸雄
2. 発表標題 熱励起スピン流を用いたDy 薄膜のスピンのホール電圧測定
3. 学会等名 第44回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山野井 一人, 榊原 有理, 能崎 幸雄
2. 発表標題 スピンポンピング効果を用いて測定した横スピン感受率の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山野井一人、榊原有理、能崎幸雄
2. 発表標題 NiFe/Dy 二層膜における実効的ギルバート定数の温度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------