

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：11201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22476

研究課題名(和文)常磁性体/金属接合における界面スピン注入の研究

研究課題名(英文)Spin transport at normal metal/paramagnetic material

研究代表者

大柳 洸一(Oyanagi, Koichi)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：50881223

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)：常磁性絶縁体が優れたスピン輸送特性を有することが近年、実験的に明らかになり、注目を集めている。しかし、常磁性絶縁体のスピン物性についての理解は進んでおらず、特に金属との界面におけるスピン交換はデバイスの性能を決める重要なパラメータであるが、これまで原理の解明や評価手法の確立が行われていない。そこで本研究では、強磁性体で用いられていた手法を常磁性絶縁体に利用することで常磁性絶縁体/金属界面におけるスピン交換のメカニズムの解明と評価手法の確立を行い、常磁性絶縁体をスピントロニクスで利用するための基盤構築を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、常磁性絶縁体へのスピン注入メカニズムを解明することにある。常磁性絶縁体は優れたスピン輸送特性を有しているが、この性質を利用するためには高効率にスピン流を常磁性絶縁体へ注入する必要がある。特に、電気的な制御が可能であるため、金属電極を用いたスピン注入は重要である。本研究によって常磁性絶縁体の磁化と金属中の伝導電子スピンの間のスピン交換メカニズムが明らかになったことで、常磁性体へのスピン注入効率向上に向けた指針を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Recently, paramagnetic insulators are getting much attention because they exhibit great spin conductivity. However, spin current physics in paramagnetic insulators has not been investigated. Especially, the spin transfer at the paramagnetic insulator (PI) and normal metal (NM) is important for application. Here, we study the spin transfer at the PI/NM interface using the standard method for studying the spin transfer at the ferromagnet/NM interface. We clarify the mechanism of the spin transfer at the PI/NM interface and establish the probe to examine the efficiency of the spin transfer.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン流 スピントロニクス 常磁性絶縁体 磁気抵抗効果

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスでは、電子の持つ電荷の自由度に加え、スピンの自由度をも利用することで従来のエレクトロニクスでは成し得なかった機能性を実現する。その鍵となるのはスピン角運動量の流れ、スピン流である。スピン流はジュール熱の影響を受けない省エネルギーな情報演算への期待がかかるが、そのためには遠くまでスピン流を運べるキャリアを見つける必要がある。これまでスピン流を運ぶキャリアが様々な物質のなかで見つかった。最も代表的なキャリアである伝導電子が運ぶスピン流の場合、高々数百ナノメートル程度でスピン流が緩和してしまう。一方で、強磁性絶縁体では、強磁性秩序のゆらぎを利用することで数十マイクロメートルに渡ってスピン流を運ぶことができるため、強磁性絶縁体を用いたスピントロニクスが精力的に研究されている。

近年、強磁性秩序を欠いた常磁性の絶縁体がマイクロメートルスケールにスピン流を運ぶことが報告された [1]。常磁性絶縁体では、磁場によって誘起された常磁性磁化によってスピン流が運ばれると考えられている。驚くべきことに、低温・高磁場下では常磁性絶縁体が典型的な強磁性絶縁体に比べ高効率にスピン流を運ぶ。この発見によって、これまでスピントロニクスで用いられてこなかった常磁性絶縁体をスピントロニクスで利用できる可能性が示された。

常磁性絶縁体中のスピン流は、常磁性絶縁体に取り付けた金属電極を用いて電気的に生成/検出することができる。しかし、常磁性絶縁体と金属間のスピン交換の効率やそのメカニズムに関しては全く明らかになっていない。そこで本研究では、常磁性絶縁体の局在スピンと金属中の伝導電子スピンの間のスピン交換のメカニズムを明らかにすることで、効率的な常磁性スピン流の生成/検出を実現し、常磁性絶縁体をこれまでのスピントロニクスの体系へ組み込むための基盤構築を目指す (図 1)。

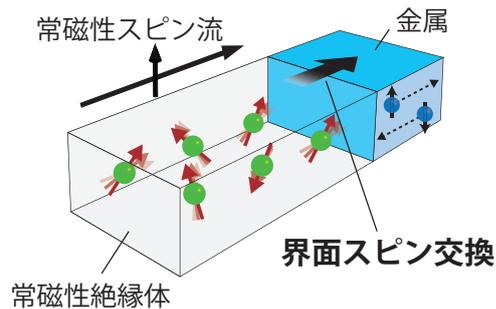


図 1: 常磁性絶縁体/金属界面におけるスピン流

2. 研究の目的

本研究の目的は、常磁性スピントロニクスを発展させるために、常磁性絶縁体/金属界面でのスピン注入原理の解明を行うことである。先行研究によって常磁性絶縁体/金属界面でのスピン注入が実現されたが、その原理の解明や効率の評価はできていない。本研究では、強磁性体へのスピン注入効率の評価に活用されてきたスピンホール磁気抵抗効果 [2] を常磁性絶縁体に適用することで界面でのスピン交換の定量評価手法を確立する。これにより常磁性体へのスピン注入の原理を明らかにし、界面スピン交換効率化への指針を得ることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、スピンホール磁気抵抗効果を用いて常磁性絶縁体/金属界面でのスピン注入を評価する。スピンホール磁気抵抗効果とは、強磁性体/金属接合系において電流方向と強磁性体の磁化方向の相対角に応じて試料の電気抵抗が変化する現象である。金属薄膜に電流を印加すると電流-スピン流変換現象であるスピンホール効果によってスピン流が生成され、接合された強磁性体に注入される。ここで界面でのスピン注入効率は、スピン流のスピン偏極方向と強磁性体の磁化 (局在スピン) の相対角度に応じて異なるため、その差が抵抗変化として現れる。これまでスピンホール磁気抵抗効果は、強磁性体/金属界面のスピン注入の定量評価、およびそのメカニズムの解明に利用されてきた。その微視的起源は、強磁性体中の局在スピンと金属中の伝導電子スピンの間に働く界面交換相互作用によるスピン依存散乱であり、その発現には強磁性秩序を必要としない。したがって、本効果を用いれば常磁性絶縁体/金属界面でのスピン注入の定量評価が可能である。

常磁性絶縁体として、先行研究において長距離スピン輸送現象が報告されたガドリニウムガリウムガーネット ($Gd_3Ga_5O_{12}$: GGG) を、金属としてスピンホール効果が大きい重金属の Pt をそれぞれ用いた。マグネトロンスパッタリング装置を用いて 5 nm の Pt 薄膜を GGG 基板上に成膜し、フォトリソグラフィとアルゴンイオンミリング装置を使いホールバー形状へ加工した。このプロセスでは微細加工に先立って Pt を成膜するため、比較的清浄な界面を得ることができる。これは界面でのスピン輸送に着目した本研究に最適な試料作製方法である。

常磁性スピンホール磁気抵抗効果は、GGG の常磁性磁化が顕著に現れる低温・高磁場におい

て顕著に生じると予想できる。しかし、これまで低温・高磁場におけるスピホール磁気抵抗効果の測定は困難であった。同条件では、金属中の弱反局在によって巨大な磁気抵抗が現れ、スピホール磁気抵抗効果の純粋評価が困難であった。そこで本研究では、印加した電流と同じ方向（縦方向）の電気抵抗だけでなく、直交方向（横方向）の電気抵抗を測定する。弱反局在の効果は縦抵抗にのみ現れるが、スピホール磁気抵抗効果は横抵抗にも現れるため、横磁気抵抗を測ることで低温・高磁場において常磁性スピホール磁気抵抗効果の純粋測定が可能となる（図 2 インセット）。実験は超伝導マグネット付きクライオスタットを用いて温度 2 K から 300 K、磁場±9 T の範囲で行なった。

4. 研究成果

本研究では、金属/常磁性体界面でのスピ輸送の原理を明らかにするため、Pt/GGG 接合系におけるスピホール磁気抵抗効果の観測を目指した。その結果、GGG 中に磁場が誘起する常磁性磁化と Pt 中の伝導電子スピンの間の相互作用によって生じる明瞭な常磁性スピホール磁気抵抗効果を観測することに成功した。以下に実験結果の詳細を述べる。

図 2 に Pt/GGG 接合系における温度 2 K での横磁気抵抗の磁場依存性を示す。電気抵抗が磁場によって変化しており、明瞭な磁気抵抗効果を観測した。低磁場領域では、磁場の増大に伴って観測された磁気抵抗も増大した。一方、5 T 以降では磁気抵抗は飽和する振る舞いが観測された。この振る舞いは、同じ温度における GGG の誘起された常磁性磁化の磁場依存性と一致している。また、外部磁場の面内角度依存性を調べたところ、スピホール磁気抵抗効果の対称性と一致することがわかった。さらに、磁気抵抗効果の温度依存性は、常磁性磁化の示す温度依存性と同一振る舞いを示した。これらの結果は観測された磁気抵抗効果が常磁性磁化と相関があることを示しており、このことから Pt/GGG 接合系において外部磁場が誘起する常磁性磁化によって生じる常磁性スピホール磁気抵抗効果の観測に成功したと結論付けた。

本研究では、常磁性スピホール磁気抵抗効果を定式化し、実験結果を説明することに成功した。ここでは、常磁性絶縁体/金属界面において局在スピと伝導電子スピが界面交換相互作用を介してスピ移行トルクが働き、その結果として常磁性スピホール磁気抵抗効果が生じると考えた。常磁性スピホール磁気抵抗効果の理論式を用いて実験結果をフィティングすると、両者がよく一致していることがわかった（図 2 青線）。このことは、常磁性スピホール磁気抵抗効果の原理が界面交換相互作用を介して生じるスピ移行トルクであることを示している。得られたスピ移行トルクの効率は外部磁場によって大きく変化することがわかった。これは界面のスピ注入を外部磁場によって制御できることを示している。さらに、フィティング結果から常磁性絶縁体/金属界面における界面のスピ交換の効率を示すスピ混成コンダクタンスの最大値が $1 \times 10^{13} \text{ Sm}^{-2}$ であることを実験的に明らかにした。本研究では常磁性絶縁体/金属界面におけるスピ交換効率を定量評価する手法を確立し、そのメカニズムを解明することに成功した。

上記の研究成果によって常磁性絶縁体/金属界面でのスピ交換効率の原理が明らかとなり、その効率の定量評価が可能となった。また、常磁性絶縁体では外部磁場を用いることでスピ移行トルク、つまり界面でのスピ注入を制御できることを示した。これらは、常磁性スピトロニクス基盤の構築に繋がる成果である。

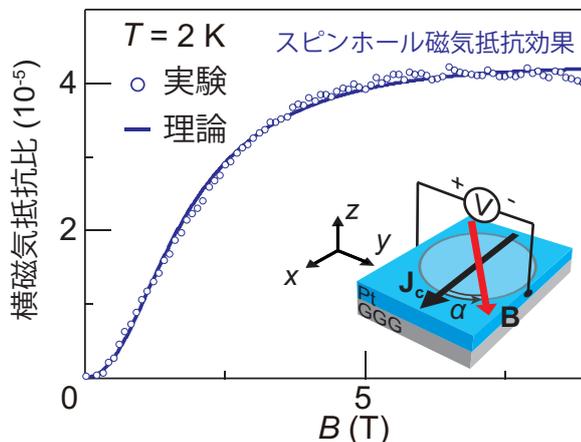


図 2: Pt/GGG における常磁性スピホール磁気抵抗効果の観測と理論モデルの結果

<引用文献>

1. K. Oyanagi, S. Takahashi, L. J. Cornelissen, J. Shan, S. Daimon, T. Kikkawa, G. E. W. Bauer, B. J. van Wees, and E. Saitoh, Nat. Commun. **10**, 4740 (2019).
2. H. Nakayama et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 206601 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Oyanagi Koichi, Gomez-Perez Juan M., Zhang Xian-Peng, Kikkawa Takashi, Chen Yao, Sagasta Edurne, Chuvilin Andrey, Hueso Luis E., Golovach Vitaly N., Bergeret F. Sebastian, Casanova Felix, Saitoh Eiji	4. 巻 104
2. 論文標題 Paramagnetic spin Hall magnetoresistance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134428-1, 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.134428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chen Yao, Sato Masahiro, Tang Yifei, Shiomi Yuki, Oyanagi Koichi, Masuda Takatsugu, Nambu Yusuke, Fujita Masaki, Saitoh Eiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Triplon current generation in solids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5199-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-25494-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kikkawa T., Reitz D., Ito H., Makiuchi T., Sugimoto T., Tsunekawa K., Daimon S., Oyanagi K., Ramos R., Takahashi S., Shiomi Y., Tserkovnyak Y., Saitoh E.	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation of nuclear-spin Seebeck effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4356-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24623-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Daimon Shunsuke, Tsunekawa Kakeru, Kawakami Shinji, Kikkawa Takashi, Ramos Rafael, Oyanagi Koichi, Ohtsuki Tomi, Saitoh Eiji	4. 巻 13
2. 論文標題 Deciphering quantum fingerprints in electric conductance	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3160-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-30767-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------