

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15434

研究課題名(和文) 導電性を示す5d遷移金属酸化物におけるスピン流による磁化制御

研究課題名(英文) Spin current control of magnetization in conductive 5d transition metal oxide

研究代表者

上田 浩平 (Ueda, Kohei)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：60835289

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、5d遷移金属酸化物の代表であるイリジウム酸化物IrO₂のスピン流物性を理解することを目的に研究を遂行した。アモルファスIrO₂と強磁性NiFe合金を有する二層膜デバイスを作製し、スピン流物性評価を行った。その結果、IrO₂はPtと同程度の高い電流-スピン流変換率を示した。この結果は、スピン流生成が特異な電子構造に起因することを示唆している。さらに、スピン流生成が二層膜デバイスの積層順序に大きく依存していることが明らかになり、デバイス設計の指針を得た。これらの結果は、5d遷移金属酸化物が新奇なスピントロニクス材料として有望であることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン流による磁化制御は次世代の磁気メモリ応用のために重要である。本研究で着目した5d遷移金属酸化物の代表であるイリジウム酸化物IrO₂は、これまでスピン流研究において実績のある5d遷移金属Ptと同程度のスピン流生成源であることが明らかになった。本成果は、イリジウム酸化物のスピントロニクス材料としての指針を得ることに貢献できたため学術的にも意義がある。今後は、結晶化や配向性に着目したスピン流研究に期待が出来る。さらに、スピン流の微視的理解を深めるために、金属二層膜では実現困難な酸化物エピタキシャル界面に着目した研究に展開できる。

研究成果の概要(英文)：In this report, we investigate 5d transition metal oxide in order to understand the spin-current physics. We measured spin transport properties in bilayer composed of ferromagnet NiFe alloy and amorphous IrO₂, which is one of simplest 5d Ir oxides. The IrO₂ exhibits large efficiency of charge to spin current conversion, which is comparable to that of Pt control sample, suggesting that unique electronic structure plays a crucially important role in spin current generation. Moreover, the spin current generation strongly depends on stack order of the bilayer, providing useful information on the device design including the Ir oxide. These findings highlight that 5d transition metal oxides are platform as future spintronic materials.

研究分野：酸化物スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス スピン流 薄膜 5d遷移金属酸化物

1. 研究開始当初の背景

磁性の微視的理解は強い磁石の創出やその制御に必須であり、古くから物性物理学の中心課題となってきた。近年では微細加工技術の進歩に伴い、ナノ構造の磁性体をエレクトロニクスに活用するスピントロニクスと呼ばれる分野が飛躍的に発展している。なかでも電子のスピン角運動量の流れであるスピン流を用いた磁性体の制御は、省電力エレクトロニクスの要素技術として注目されている。これまでは微細加工の容易な Pt [1] や Ta [2] などの 5d 遷移金属がスピン流研究の中心となっており、既存材料の限界を打破するような材料の探索はほとんど行われてこなかった。

これまでスピン流研究の主な舞台となってきた 5d 遷移金属では、フェルミ面近傍の状態密度が 5d 軌道と 6s 軌道の双方に支配されている。このうち、スピン流物性に寄与するのは強いスピン軌道相互作用を持つ 5d 軌道と考えられてきた。これとは対照的に、5d 遷移金属の酸化物は 6s 軌道の寄与を排除した特異な電子構造を有し、フェルミ面近傍の状態密度は 5d 軌道のみで支配される。その結果、5d 遷移金属酸化物においては強いスピン軌道相互作用の寄与により新規なスピン流物性の開拓が見込まれる。このようなスピン流物性の理解を深めることは、物性物理学としての重要性にとどまらず、磁化制御の効率化を通して既存の材料では実現出来ないような電子機器の省電力化につながる。本研究を遂行することで、基礎・応用の双方において重要な先端スピントロニクス材料群として、遷移金属酸化物が加わることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では物性物理学の視点から新たなスピントロニクス材料を開発することを目的とし、5d 遷移金属の酸化物であるイリジウム酸化物 IrO_2 におけるスピン流物性の理解を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、5d イリジウム酸化物 IrO_2 のスピン流物性を開拓するために、以下の順で研究を進める。

(1) アモルファス IrO_2 の最適化及び二層膜構造の成膜とデバイスの作製

マグネトロンスパッタ法によりアモルファス IrO_2 の最適化を行った。成膜中に酸素を注入する反応性スパッタ法を利用し、金属イリジウム(Ir)ターゲットから IrO_2 膜の特性を評価した。引き続きスパッタ法により強磁性層 NiFe 合金 (Py) と IrO_2 を組み合わせた二層構造膜の成膜を行い、リフトオフ法によりホールバー構造を持つデバイスに加工した。

(2) スピン流生成の観測

ホール抵抗の二次高調波測定法を用いることで Py/ IrO_2 におけるスピン流の影響を調べた。作製した二層膜デバイスの面内方向に外部磁場を印加し、ホール抵抗の角度依

存性を検出する。

(3) スピン流物性の評価

電流からスピン流への変換率を示すスピホール角と生じたスピン流が消失する距離を示すスピン拡散長を評価するために、 IrO_2 の膜厚依存性を調査した。

4. 研究成果

(1) アモルファス IrO_2 の最適化及び二層膜構造の成膜とデバイスの作製

図 1(a),(b)は IrO_2 の x 線反射率と x 線構造解析の結果を示している。反射率から IrO_2 の膜厚を 27 nm と決定し、そのスパッタ膜厚レートを導出した。構造解析からは、Si 基板と同様に顕著なピークが確認できなかったため、結晶化されておらずアモルファス構造であることが観測された。

図 1(c)は反応性スパッタにおける電気抵抗率のアルゴン Ar と酸素 O_2 比の結果である。膜厚はそれぞれ 25–27 nm である。成膜時に O_2 を増やすと抵抗率が急激に増大することが分かった。この結果は、Ar だけの条件において金属 Ir の特性を示し、 O_2 注入によりアモルファス IrO_2 の形成を示している。後述する実験結果は、Ar と O_2 比を 8:2 の条件で行った。

図 1(d)は二層膜構造 Py/IrO_2 の加工したデバイスの顕微鏡図である。

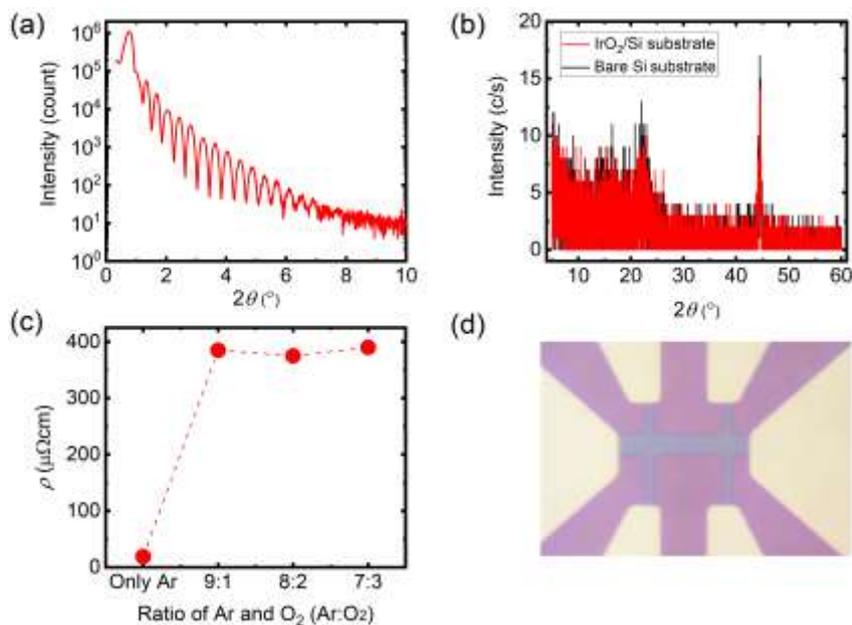


図 1. (a) IrO_2 の x 線反射率 (b) IrO_2 の x 線構造解析 (c) スパッタ成膜時のアルゴンと酸素比における電気抵抗率 (d) 二層膜構造デバイスの顕微鏡図

(2) スピン流生成の観測

(1)の条件で得られた二層膜 $\text{Py}(4)/\text{IrO}_2(12)$ デバイスを作製し、ホール抵抗の高調波

測定を行った [図 2]。数字は膜厚を示している。一次の成分は従来のホール抵抗測定と等価であり、そのホール抵抗は外部磁場に依存しないことが分かった。これは、磁化が完全に面内で飽和していることに起因される。二次の成分は、ホール抵抗の外部磁場依存性を示している。外部磁場の増大でホール抵抗が減少するのは、 IrO_2 から生じるスピン流の影響が外部磁場で抑制されるためである。

次に広範囲に渡り外部磁場を印加することで、スピン流の影響を定量的に決定した。

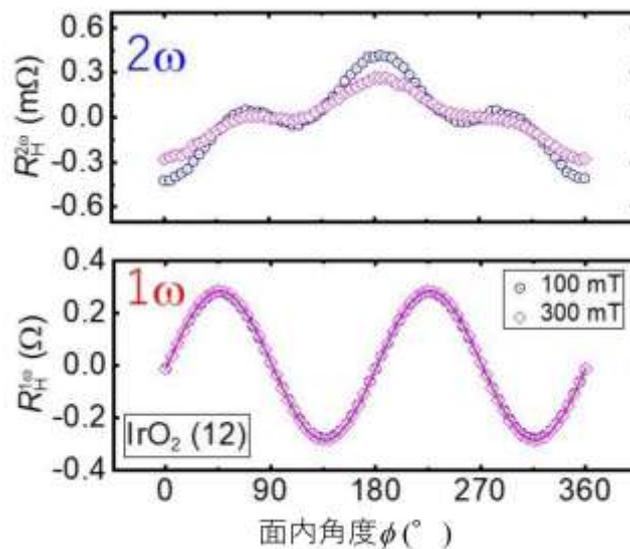


図 2. Py(4)/ IrO_2 (12)デバイスのホール抵抗の一次と二次成分の角度依存性結果

(3) スピン流物性の評価

IrO_2 の膜厚依存性を調査することで、図 3 に示すスピントルク効率の膜厚依存性が得られた。膜厚 t は 3–18 nm である。 IrO_2 膜厚の増大により、徐々にスピントルク効率が増大し、やがて飽和していくことが分かった。膜厚の境界条件を仮定したスピン拡散モデルを用いて、 IrO_2 の有効スピンホール角とスピン拡散長が決定された。フィッティング結果よりそれぞれ、0.09 と 1.7 nm を示している。次に、参照試料の Pt と Ir を測定し比較した。有効スピンホール角は Pt と同程度であり、Ir より七倍大きい結果となった。この結果は、 $5d$ 電子のみで占有される特異な電子構造が IrO_2 のスピン流生成に重要であることを明らかにしている。

(1)-(3)に従い遂行した成果は、論文として掲載済みである [3, K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134432 (2020).]。

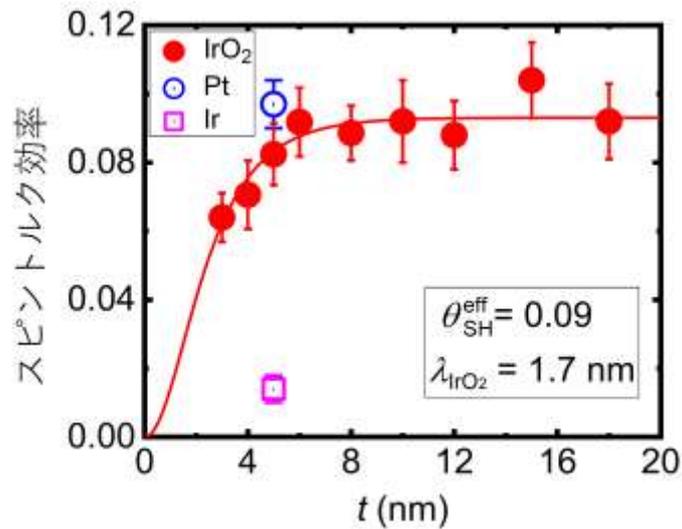


図 3. Py(4)/IrO₂(t)デバイスのホール抵抗の一次と二次成分の角度依存性結果

上記の研究成果に加え、申請者は引き続き二層膜デバイスの積層順序依存性、他の二層膜デバイスである IrO₂/CoFeB と半金属 SrIrO₃/CoFeB に着目し実験を行った。その結果、スピン流生成が二層膜デバイスの積層順序に大きく依存していることが明らかになり、デバイス設計の指針を得た。また、他の二層膜構造では、大きな有効スピホール角が観測されている。これらの研究結果は、5d 遷移金属酸化物が新奇なスピントロニクス材料として有望であることを示している。今後は、結晶化や配向性に着目したスピン流研究に期待が出来る。さらに、スピン流をより微視的に理解するために金属二層膜では実現困難な酸化物エピタキシャル界面を舞台とする研究に発展でき、酸化物スピントロニクス分野に大きく貢献できることが見込まれる。

<引用文献>

- [1] I. M. Miron *et al.*, Nature **476**, 189 (2011).
- [2] L. Liu *et al.*, Science **336**, 555 (2012).
- [3] K. Ueda *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 134432 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kohei Ueda, Naoki Moriuchi, Kenta Fukushima, Takanori Kida, Masayuki Hagiwara, and Jobu Matsuno	4. 巻 102
2. 論文標題 Spin-orbit torque generation in NiFe/IrO ₂ bilayers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physical Review B	6. 最初と最後の頁 134432_1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.134432	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上田浩平, 森内直輝, 福島健太, 木田孝則, 萩原政幸, 松野丈夫
2. 発表標題 Ni ₈₁ Fe ₁₉ /IrO ₂ 界面から誘起されるスピン軌道トルク
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田浩平, 森内直輝, 福島健太, 木田孝則, 萩原政幸, 松野丈夫
2. 発表標題 2層膜Ni ₈₁ Fe ₁₉ /IrO ₂ におけるスピン軌道トルク生成
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福島健太, 森内直輝, 木田孝則, 萩原政幸, 上田浩平, 松野丈夫
2. 発表標題 Y ₃ Fe ₅₀ 12/IrO ₂ 界面におけるスピン流物性
3. 学会等名 2019年第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森内直輝, 福島健太, 木田孝則, 萩原政幸, 上田浩平, 松野丈夫
2. 発表標題 NiFe/IrO2界面における電流-スピン流変換効率
3. 学会等名 2019年第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------