



Title	5d 電子系イリジウム酸化物におけるスピン流生成
Author(s)	上田, 浩平
Citation	大阪大学低温センターだより. 2022, 172, p. 4-8
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/87687
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

5d電子系イリジウム酸化物におけるスピンの生成

理学研究科 上田 浩平

E-mail : kueda@phys.sci.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

界面近傍のナノスケール領域で出現する電流-スピン流変換現象が、電子のスピン角運動量の流れであるスピン流物理を明らかにする格好の題材として注目されている。中でも、非磁性体と強磁性体の界面を持つ二層膜構造においては、電流により生成されたスピン軌道トルク (spin-orbit torque, SOT) が隣接する磁性層の磁化を反転させることが報告されている。スピン軌道トルクは、強いスピン軌道相互作用に起因するスピンホール効果 (バルク由来) とラッシュバ-エデルシュタイン効果 (界面由来) から誘起され [1]、Pt [2] や Ta [3] などの5d遷移金属が高効率の生成源として知られている。これらの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軌道のみと考えられる。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。最近になって、イリジウム酸化物を用いたスピンホール効果が観測され、5d遷移金属酸化物を基盤としたスピン流生成現象が注目されている。このような新物質においてスピン流物性の理解を深めることは、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。本稿では物性物理学の視点に立ったスピントロニクス材料開拓の一環として、5d電子系イリジウム酸化物 IrO_2 を用いたスピン流生成 [4,5] について紹介する。

2. IrO_2 -Py 界面におけるスピンの生成 [4]

スパッタ法により非磁性体 IrO_2 と強磁性体 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 合金 (Py) を有する二層膜構造 $\text{Py}(4 \text{ nm})/\text{IrO}_2$ ($t = 3\text{--}8 \text{ nm}$) を成膜し、フォトリソグラフィとリフトオフによりホールバー構造のデバイスを作製した [図1(a)]。 IrO_2 はアモルファス構造を有している。図1(b)に超伝導量子干渉計により得られた磁化 (M_s) の IrO_2 膜厚依存性と参照試料 Pt, Ir を示す。 IrO_2 を含んだ膜の M_s は厚さによらず一定の値を示し、一般的な Py 薄膜と Pt, Ir と概ね一致した値を示している。 IrO_2 から生成するスピン流は、界面を通して隣接する磁性層の磁化と相互作用することでスピン軌道トルクを誘起する。スピン軌道トルクは磁化方向に依存する dampinglike (DL) と磁化方向に依存しない fieldlike (FL) の2つの成分を持ち、有効磁場 (B_{DL} , B_{FL}) として磁化に作用する [図1(a)]。磁化制御に重要な役割を果たすのは前者の DL 成分であるため、本研究ではホール抵抗の二次高調波 ($R_H^{2\omega}$) の面内角度依存性を測定することで2つの有効磁場を分離した。

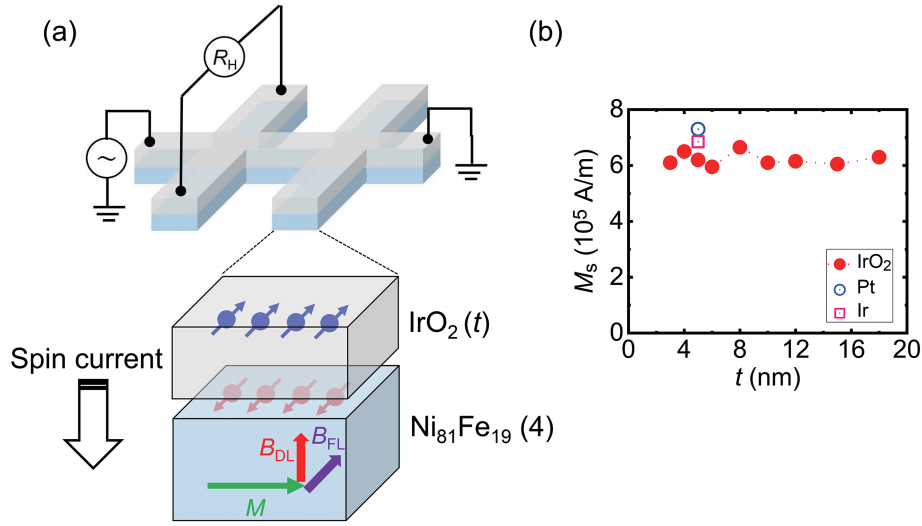


図1.(a) 二層膜構造Ni₈₁Fe₁₉ (Py)/IrO₂とデバイスの概念図. スピン軌道トルクは有効磁場として磁化に作用し dampinglike (B_{DL}) と fieldlike (B_{FL}) の成分を持つ. (b) Py/IrO₂における飽和磁化のIrO₂膜厚 (t) 依存性及び参照試料Py/PtとPy/Irの飽和磁化の結果.

図2はPy(4)/IrO₂(12)試料における $R_H^{2\omega}$ の面内角度依存性を示している。外部磁場の増大で $R_H^{2\omega}$ の絶対値が減少するのは、外部磁場がスピン軌道トルクを抑制しているためである。この結果から得られる2つの有効磁場を、 M_s の結果を考慮することでスピン軌道トルク効率に変換する。

図3(a)と3(b)はDLとFLスピン軌道トルク効率のIrO₂膜厚依存性を示している。DL-スピン軌道トルク効率は、+0.064～+0.104の範囲で変化し、その効率は膜厚の増大と共に

徐々に高まり、 $t = 6 \text{ nm}$ 以上で飽和した。さらに、生成効率はスピンホール効果を元にしたドリフト拡散モデルにより説明でき、IrO₂の有効スピンホール角とスピン拡散長が各々+0.093と1.7 nmとすることが示された。参照試料Pt (+0.103)とIr (+0.014)と比較するとIrO₂の有効スピンホール角はPtと同程度、Irより7倍大きい結果となり、IrO₂を用いた高い電流-スピン流変換効率が実証された。一方で、FLスピン軌道トルク効率は、-0.013～-0.028の範囲で変化し、DLスピン軌道トルク効率より小さく、膜厚に依存しない結果を示した。FLスピン軌道トルクの起源がスピンホール効果によると仮定すれば、DLスピン軌道トルク効率と同じ正符号を示すことが期待されるが、実際には観測されたIrO₂の符号は負である。これらの結果から、界面由来のラシュバ-エデルシュタイン効果がFLスピン軌道トルクの生成源であることが推測される。

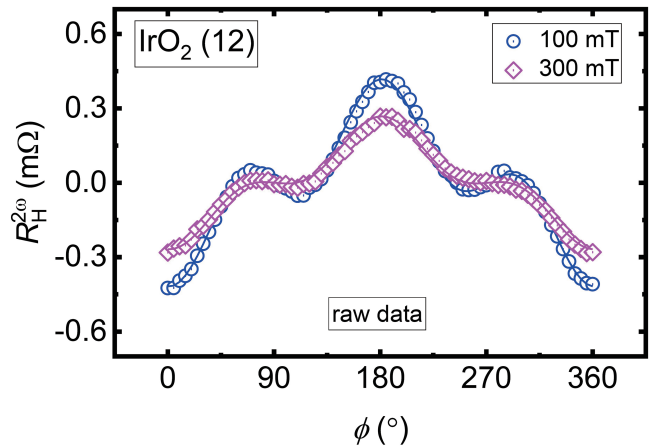


図2. 外部磁場100、300 mTにおけるホール抵抗の二次高調波の面内角度依存性.

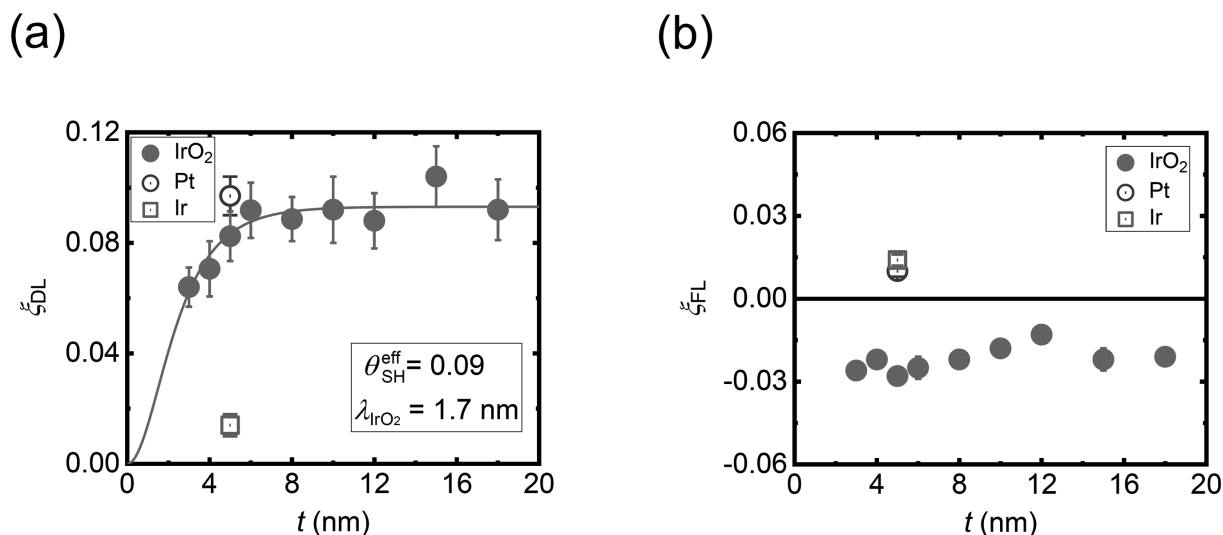


図3. (a) DL スピン軌道トルク効率 (b) FL スピン軌道トルク効率の膜厚依存性及び参照試料PtとIr試料. 赤線はスピンホール効果を考慮したドリフト-スピン拡散モデルの結果.

3. IrO₂-Py 二層膜におけるスピン流生成の積層順序効果 [5]

次に、5d電子系イリジウム酸化物を含んだ界面の理解を深めるために、二層膜構造の積層順序に着目しスピン軌道トルクを調査した。磁性層と非磁性層の厚さを固定した二層膜、Py(3)/IrO₂(10)とIrO₂(10)/Py(3)及び参照試料Py(3)/Pt(6)とPt(6)/Py(3)を作製した。ここで、非磁性層が磁性層の上に成膜される構造をIrO₂(Pt)-T、磁性層の下に成膜される構造をIrO₂(Pt)-Bと定義する。これらの積層順序を制御した試料に対して高調波測定からスピン軌道トルク効率を評価した結果を図4に示す。DLスピン軌道トルク効率については、IrO₂とPtの高い電流-スピン流変換に起因して、全ての試料において明瞭な信号が観測された。積層順序に着目すると、IrO₂(Pt)-Bと比べてIrO₂(Pt)-TのDL-スピン軌道トルク効率が20%減少することが明らかとなった。磁性層と非磁性層の界面で生じる intermixing 効果 [6,7] が界面スピン透過率の低下の要因であると考えられており [8–10]、我々の結果はIrO₂とPtの双方で非磁性層を下 (B) にした方が intermixing を抑制できることを示唆している。一方で、FLスピン軌道トルク効率では、IrO₂試料においてのみ符号の反転という著しい積層順序

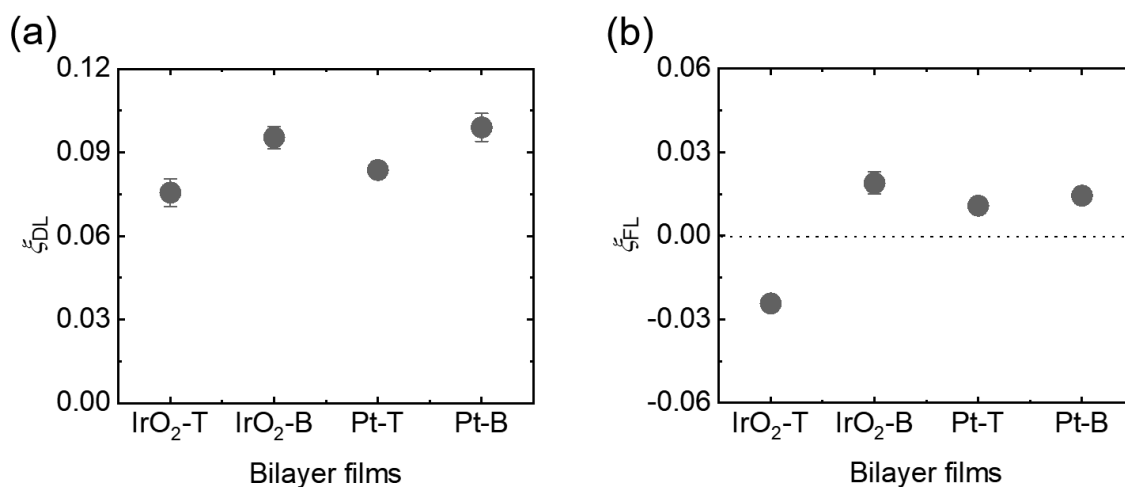


図4. 二層膜Py-IrO₂とPy-Ptにおける (a) DL スピン軌道トルク効率 (b) FL スピン軌道トルク効率の積層順序効果.

序効果が観測された。前節で示した負のFLスピン軌道トルク効率は図4におけるIrO₂-Tに対応するが、IrO₂-Bでは正符号を示す。Pt試料においては符号反転が観測されていないために intermixing の影響は排除でき、酸化物に固有の効果であると考えられる。FLスピン軌道トルク効率の起源であるラッシュバ-エデルシュタイン効果では、その大きさや符号が界面の酸化状態に強く依存することが報告されている [11–13]。我々の試料においても、IrO₂-Bに比べてIrO₂-TにおけるPy層がより酸化されていることが磁化と抵抗率から分かっている。これらを考慮すると、積層順序によりPy層の酸化が変化したことがFLスピン軌道トルク効率の符号に強く関係していることが示唆される。以上の結果より、5d電子系イリジウム酸化物を含んだ二層膜の積層順序を変えることで、DLスピン軌道トルク効率の大きさとFLスピン軌道トルク効率の符号が制御できることを実証した。

4. まとめ

本研究により、5d電子のみで支配されるというイリジウム酸化物の特異な電子構造がスピン流生成に重要な役割を担うことが示され、スピントロニクス材料としての5d電子系酸化物の重要性が明らかとなった。さらに、イリジウム酸化物を含む二層膜構造において積層順序によりスピン軌道トルクの制御が可能になることは、材料としての有用性に加えてデバイス設計にあたって重要な知見となる。本研究は全て室温での結果であるが、界面におけるスピン流生成の起源を微視的に明らかにするために低温での測定に展開していくことも有望な方向性の一つと考えられる。

謝辞

本研究は先端強磁場科学研究センターの木田孝則助教、萩原政幸教授、物理学専攻の森内直樹氏、福島健太氏、松野丈夫教授との共同研究の成果であり、JSPS KAKENHI (No. 19K15434, No. 17H02791)、JST-CREST (Grant No. JPMJCR1901)、日本板硝子材料工学助成会からの援助を受けた。

参考文献

- [1] A. Manchon, I. M. Miron, T. Jungwirth, J. Sinova, J. Železný, A. Thiaville, K. Garello, and P. Gambardella, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 035004 (2019).
- [2] I. M. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P.-J. Zermatten, M. V. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, and P. Gambardella, *Nature* **476**, 189 (2011).
- [3] L. Liu, C.-F. Pai, Y. Li, H. W. Tseng, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Science* **336**, 555 (2012).
- [4] K. Ueda, N. Moriuchi, K. Fukushima, T. Kida, M. Hagiwara, and J. Matsuno, *Phys. Rev. B* **102**, 134432 (2020).
- [5] K. Ueda et al. *Phys. Rev. Appl.* **16**, 034039 (2021).
- [6] I. K. Schuller, S. Kim, and C. Leighton, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 571 (1999).
- [7] C. O. Avci, G. S. D. Beach, and P. Gambardella, *Phys. Rev. B* **100**, 235454 (2019).
- [8] W. Zhang, W. Han, X. Jiang, S.-H. Yang, and S. S. P. Parkin, *Nat. Phys.* **11**, 496 (2015).
- [9] C. F. Pai, Y. X. Ou, L. H. Vilela-Leao, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Phys. Rev. B* **92**, 064426 (2015).

- [10] A. J. Berger, E. R. J. Edwards, H. T. Nembach, A. D. Karenowska, M. Weiler, and T. J. Silva, Phys. Rev. B **97**, 094407 (2018).
- [11] M. Akyol, J. G. Alzate, G. Yu, P. Upadhyaya, Kin L. Wong, A. Ekicibil, P. K. Amiri, and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett. **106**, 032406 (2015).
- [12] K. Hasegawa, Y. Hibino, M. Suzuki, T. Koyama, and D. Chiba, Phys. Rev. B **98**, 020405(R) (2018).
- [13] H. Xie, J. Yuan, Z. Luo, Y. Yang, and Y. Wu, Sci. Rep. **9**, 17254 (2019).

正誤表

第171号 16ページ 19行目（下から5行目）

誤「... よりも大きいことが分かりました。」

→正「... よりも小さいことが分かりました。」