

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分
平成31年3月25日現在

界面スピン軌道結合の微視的解明と巨大垂直磁気異方性
デバイスの創製
Microscopic understanding of interface spin-orbit coupling
And development of perpendicular magnetic anisotropy
Devices

課題番号：16H06332

三谷 誠司 (MITANI, SEIJI)



国立研究開発法人物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点 副拠点長

研究の概要（4行以内）

磁性体ヘテロ構造界面のスピン軌道結合は、次世代磁気メモリ技術に不可欠な界面垂直磁気異方性の物理的起源であり、更には関連する輸送現象などの新規研究分野の根幹となるものである。先端的な界面原子層成長制御、磁気分光による軌道評価、第一原理計算を結集することにより、界面スピン軌道結合を微視的に解明し、その学術基盤の構築とデバイス応用を行う。

研究分野：応用物性

キーワード：スピントロニクス、表面・界面物性、軌道分光、第一原理計算

1. 研究開始当初の背景

磁性体ヘテロ接合界面のスピン軌道結合は、次世代磁気メモリ技術に不可欠な界面垂直磁気異方性の物理的起源であり、更には、磁気異方性の電界制御やスピンオービトロニクスといった複数の新規研究分野の根幹となるものである。しかし、界面でのスピン軌道結合メカニズムの理解は乏しく、新規現象の発見や現象論的取扱いが進む一方で、微視的解明が取り残されている状況にある。その結果、革新的な物質系のデザインや機能予測はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、先端的な薄膜成長技術による界面原子層制御、磁気分光によるスピンおよび軌道磁気モーメント等の微視的評価、第一原理電子構造計算を集結することによって、界面スピン軌道結合を微視的に解明し、その学術基盤の構築とデバイス応用を行う。

具体例としては、界面軌道磁気モーメントや Rashba 型スピン軌道結合効果等の微視的評価を、その計測手法や理論計算手法の開拓と合わせて推進し、得られた成果に基づいて界面垂直磁気異方性の機構解明を図るとともに従来より1桁大きな磁気異方性を実現することを狙う。また、その巨大磁気異方性に関連する新機能（TAMR等）を有するトンネル接合素子等、界面スピン軌道結合を利用した新規デバイスを創製する。物質デザイン・機能開拓の指導原理の確立も狙う。

3. 研究の方法

学術基盤の構築のために、第一原理計算と直接比較可能な磁性体ヘテロ接合界面を創製する。これまでに蓄積してきたエピタキシャル成長技術や単原子層成長技術を用い、ミスフィット転位などの欠陥を持たない磁性金属/非磁性金属や磁性金属/酸化物の積層薄膜試料を得る。合金化による格子定数の制御や、界面挿入層厚を原子層単位で変化させることにより、基礎研究のための系統的試料作製を行う。

得られたモデル構造試料に対して、放射光を用いた電子・磁気分光を含む種々の物性評価を行う。特に軌道角運動量に関連する測定に注力し、新規軌道状態評価法の開拓にも挑む。第一原理計算により、原子サイトごとのスピンおよび軌道状態を解析し、界面スピン軌道結合の微視的解明を進める。

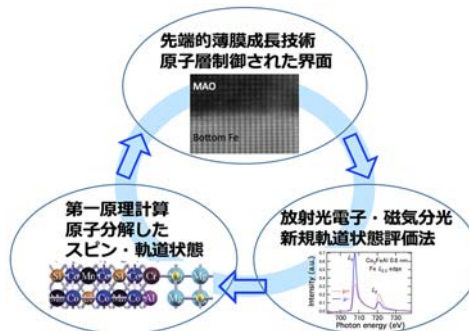


Fig.1. 成長・分光・理論を結集した研究推進体制。

4. これまでの成果

界面スピン軌道結合効果に関する種々の成果を得てきた。以下に重要な結果を例示する。

(1) Fe/酸化物界面の垂直磁気異方性の微視的解明: Bruno 項に関する理論解析と XMLD 測定

Fe/MgAlO と Fe/MgO の界面垂直磁気異方性に関して実験・理論両面での比較を行った。前者は軌道磁気モーメントの異方性(Bruno 機構)が支配する典型例であり、一方、後者ではスピン反転プロセスの寄与が少なくないことが分かった。スピン反転項は四極子モーメントと関連しており、Fe/MgO 界面という垂直磁化試料において世界で初めて XMLD 測定を行い、四極子モーメントの存在を確認した。

(2) 量子井戸状態によって増強された界面スピン軌道結合による室温 TAMR の観測

トンネル磁気抵抗効果は、磁性金属/絶縁体界面のスピン偏極した電子状態に関する良いプローブとなる。Cr/Fe(数原子層)/MgAlO/Fe 接合素子において、Fe 層中に形成された量子井戸によって増大した異方性トンネル磁気抵抗効果(TAMR)が観測された。従来研究では、TAMRは主に低温でのみ観測されていたが、本成果では「室温」でも消失しておらず、1%を超える値を示している。量子井戸状態が界面スピン軌道結合を増強していると考えられるが、第一原理計算により、更にそれが Rashba 型ではなく L・S 型であることも明らかになった。

(3) Co/Pd 界面の垂直磁気異方性の微視的解明: Pd の四極子モーメントの効果

Co/Pd 多層膜における垂直磁気異方性の微視的メカニズムを実験・理論の両面から調べた。スピンおよび軌道磁気モーメントの大きさ等について実験と理論計算の良い一致が得られ、それにより垂直磁気異方性の起源を原子サイト別、スピン反転および非反転プロセス別、軌道別に分解して説明することに成功し、直感的なモデルを与えた。本研究のスピン反転プロセスに係る Pd の四極子モーメントの測定評価は世界初である。

(4) Ni/Cu 系における微視的な軌道と格子歪みの相関: Orbital striction

Ni/Cu 積層膜の垂直磁気異方性は磁歪効果によって説明されてきたが、現象論であった。軌道磁気モーメントの測定評価時に電氣的に格子歪みを変化させることで、この垂直磁気異方性が微視的な軌道の変化によるものであることの直接証拠を得た。Orbital striction という微視的描像に至る成果である。

この他に、Rashba 型界面垂直磁気異方性、界面垂直磁気異方性の電界効果、超薄膜の磁気ダンピングの測定と第一原理計算の比較、バッファ層およびキャップ層の効果等に関して成果を得た。

5. 今後の計画

今後さらに垂直磁気異方性の微視的メカニズムの解明を進めるとともに、それに基づくヘテロ構造設計等も行おう。具体的には、Fe/酸化物界面への原子層挿入等であり、従来に無い巨大な垂直磁気異方性の実現を狙う。また、大きな Rashba 分裂で知られる Au(111)面と磁性金属単原子層を組合せた新規ヘテロ構造も創製し、電子・磁気分光および理論解析を行う。Rashba 型界面垂直磁気異方性の実現や新規軌道状態評価法の確立を試みる。その他に TAMR の更なる増大や、軌道ホール効果、トポロジカル物質に関する研究展開も図る。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

(1) Z.C. Wen, H. Sukegawa, T. Seki, T. Kubota, K. Takanashi and S. Mitani, "Voltage control of magnetic anisotropy in epitaxial Ru/Co₂FeAl/MgO heterostructures", *Sci. Rep.* **7**, 45026 (2017).

(2) H. Sukegawa, J. P. Hadorn, Z.C. Wen, T. Ohkubo, S. Mitani and K. Hono, "Perpendicular magnetic anisotropy at lattice-matched Co₂FeAl/MgAl₂O₄(001) epitaxial interfaces", *Appl. Phys. Lett.* **110**, 112403 (2017).

(3) J. Okabayashi, T. Koyama, M. Suzuki, M. Tsujikawa, M. Shirai and D. Chiba, "Induced perpendicular magnetization in a Cu layer inserted between Co and Pt layers revealed by x-ray magnetic circular dichroism", *Sci. Rep.* **7**, 46132 (2017).

(4) J.-I. Inoue, Y. Miura and S. Mitani, "Electric field control of magnetic anisotropy in bilayer contacts with Rashba-type spin-orbit interaction", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 235001 (2017).

(5) K. Masuda and Y. Miura, "Perpendicular magnetic anisotropy at the Fe/MgAl₂O₄ interface: Comparative first-principles study with Fe/MgO", *Phys. Rev. B* **98**, 224421 (2018).

(6) Q.Y. Xiang, R. Mandal, H. Sukegawa, Y. K. Takahashi and S. Mitani, "Large perpendicular magnetic anisotropy in epitaxial Fe/MgAl₂O₄(001) heterostructures", *Appl. Phys. Express* **11**, 063008 (2018).

(7) J. Okabayashi, Y. Miura and H. Munekata, "Anatomy of interfacial spin-orbit coupling in Co/Pd multilayers using X-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculations", *Sci. Rep.* **8**, 8303 (2018).

(8) Y. Iida, J. Okabayashi and S. Mitani, "Perpendicular magnetic anisotropy in sputter-deposited Fe/MgO bilayer interfaces tuned by W buffer and Tb capping layers", *Appl. Phys. Lett.* **113**, 252401 (2018).

7. ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/spintronics/indexJ.html>

<http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/spectrum/kibanS.html>