

界面磁性の電界変調に関する研究

東京大学 物性研究所 量子物質研究グループ 准教授 三輪 真嗣

ナノサイズの磁性体、すなわち磁石を利用するエレクトロニクスはスピントロニクスと呼ばれています。スピントロニクスに興味が集まる理由は主に2つあります。1つ目は電子が持つ磁石としての性質である「スピン」を電荷とともに利用することで、これまでの技術では実現できなかった新しい機能を持つ電子デバイスの創出が可能となる点です。電子デバイスの例としてはハード磁気ディスクドライブ用磁気ヘッドや不揮発性磁気メモリMRAMがあります。もう1つは様々な科学分野で電子スピンの物理が重要な研究課題となってきた点です。固体物理、統計物理および量子情報等の物理学のみならず、化学や生物学でもスピンの重要性が認識されています。

本研究課題である界面磁性の電界変調は不揮発性磁気メモリMRAMに関連します。MRAMでは厚さ数ナノメートルの磁性及び非磁性層から構成される人工多層膜を利用したデバイスを持ちます。本デバイスでは多層膜に外部から磁場を印加すると電気抵抗が変化する磁気抵抗効果、そして磁性体の磁化方向を電氣的に制御するスピントルク効果が重要です。産業革命以来、強磁性体の磁化方向は電磁誘導による電流磁場で制御されてきましたが、2000年にエネルギー消費が小さなスピン流によるスピントルク効果が、そして2010年頃には電圧磁気効果によるスピントルク効果が発見されました。電圧磁気効果を用いると、電流磁場より高効率であり現在開発されているMRAMの駆動原理であるスピン流によるスピントルク効果と比較しても100倍以上の低消費電力化が可能であり、精力的に研究がされています(図1(a))。

従来は小さな電圧磁気効果を特定の条件下で用いてスピントルク効果、すなわち磁極の反転等をデモンストレーションする研究が多く、近年は大きな電圧磁気効果、具体的には単位電界辺りの界面磁気異方性エネルギーの大きさを1000 fJ/Vm以上にする材料開発が重要視されています。そこで本研究では巨大な電圧磁気効果の実現に向けた知見を得るため原子層成長技術を駆使した高品質デバイスと放射光X線分光を融合させた独自研究を展開しました(図1(b))。具体的にはスピントロニクスデバイスの基本構造であるFe/MgO、そしてFe/MgO界面にCo及びPtを1原子層挿入した多層膜デバイスを放射光実験用に新たに開発しました。そしてFe/Co/MgO系を用いて磁性を主に担う原子軌道であるd軌道の電子増減に起因する軌道磁気モーメント機構[1]、Fe/Pt/MgO系を用いてd軌道の電子再配列に起因する電気四極子機構[2]を見出し、電圧磁気効果を増強させるための材料設計指針を明確にしました[3]。実際にFeIr/MgO系ではFe/MgO比10倍の電圧磁気効果(>300 fJ/Vm)が発見されています。電圧磁気効果への放射光利用は実験設計の困難さから極めて少ないものでしたが、本研究では高度な試料作製技術によりこれを実現させ

てスピントロニクスにおける放射光利用の潮流を生み出しました。本技術はオペランド分光として放射光分野からも注目されています。

最近では上述の単純金属多層膜のみならず、量子物質と呼ばれる新奇材料を用いたスピントロニクス研究も推進しています。例としてトポロジカル磁性体の一種であるカイラル反強磁性体 Mn_3Sn を用いたデバイスにおいて新奇スピントルク効果を発見しました[4]。

【実用化が期待される分野】

IT機器の低消費電力化は社会生活を豊かにしつつ地球環境を維持する上で重要な課題として認識されています。エレクトロニクス分野でこれを実現するキーテクノロジーのひとつが不揮発性メモリであり、大容量性・高速性・高い耐繰り返し動作性を満たし得る唯一の不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリMRAMは世界中で開発が進められています。界面磁性の電界変調による磁化制御技術はMRAMの新たな駆動原理として注目されており、低消費電力化に寄与すると期待されています。

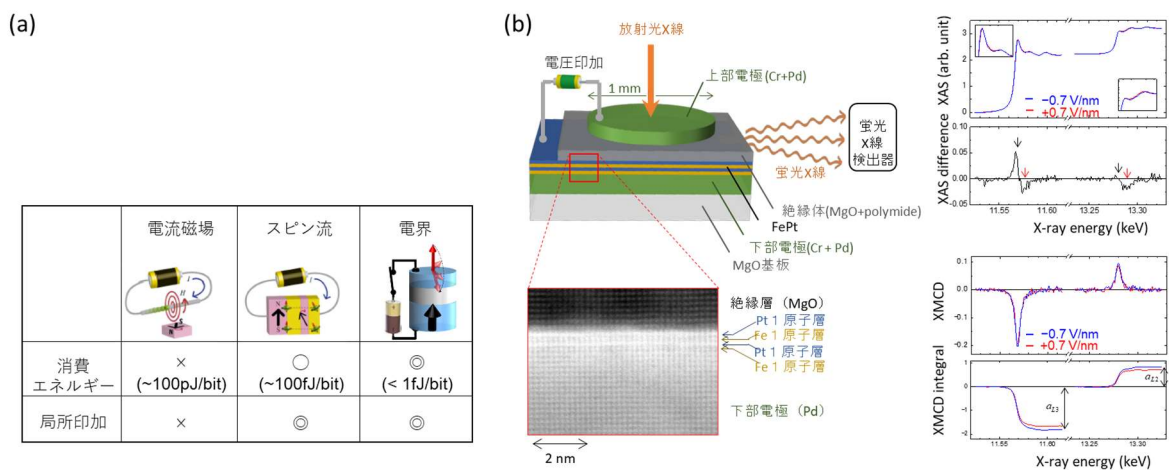


図 1(a) 様々な磁極の制御手法。(b)本研究におけるオペランド X 線分光の実施例。

[1] T. Kawabe, K. Yoshikawa, M. Tsujikawa, T. Tsukahara, K. Nawaoka, Y. Kotani, K. Toyoki, M. Goto, M. Suzuki, T. Nakamura, M. Shirai, Y. Suzuki, and S. Miwa, “Electric-field-induced changes of magnetic moments and magnetocrystalline anisotropy in ultrathin cobalt films”, *Physical Review B* **96**, 220412(R) (2017).

[2] S. Miwa, M. Suzuki, M. Tsujikawa, K. Matsuda, T. Nozaki, K. Tanaka, T. Tsukahara, K. Nawaoka, M. Goto, Y. Kotani, T. Ohkubo, F. Bonell, E. Tamura, K. Hono, T. Nakamura, M. Shirai, S. Yuasa, and Y. Suzuki, “Voltage controlled interfacial magnetism through platinum orbits”, *Nature Communications* **8**, 15848 (2017).

[3] S. Miwa, M. Suzuki, M. Tsujikawa, T. Nakamura, M. Shirai, S. Yuasa, and Y. Suzuki, “Perpendicular magnetic anisotropy and its electric-field-induced change at metal-dielectric interfaces”, *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**, 063001 (2019).

[4] H. Tsai, T. Higo, K. Kondou, T. Nomoto, A. Sakai, A. Kobayashi, T. Nakano, K. Yakushiji, R. Arita, S. Miwa, Y. Otani, and S. Nakatsuji, “Electrical manipulation of a topological antiferromagnetic state”, *Nature* **580**, 608 (2020).