



丸文研究奨励賞 受賞者

野崎 隆行

産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター  
研究チーム長

# 電圧によるスピンの 高効率制御技術の開拓

低消費電力で駆動する不揮発性磁気メモリの実現に向けて

## 研究の背景

Internet of Things (IoT)、人工知能 (AI) といった新しい技術が急激に身近なものとなり、今後情報通信ネットワークの拡大はより加速的に進むと予測される。このような高度情報環境の持続的な発展を維持するためにはIT機器の消費電力低減が重要な課題となっている。その1つのアプローチとして注目されているのが、電源を切っても情報を保持することができる“不揮発性メモリ”である。我々は、電子が有する磁石としての性質 (スピン) を利用した新しい電子デバイスの創製を目指す“スピントロニクス”技術に注目し、磁石の情報不揮発性を利用した固体磁気メモリ (MRAM) の開発に取り組んでいる。しかしながら、現状のMRAMでは情報の書き込み (磁化方向の制御) に電流通電を用いており、抵抗損失による不要な電力消費が駆動電力低減の弊害となっている。

我々はこの問題の抜本的な解決策として電圧による新しい磁化方向制御技術の開発に取り組んできた。その結果、数原子

層程度まで超薄膜化した鉄 (Fe) などの強磁性層に誘電層を介して電圧を印加すると、磁気異方性 (磁化の向きやすい方向を決める物性) が変化することを発見した (電圧磁気異方性制御) [1]。この現象は電子軌道の広がり方や占有状態が電圧を加えることにより変化し、電子の軌道運動と結合しているスピン (磁化) の向きがそれに伴って変わることによって生じる (図1参照)。金属の場合は電子遮蔽効果のため電圧を印加しても物性変化は顕在化しないというのが電磁気学の常識であったが、数原子層レベルの金属超薄膜の作製を可能とするプロセス技術の発展が新現象の発見をもたらした。

## 研究の成果

私は大阪大学所属時の初期から電圧磁気異方性制御の研究に参加する機会に恵まれ、特に産総研に異動後にこの手法を実用化技術に押し上げるための研究開発に取り組んできた。成果の1つが実用素子への導入と高速応答性の実証で

ある。MRAMにおいては、強磁性層 / 酸化マグネシウム (MgO) 層 / 強磁性層のサンドイッチ構造からなる磁気トンネル接合 (MTJ) 素子が記憶要素として用いられる。両強磁性層の磁化の向きが平行か反平行で抵抗が大きく変化するトンネル磁気抵抗効果 [2] を用いて情報が読み出される。このMTJ素子に超薄膜強磁性層の作製技術を導入し、2010年に電圧磁気異方性制御の観測に初めて成功した [3]。これにより実用的な1~2 V程度の電圧での磁気異方性制御が可能となった上に、磁気抵抗効果を用いることで磁化情報と電気情報間の変換が可能となったため、電圧磁気異方性変化の特性を電氣的に評価する標準技術の確立にも繋がった。

さらに、電圧磁気異方性制御の高速応答性実証を目的として、電圧による強磁性金属薄膜の磁化はGHz帯に固有の共鳴周波数を持ち、この周波数に一致する周期でトルクを与えると振り子の共鳴のように共鳴運動が誘起される。このトルクに高周波電圧印加によって生じる磁気異方性

図1 超薄膜金属強磁性層における電圧磁気異方性変化の原理模式図

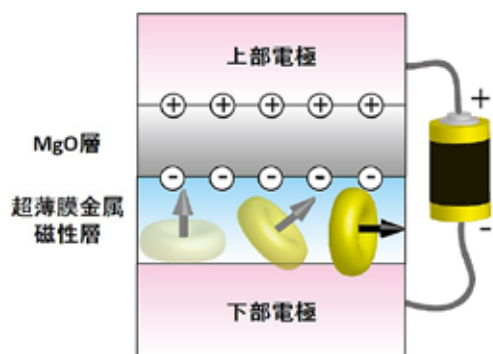
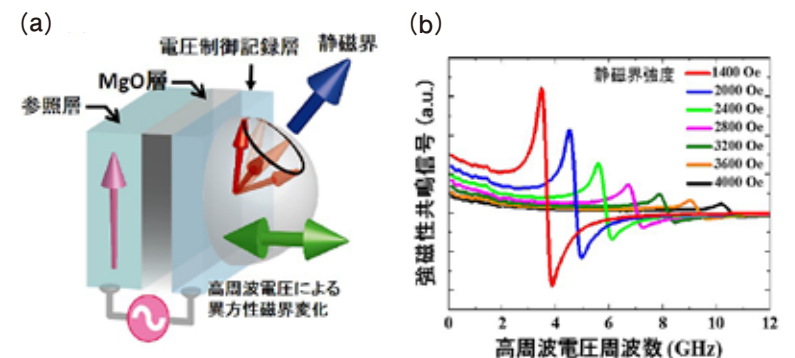


図2 (a) 電圧による強磁性共鳴励起の原理模式図、および (b) 磁気抵抗効果を利用した電圧誘起強磁性共鳴信号の観測例



の周期的な変化を利用し(図2(a))、電圧誘起磁化ダイナミクスを電氣的に検出することに成功した(図2(b))。これにより10 GHz(時間スケールで0.1ナノ秒)の高周波帯においても電圧磁気異方性変化が応答することが実証された[4]。ダイナミクス励起の効率より、電圧制御が従来の電流制御と比較して約1/100の低消費電力化が可能であることを示した。また、共同研究者の塩田らにより、パルス電圧によって誘起される磁化の高速ダイナミクスを利用した電圧のみによる画期的な磁化反転制御法も実現されている[5]。

電圧制御型MRAMの開発において最も重要となる技術課題がスケーラビリティ実証に向けた電圧磁気異方性制御の高効率化である。磁化の向きとして情報を保存するためには室温の熱エネルギーによって磁化が反転してしまわないように十分高い熱安定性を有する必要があるため、素子の微小化(大容量化)が進むほど大きな磁気異方性が必要となる。電圧制御型MRAMでは電圧により磁気異方性を打ち消すことで磁化反転制御を行うため[5]、電圧磁気異方性変化の効率も同時に向上させる必要がある。この変化効率は単位電界あたりの異方性エネルギー変化量(fJ/Vm)で定義され、実用的には少なくとも300 fJ/Vm以上が必要とされている。これまでは主に鉄コバルト合金を用いた研究が中心であり、その場合、変化効率は100 fJ/Vmに留まっていた[6]。さらなる効率向上を目指し、高品質エピタキシャル超薄膜Feの作製技術確立[7, 8]と、大きなスピン軌道相互作用を有する5d遷移金属を用いた界面エンジニアリングの導入により、イリジウム(Ir)を低濃度でドーピングしたFeIr合金超薄膜(図3(a))において、300 fJ/Vmを超える大きな電圧磁気異方性変化効率を示す新材料の開発に成功した(図3(b)) [9]。これにより、実用メモリの要求を満たす特性に初めて到達し、電圧制御型MRAMの実現可能性が大きく進展した。

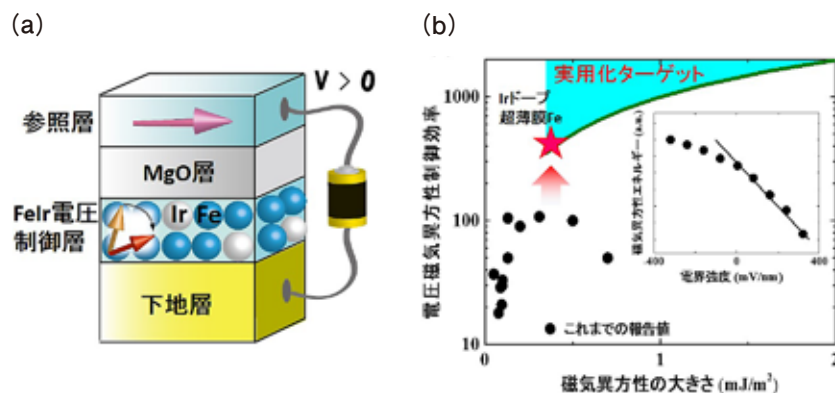
## 将来の展望

現象の発見から約10年を経て、ようやく実用可能性を議論できる状況まで研究開発が進んできたが、当然ながら電圧磁気異

図3 (a) Irドーピング超薄膜Fe層を有する電圧制御型MTJ素子の模式図

(b) これまでに報告されている磁気異方性と電圧磁気異方性制御効率の特性比較

Irドーピング超薄膜Fe(星印)により実用化ターゲットに求められる特性が初めて達成された(挿入図はIrドーピング超薄膜Feにおける磁気異方性エネルギーの印加電界強度依存性の観測例)



方性制御を基礎研究から実用化へ橋渡しするにあたって解決しなければならない課題は山積している。その解決には原子レベルでの構造解析や電圧印加状態での電子状態分析、計算科学を利用した原理解明・新材料探索、さらに安定な電圧誘起磁化反転を実現する電圧制御型MRAM用回路・アーキテクチャ設計など、それぞれのフィールドの最先端技術を結集して取り組む必要が有る。幸い我々は現在ImPACTプログラムの枠組みにて、上記の課題に産学官連携体制で総括的に取り組む環境に恵まれており、継続的な発展を期待したい。電圧磁気異方性制御はMRAMに限らず、これまで提案されてきた様々なスピントロニクスデバイス、例えば高感度磁気センサーや高周波スピンドバイス、さらにスピン波やスピン流を利用した新しい情報伝送技術等にも適用可能であり、スピントロニクスデバイスの発展を根本から支える重要な技術となる可能性を秘めている。大容量・高速・低消費電力を同時に求められる次世代ネットワークインフラにおいて、日本で誕生

したオリジナル技術が課題解決の一助となることを夢見て引き続き尽力したい。

## 謝辞

本研究は大阪大学 鈴木義茂教授の研究室にてスタートし、産業技術総合研究所スピントロニクス研究センター(湯浅新治センター長)にて実用化研究に取り組んできた成果を中心としています。両研究グループにてご支援、ご助言いただいた共同研究者の皆様に感謝申し上げます。また、本研究成果に関する継続的な研究遂行は、戦略的創造研究推進事業 さきがけ「ナノ製造技術の探索と展開(横山直樹 総括)」、CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究(渡辺久恒 総括)」、および革新的研究開発推進プログラムImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現(佐橋政司 PM)」の支援により行われました。上記プロジェクトにてお世話になりました共同研究者を含む関係者の皆様にもこの場を借りて深く御礼申し上げます。

## References(参考文献)

- [1] T. Maruyama, Y. Shiota, T. Nozaki et al. Nat. Nanotechnol. 4, 158 (2009) .
- [2] S. Yuasa et al. Nat. Mater. 3, 868 (2004) .
- [3] T. Nozaki et al. Appl. Phys. Lett. 96, 022506 (2010) .
- [4] T. Nozaki et al. Nat. Phys. 8, 491 (2012) .
- [5] Y. Shiota, T. Nozaki et al. Nat. Mater. 11, 39 (2012) .
- [6] W. Skowronski, T. Nozaki et al. Appl. Phys. Exp. 8, 053003 (2015) .
- [7] T. Nozaki et al. Phys. Rev. Appl. 5, 044006 (2016) .
- [8] A. Koziol-Rachwał, T. Nozaki et al. Sci. Rep. 7, 5993 (2017) .
- [9] T. Nozaki et al. NPG Asia Mater. 9, e451 (2017) .