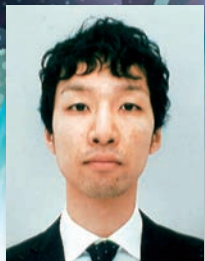


第21回青葉工学研究奨励賞



強磁性金属における磁化の電気的制御に関する研究

東北大学
電気通信研究所
助教 金井 駿

スマートフォンやパーソナルコンピュータのメインメモリとして用いられる半導体メモリは、言うまでもなく我々の生活に必要不可欠である。その高性能化による待機時の消費電力（＝情報保持電力）の抑制が近年の課題であり、情報保持電力が不要な不揮発性メモリデバイス、特に書き替え回数が事実上無限回である磁気メモリに注目が集まっている。磁気メモリのビット情報は磁化方向により定義される。近年盛んに研究されている、2枚の磁性層で絶縁体を挟んだ磁気トンネル接合（MTJ）デバイスは、磁化方向により素子抵抗が変わる性質（トンネル磁気抵抗効果）を有しており、情報のランダム読み出しが可能である。更に、MTJを貫くトンネル電流を流すことにより、角運動量の授受を介した磁化方向制御「スピン注入磁化反転」が可能である。このビット操作方式は素子の数十ナノメートルへの微細化と数十ピコジュール程度の動作電力が可能であるため、高集積性と低消費電力を両立する可能性を持つ不揮発性メモリとして注目されてきた。ナノサイズMTJにおいては、磁化の向きやすい方向（磁化容易方向）、即ちビットの記録方向が膜面垂直方向の場合には記録方向が膜面平行の場合に比較して磁化反転電流を低減可能である。我々は、研究開始当時標準的であった、膜面平行方向にビットを記録するMTJに用いられていたCoFeB/MgO接合において、CoFeB膜厚を2ナノメートル以下に減少させることにより、磁化容易軸方向が膜面垂直となることを世界に先駆けて発見した [1]。また、主に界面のFe原子に起因する垂直磁気異方性が垂直磁化容易をもたらしていることを実験及び理論計算により明らかにした [2]。この発見に基づいて我々が報告した微細（直径40ナノメートル）かつ低消費電力な垂直MTJは、現在の高集積超低消費電力次世代不揮発性MTJメモリにおける標準構造となった。

2000年、磁性半導体を用いて作製された電界効果トランジスタにおいて、電界による磁性制御が初めて実験的に実証され、注目を集めた。スピン注入磁化反転においては、MTJデバイス中の消費電力は電流印加に起因するジュール損により決定される。一方で電界による磁性制御にはジュール熱が不要であり、消費電力をスピン注入磁化反転と比較しても更に2-3桁低減することが可能である。従って、代表的な半導体メモリであるCMOSなどと同程度の動作電力を持ち、不揮発性を有するメモリの実現が期待される。我々は、上述のCoFeB/MgO接合を金属電極/絶縁体として含むキャパシタ構造素子（図1(a))に作製することで電圧印加により接合界面の電子密度を変化させ、その磁性を制御可能であること [1, 3]、及び磁化容易方向の電

圧印加による制御に成功した（図1(b)）。

サブナノ秒の高周波電圧パルスを印加することで磁化容易方向を瞬間的に切り替えると、磁化の歳差運動が誘起される（図1(a)）。我々はCoFeB/MgO接合を用いた直径70ナノメートルのMTJを用いて、電圧印加により誘起した磁化歳差運動を介した磁化反転、「電界誘起磁化反転」を実現した [4]。

現在、電界誘起磁化反転の実証から一歩進み、その応用に向けた研究を行っている。外部定常磁界により反転速度（＝ビット書き替え速度）の制御と1ナノ秒以下のビット書き替えを達成した [5]。また、スピン注入磁化反転と電界誘起磁化反転を融合した新規ビット制御手法により、ビットごとの反転速度のばらつきに起因する、制御不安定性の抑制を実現した [6]。現在トンネル電流の抑制による消費電力の低減に取り組んでいる。これら一連の研究結果はメモリの低消費電力化と高集積化を実現する不揮発性スピントロニクスメモリ素子開発の推進に必要な基盤技術であり、一層の研究の進展を通し工学へ寄与すべく、日々研究を邁進している。

- [1] M. Endo, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96**, 212503 (2010).
- [2] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 222409 (2014).
- [3] S. Kanai, *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **266**, 012092 (2011).
- [4] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 122403 (2012).
- [5] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 072408 (2013).
- [6] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 212406 (2014).

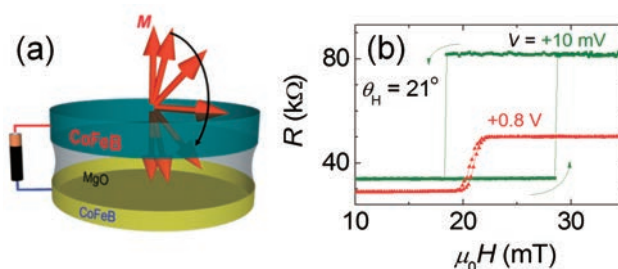


図1：(a) 素子構造と磁化反転の模式図。CoFeBは金属磁性体、MgOは非磁性絶縁体であり、上側CoFeBの磁化方向（矢印）の上/下でビット情報の'0'/'1'を記憶するキャパシタ素子である。矢印で示すように電圧印加時に磁化が歳差運動し、180度歳差運動した際に電圧印加を終了して磁化反転する。印加電圧パルス幅はナノ秒程度であり、高速なビット操作が可能である。(b) 実際の素子で測定した電圧印加時のCoFeB（膜厚1.8ナノメートル）の磁気特性の変化。ヒステリシスの消失は磁化容易方向が膜面垂直から膜面平行方向へ切り替わることを意味する。