



磁気トンネル接合素子の トンネル磁気抵抗効果の研究

— 酸化マグネシウムを用いた高性能磁気トンネル接合素子の実現 —

湯浅 新治

産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 研究グループ長

研究背景

伝導電子の電荷とスピンの両方を活用して新機能の創出するスピントロニクス分野で応用最も重要な現象が、トンネル磁気抵抗効果 (Tunneling Magneto Resistance (TMR) 効果) である。1995年に図1のような磁気トンネル接合素子 (Magnetic Tunnel Junction (MTJ) 素子: 厚さ数nm以下の絶縁体トンネル障壁層を2枚の強磁性電極層で挟んだ接合素子) が室温で18%という当時としては非常に大きな磁気抵抗を示すことが発見され^[1]、TMR効果と名付けられた。この現象は伝導電子のスピンの依存したトンネル効果に起因している。通常、両側の電極層の磁

化が反平行なときのトンネル抵抗 (R_{AP}) は、平行なときのトンネル抵抗 (R_P) よりも大きな値となる (図1 (a, b))。ここでトンネル抵抗の変化率をMR比 = $(R_{AP} - R_P) / R_P$ と定義すると、これがMTJ素子の性能指数となる。TMR効果は高感度磁気センサーや新しい不揮発性メモリMRAMを開発するための中核技術である。過去10年間、トンネル障壁材料としてアモルファス酸化アルミニウム (Al-O) を用いた実用MTJ素子の研究開発が精力的に行われ、これまでに室温で約70%のMR比が実現されていた。しかし、次世代デバイス開発のためには、少なくともその2倍以上の巨大なMR比が切望されていた。

一方、単結晶の酸化マグネシウム (MgO)

をトンネル障壁に用いたFe (001) / MgO (001) / Fe (001) 構造のエピタキシャルMTJ素子に関する第一原理計算によって、1000%を超える巨大なTMR効果が理論的に予測された^[2]。これは、コヒーレントなスピン依存トンネルに起因したものである。電極中には種々の対称性を持つブロッホ電子状態が存在するが、アモルファスAl-O障壁の場合 (図1 (c))、障壁中や界面に対称性が無いため、これら全てのブロッホ状態 (上向き・下向きスピンの両方が多数存在) が有限確率で障壁中の浸み出し電子状態に結合する結果、MR比が低下してしまう。一方、高対称構造を持つエピタキシャルFe/MgO/Feトンネル接合の場合 (図1 (d))、主にs電子の高対称 Δ_1

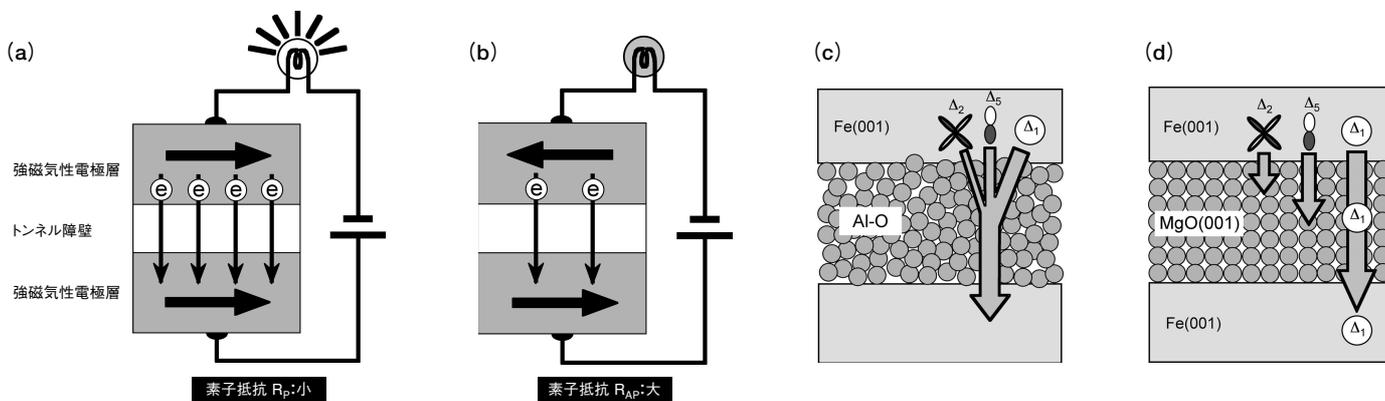


図1 トンネル過程の概念図

TMR効果の概念図。(a) 両側の強磁性電極の磁化が平行な場合と、(b) 反平行な場合。

(c) アモルファスAl-Oトンネル障壁の場合のトンネル過程。(d) 結晶MgO (001)トンネル障壁の場合のトンネル過程。

ブロッホ状態のみがMgOの Δ_1 浸み出し電子状態に結合する。MgO- Δ_1 状態は、その他の低対称な浸み出し状態に比べて障壁中での状態密度の減衰距離が非常に長いこと、MgO- Δ_1 状態を介したトンネル過程がトンネル電流を支配することになる。電極中の Δ_1 ブロッホ状態はフェルミレベルで完全にスピン分極しているため、巨大TMR効果の出現が予想される。この理論予測と前後して、MgO障壁MTJの作製が多数の研究機関によって試みられたが、Al-O障壁を越えるTMR効果は実現されず、MgO障壁に対する期待は失われていった。

研究の成果

まずはじめに超高真空蒸着(MBE)法を用いて、単結晶基板上にエピタキシャルFe/MgO/Fe構造のMTJを作製した^[3,4]。ここで、トンネル障壁/電極界面の過剰酸化を抑制することが成功の鍵と考え、成長条件を工夫した。図2は、エピタキシャルMTJの断面の電子顕微鏡写真である。高品質の単結晶MgO(001)トンネル障壁と原子レベルで平坦な界面で構成されている。この薄膜を微細加工してMTJ素子を作製し、室温で180%という巨大なMR比を実現した(図3)^[4]。さらに、MgO障壁幅に対してMR比が振動するという、コヒーレント・トンネルに起因した新現象の観測にも成功した。

エピタキシャルMTJを作製するには特殊な単結晶基板とシード層が必要なため、そのままでは応用には不向きである。そこで次に、MgO-MTJ素子の生産プロセスの

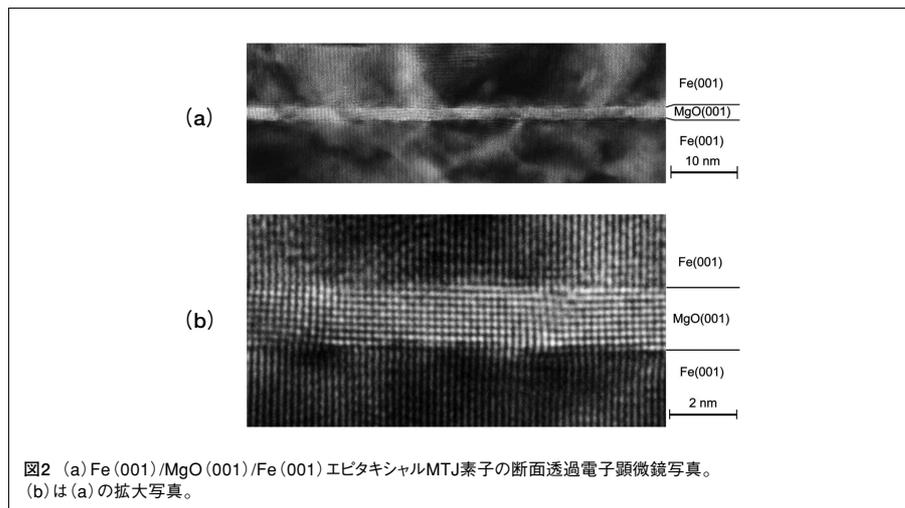


図2 (a) Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) エピタキシャルMTJ素子の断面透過電子顕微鏡写真。(b)は(a)の拡大写真。

開発を行った。スパッタ法を用いてCoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ薄膜を大径ウエハ上に作製した^[5]。CoFeB合金の電極層は成膜直後の状態ではアモルファスであるが、その上に積層したMgO障壁は(001)配向した多結晶層である。この構造は任意の下地の上に室温スパッタ成膜で作製可能であるため、その生産プロセス適合性は理想的である。この構造のMTJ素子でも室温で230%という巨大TMR効果が得られた^[5]。現在までに室温で300%を超えるMR比が実現されている。その後の研究で、ポスト・アニールによってCoFeB電極層がbcc(001)構造に結晶化する結果、巨大TMR効果が発現するという機構が明らかになった^[6]。

今後の展望

MgO障壁MTJ素子の室温巨大TMR効果によって明るい展望が開かれた。今

後のスピントロニクス実用デバイスの研究開発はMgO-MTJを中心に展開されていくと予想される。MgO-MTJを用いた次世代ハードディスク磁気ヘッドは比較的速やかに実用化されるものと期待される。一方、大容量MRAMに関しても、巨大TMR効果によって読出しに関する問題は解決できる目処が立った。Gbit級の大容量MRAM実現に向けて残された最大の課題は低電力書き込み技術の確立であり、スピン注入磁化反転による書き込み法が有望視されている。MgO-MTJとスピン注入書き込みを用いた大容量MRAMの実現に向けて研究開発が精力的に進められている。基礎研究面では、エピタキシャルMgO-MTJによって複雑なスピン依存トンネル現象の詳細な物理機構が解明されていくものと期待される。

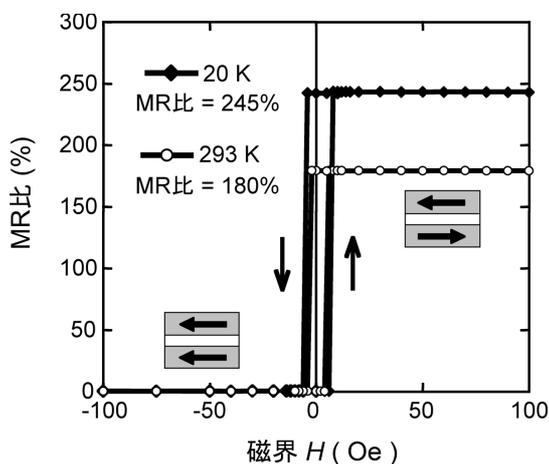


図3 Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) エピタキシャルMTJ素子の磁気抵抗特性。

References (参考文献)

- [1] T. Miyazaki and N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.* 139, L231 (1995).
- [2] W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess and J. M. Maclaren, *Phys. Rev. B* 63, 054416 (2001).
- [3] S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando and Y. Suzuki, *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, L588 (2004).
- [4] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando, *Nature Mater.* 3, 868 (2004).
- [5] D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki and K. Ando: *Appl. Phys. Lett.* 86, 092502 (2005).
- [6] S. Yuasa, Y. Suzuki, T. Katayama and K. Ando, *Appl. Phys. Lett.* 87, 242503 (2005).