

超 Gbit-MRAM のための単結晶 TMR 素子の開発

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

1. 研究のねらい

これまで約 10 年間、アモルファス酸化アルミニウム(AI-O)のトンネル障壁層と遷移金属強磁性体の電極層を用いた MTJ 素子の研究開発が世界中で精力的に行われ、現在までに室温で約 70% (低温で約 100%) の MR 比が実現されている。これを用いれば、64~128 Mbit 程度の MRAM が実現可能と考えられている。しかし、さらに Gbit 級の大容量 MRAM を高速で動作させるために、室温で少なくとも 150% 以上の巨大な MR 比の実現が渴望されていた。また、MR 比が大きいほど、MRAM の読み出し速度を高速化できる。しかし、AI-O 障壁の従来型 MTJ 素子ではこれ以上の飛躍的な MR 比の向上は望めない状況にあった。室温で 150% を超えるような巨大な MR 比を実現する手法が、結晶性のトンネル障壁である、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ると、1000% を超える巨大 TMR 効果が理論的に予想される。この巨大 TMR 効果の物理的機構は、完全にスピン分極した高対称 Δ_1 ブロッホ状態のコヒーレントなトンネル伝導に起因する(図 1 参照)。これまで、実際に Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) エピタキシャル MTJ 素子を作製する試みが欧州の公的研究機関を中心に行われたが、不成功であった。さきがけ研究では、結晶 MgO(001)障壁を用いて巨大な室温 TMR 効果を目指すとともに、その生産プロセスの開発も行った。

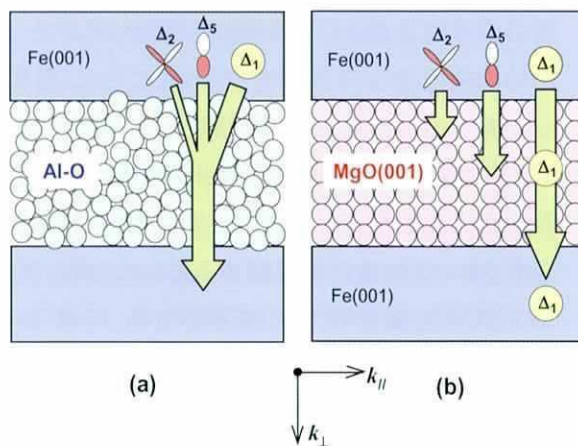


図 1: トンネル過程の概念図。(a)アモルファス AI-O トンネル障壁。(b)単結晶 MgO(001)トンネル障壁

2. 研究成果と考察

本研究ではまず、超高真空蒸着(MBE 法)を用いて Fe/MgO/Fe エピタキシャル MTJ 素子の作製を行った。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重要と考え、成長条件を工夫した。図 2 は、MBE 成長したエピタキシャル MTJ の断面の電子顕微鏡写真である。高品質の単結晶 MgO(001)トンネル障壁層と原子レベルで平坦な界面で構成されていることが分かる。放

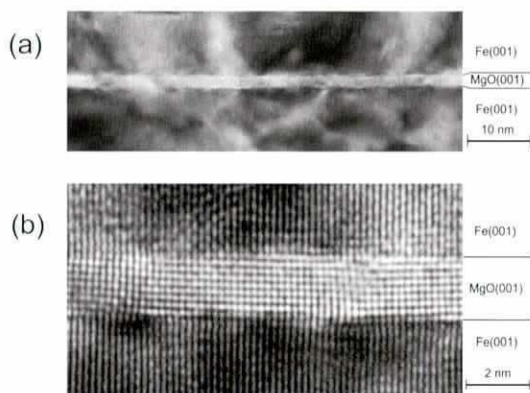


図 2: Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) エピタキシャル MTJ の断面の透過電子顕微鏡(TEM)写真。(b)は(a)の拡大写真。

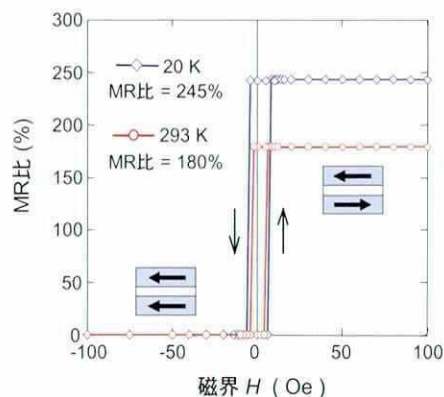


図 3: Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) エピタキシャル MTJ 素子(MgO 障壁厚さ 2.3 nm) の磁気抵抗曲線。

射光(KEK-PF)を用いたX線吸収(XAS)とX線磁気円二色性(XMCD)を測定した結果、過剰な酸素が存在しない清浄な Fe(001)/MgO(001)界面が実現されていることが確認された。この薄膜を微細加工して作製した MTJ 素子の典型的な磁気抵抗特性を図 3 示す。室温で 180%、低温で 245%という巨大な MR 比が実現された。これは、従来型の Al-O 障壁 MTJ 素子の 2 倍を超える巨大な室温 TMR 効果である(図 4 の①)。さらに下部電極に bcc Co(001)を用いることによって、室温で 271%の MR 比が得られた。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ている。

エピタキシャル MTJ を成長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。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%の巨大 TMR 効果が得られた(図 4 の②)。現在までに室温で 300%を超える MR 比が実現されている。CoFeB/MgO/CoFeB 構造で巨大 TMR 効果が得られる理由として、ポスト・アニールによって CoFeB 合金電極層が bcc(001)構造に結晶化するという機構が、その後の研究で明らかになった。

さきがけ研究ではこの他に、Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)エピタキシャル MTJ の詳細なトンネル分光測定を行い、アモルファス Al-O 障壁では観測されたことのない複雑な構造を持つトンネル・スペクトルの観測に成功した。

MgO 障壁 MTJ 素子の巨大 TMR 効果によってスピントロニクス応用に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行くものと思われる。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。

3. 主な論文

- [1] S. Yuasa, Y. Suzuki, T. Katayama, and K. Ando, "Characterization of growth and crystallization processes in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junction structure by reflective high-energy electron diffraction", *Appl. Phys. Lett.* **87**, pp.242503-1-3 (2005).
- [2] S. Yuasa, T. Katayama, T. Nagahama, A. Fukushima, H. Kubota, Y. Suzuki, and K. Ando, "Giant tunneling magnetoresistance in fully epitaxial bcc Co/MgO/Fe magnetic tunnel junctions", *Appl. Phys. Lett.* **87**, pp.222508-1-3 (2005).
- [3] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, K. Ando and Y. Suzuki, "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions", *Nature Mater.* **3**, pp.868-871 (2004).

4. その他

受賞: 丸文学術賞(2006)、市村学術賞(貢献賞)(2005)、文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2005)、応用物理学会 JJAP 論文賞(2005)、日本応用磁気学会 論文賞(2005)、日本応用磁気学会 優秀研究賞(2004)、つくば奨励賞(若手部門)(2003)

特許出願: 4 件

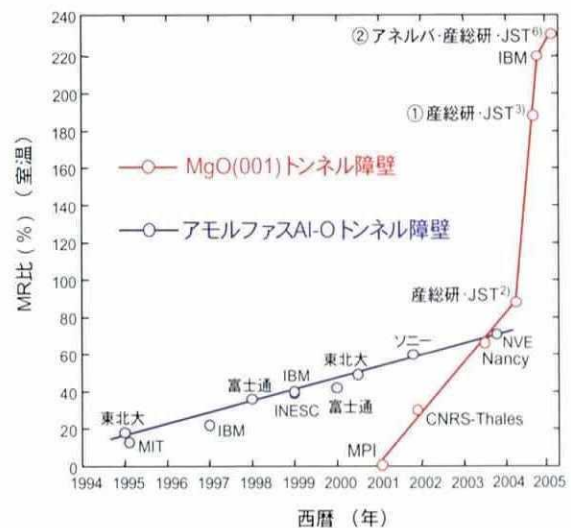


図 4: 磁気トンネル接合(MTJ)の室温における磁気抵抗(MR)比の改善の歴史。