

単結晶 TMR (トンネル磁気抵抗) 素子で世界最高性能を達成

大容量 MRAM の実現に道筋

産総研エレクトロニクス研究部門は、高機能不揮発メモリとして期待されているMRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) のキーデバイスとなる、単結晶トンネル磁気抵抗 (Tunnel MagnetoResistance: TMR) 素子を開発し、室温での磁気抵抗 88% という世界最高の性能を達成した (これまでの最高値は 70% で、ほぼ理論限界と考えられていた)。これにより、TMR 素子の出力電圧値を従来の約 2 倍 (380mV) に向上させることに成功した。この研究成果は、次世代の大容量 MRAM 開発へ道筋を拓くものと期待される。

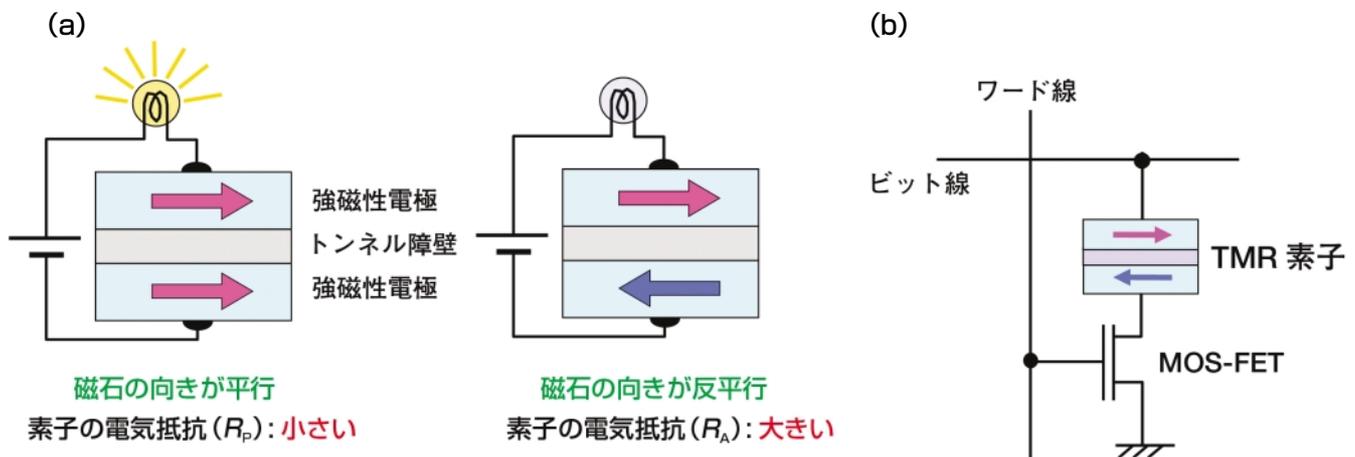
TMR 効果と MRAM

厚さ 1~2nm (1nm: 10 億分の 1メートル) 以下の非常に薄い絶縁体 (トンネル障壁) を 2 枚の強磁性金属の電極で挟んだ素子をトンネル磁気抵抗素子 (TMR 素子) という。絶縁体は通常電気を通さないが、絶縁体が非常に薄いとき量子力学的な効果 (トンネル効果) によって僅かに電流が流れる (トンネル電流)。また、2つの強磁性電極の磁石の相対的な向きが平行なときの素子の電気抵抗 (R_P) と反平行なときの電気抵抗 (R_A) は異なる値をとり、通常 $R_A > R_P$ となる (図 1 (a))。この現象はトンネル磁気抵抗効果 (TMR 効果) と呼ばれる。このときの素子抵抗が変化する割合を百分率で表したものを磁気抵

抗比 (MR 比 $\equiv (R_A - R_P) / R_P \times 100\%$) という。室温よりも低い温度で TMR 効果が起こることは 1970 年代から知られていたが、1995 年に東北大学の宮崎氏が室温で約 20% という比較的大きな MR 比を実現してから一躍注目を集めることとなった。

TMR 素子と MOS-FET (トランジスタ) を組み合わせてワード線とビット線の間格子状に配置するとメモリを作ることができる (図 1 (b))。2枚の電極層の磁石の向きが平行か反平行か (“0”, “1” に相当) で 1 ビットの情報を記憶することができ、記憶情報の読出しは、TMR 効果による素子抵抗の変化を検出することによって行う。これは Magnetoresistive Random-Access-Memory (MRAM) と呼ばれ、不揮発 (電源を切っても記憶が消えない性質)・高速・低消費電力といった理

図1 (a) TMR素子のトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果、(b) 不揮発性磁気メモリ MRAM



想的な特性を備えた究極のメモリになると期待され、現在、世界的に開発競争が繰り広げられている。従来の TMR 素子は強磁性合金の電極層と酸化アルミ (Al-O) のトンネル障壁で構成されており (以下、従来型 TMR 素子と呼ぶ)、室温で MR 比 70%、出力電圧 200mV という特性が達成されている。このような TMR 素子を用いると、64~128 メガビット級の MRAM が実現可能と予測される。しかし、従来型 TMR 素子の出力電圧は DRAM に比べて実質的に半分しかなくまだまだ低いため、集積度を上げるにつれてノイズに埋もれて読み出せなくなってしまうという大きな問題がある。

1ギガビットを超える高集積 MRAM を開発するためには、出力電圧 400mV が必要となり、この課題を解決するために、電極材料の最適化や Al-O トンネル障壁の作製法の工夫などが世界中で精力的に行われてきた。しかし、このような従来の手法による出力電圧の向上は原理的に飽和に近づきつつあり、ギガビット級 MRAM を実現するには画期的な新材料・新原理などの抜本的な解決策が求められている。

単結晶の酸化マグネシウムを用いた新型 TMR 素子を開発

従来型 TMR 素子のトンネル障壁に用いられている Al-O はアモルファス物質 (原子の配列が不規則な物質) であるため、電流が流れる際に電子が散乱され易い (より正確にいうと、波動関数のコヒーレンシーが乱される) (図 2 (a))。このような散乱の多い系の TMR 効果は、Julliere モデル (電子の状態密度を用いて TMR

効果を記述する理論) で説明される。この理論によると従来型 TMR 素子の MR 比の理論的上限は 70% 程度となる。この限界を打破するために、トンネル障壁の材料に酸化マグネシウム (MgO) を用いた新型 TMR 素子を開発した。Al-O とは異なり、MgO を Fe (001) 電極上に成長すると容易に単結晶 (原子が規則正しく配列した物質) になるため、電流が流れる際に電子は散乱されずにコヒーレンシーを保ちながら直進できる (図 2 (b))。このようなコヒーレントな TMR 効果は Julliere モデルで記述できる範囲外にあるため、その理論限界を超えることが可能となる。詳しい理論計算によると、MR 比 1000% という巨大な TMR 効果が期待される。しかし、単結晶 MgO を用いて TMR 素子を作製することはピンホールや界面酸化などの問題があり技術的に難しく、これまで従来型 TMR 素子の性能を超える素子はできなかった。

今回、エレクトロニクス研究部門が構築した世界でも例のない単結晶 TMR 素子一貫製造施設を用いて、高品質の単結晶 Fe 電極と単結晶 MgO トンネル障壁を連続積層することに成功したことによって、世界最高性能の TMR 素子の開発に成功した。

世界最高の磁気抵抗と出力電圧を達成

MgO トンネル障壁を用いた新型 TMR 素子で、世界最高の磁気抵抗 (室温で 88%) を達成した (図 3)。従来型 TMR 素子のこれまでの最高特性は約 70% であった。さらに、新型 TMR 素子では、世界最高の電圧特性

図2 (a) 従来型 TMR 素子では、トンネル障壁の Al-O がアモルファス物質であるため、電子が散乱されやすい。(b) 新型 TMR 素子では、トンネル障壁が単結晶 MgO であるため、電子が散乱されずに波動関数のコヒーレンシーが保存される。

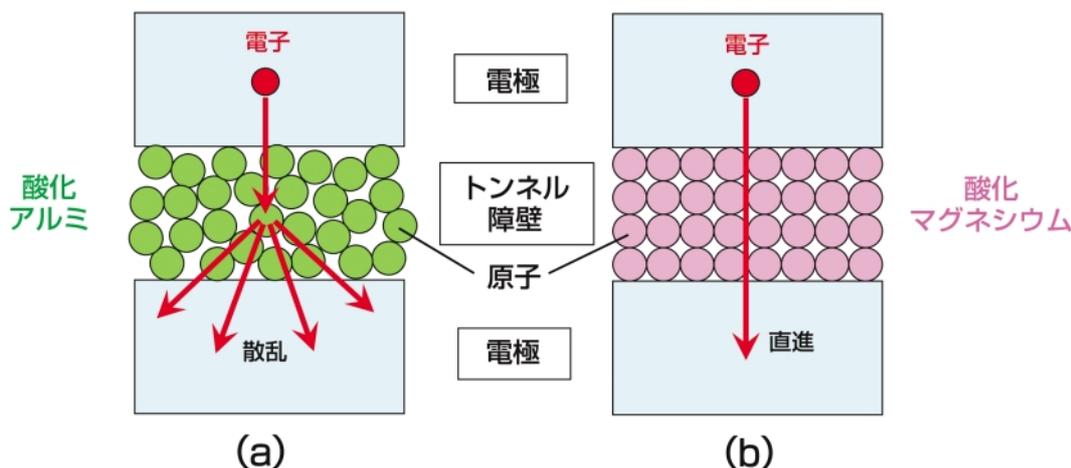
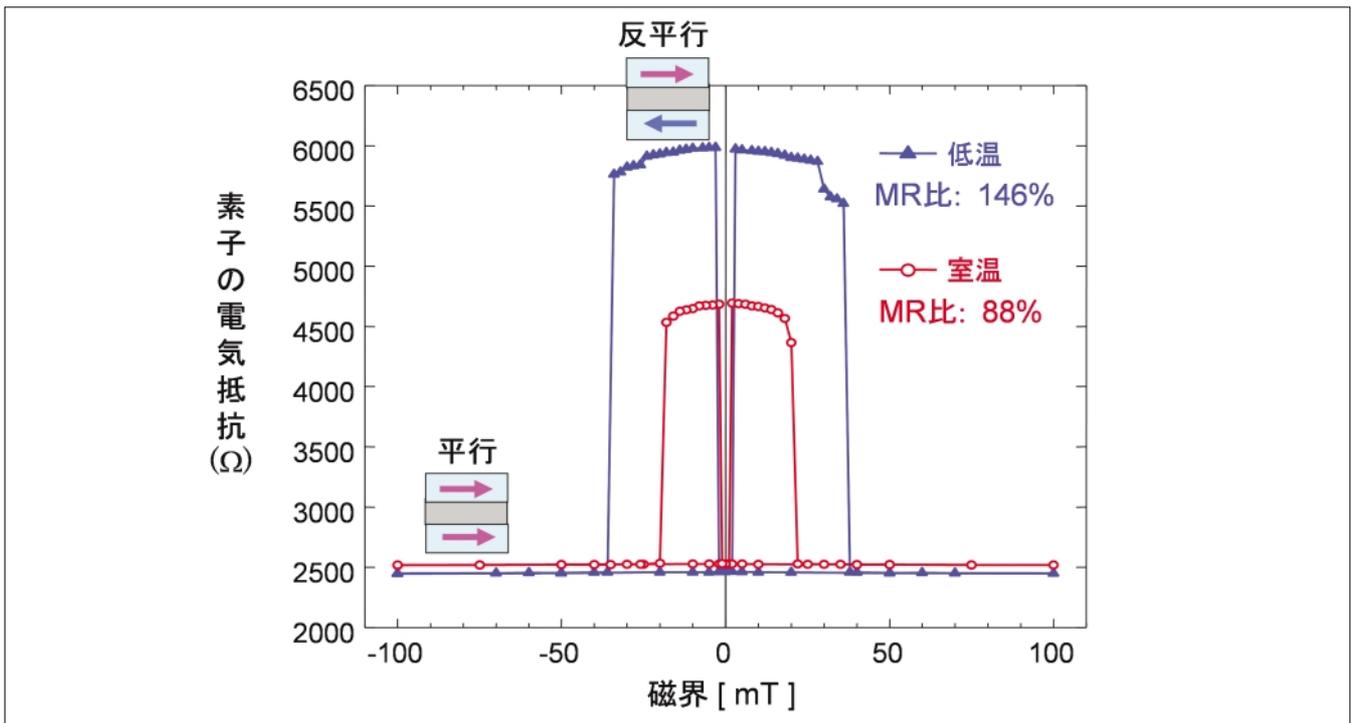


図3 新型 TMR 素子の磁気抵抗特性

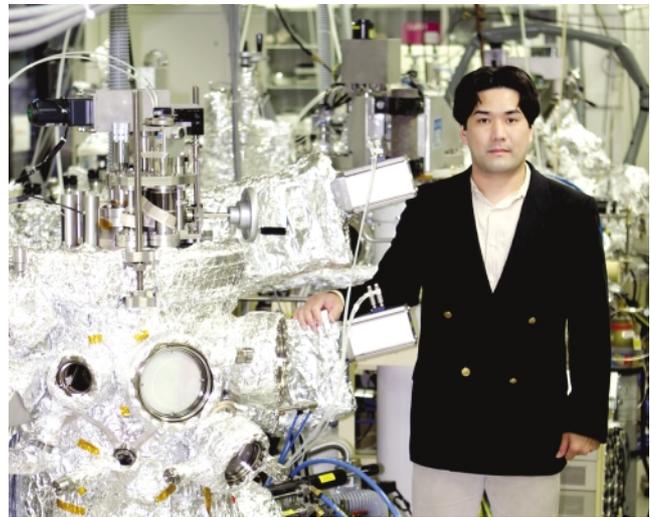
MR比は室温で88%、低温で146%。



も達成した。この結果、TMR素子の出力電圧を、従来の約2倍の380mVに増大することに成功した。これは、ギガビット級MRAMに必要な出力電圧をほぼ達成したものである。ちなみに、今回作製した素子の電気抵抗（約2000Ω・ μm^2 ）はMRAMに用いるのに最適な値である。

今後の予想展開

今回、高品質の単結晶磁性薄膜作製技術に加えて、トンネル障壁の材料としてAl₂O₃に代わる画期的な新材料であるMgOを用いることにより、世界最高の特性を持つ新型TMR素子の作製に成功した。これによりギガビットを超える大容量MRAMの信号読出しに道が拓かれたが、今後は新型TMR素子の作製条件を更に工夫することによって、より一層大きなMRと出力電圧の実現を目指す。また、大容量MRAM開発のもう一つの課題である、書込み電力の低減についても研究を進める予定である。加えて、新型TMR素子をMRAMの中に作り込むための生産プロセスの開発も行い、基礎研究を製品開発に繋げる本格研究を実行していきたい。



エレクトロニクス研究部門 スピントロニクス研究グループ
研究グループ長 湯浅 新治

●問い合わせ

独立行政法人 産業技術総合研究所

エレクトロニクス研究部門

スピントロニクス研究グループ 研究グループ長 湯浅 新治

E-mail : yuasa-s@aist.go.jp

〒305-8568

茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2