

量子スピンセンサ開発の最前線

東北大学 大学院工学研究科 応用物理学専攻
大兼幹彦

1. はじめに

量子スピンセンサとは、強磁性トンネル接合 (MTJ) における量子トンネル効果を基本原理とした高感度な磁気センサ素子である。MTJ におけるトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果の発見から約 30 年が経過し、これまでの数多の研究者による地道な研究開発の積み重ねによって、量子スピンセンサ (通称 TMR センサと呼ばれる) の感度は、超伝導を利用した高感度磁気センサ (SQUID) にも迫るレベルに到達している。この室温下で高感度な量子スピンセンサの実現により、医療・ヘルスケア・インフラ保全・エネルギーマネジメント等の幅広い領域でのユースケースの開拓と実証が期待されている。

本稿では、量子スピンセンサの概要を紹介するとともに、センサの高性能化のための技術、および、センサの応用例について解説する。

2. 量子スピンセンサとは

2-1 トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果

強磁性トンネル接合 (MTJ) の基本構造は、強磁性体/絶縁体/強磁性体の 3 層の薄膜多層膜である。デバイス応用のため、多くの場合は一方の強磁性体を外部磁場に対して応答する自由層、他方を外部磁場が印加されても磁化の向きが変化しない固定層として用いる。トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果によって、自由層と固定層の磁化の相対角度が変化することによって、素子を流れるトンネル電流 (トンネル確率) が変化する¹⁾。1995 年に東北大学の宮崎らと、マサチューセッツ工科大学の Moodera らは、室温で約 20% の大きな TMR 比を室温で観測することに成功した^{2, 3)}。この報告が契機となって、スピントロニクス (またはスピントロニクス) と呼ばれる研究分野が一気に活性化した。その理由は、MTJ 素子を磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) やハードディスクドライブの読み出しヘッドへと応用するために、多くの企業が参入したためである。TMR 効果の発見から数年後、MTJ 素子はハードディスクヘッドとして社会実装され、小容量ながらも MRAM についても実用化に至った。この現象発見から製品化に至るまでのスピードは驚異的であった。

1995 年の室温 TMR 効果の発見後、量子スピンセンサの開発の契機となった大きなブレイクスルーがあった。2004 年に、産業技術総合研究所の湯浅らによって、Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)構造を有するエピタキシャル MTJ 素子において、室温で 88% の TMR 比が観測された⁴⁾。従来のアモルファス構造を有する Al-O トンネル障壁層では、室温で約 70% の TMR 比が当時最大であったが、それを上回る磁気抵抗効果が MgO トンネル障壁を用いることで実現された。この MgO 障壁と Fe 電極とを組み合わせた MTJ 素子における巨大な TMR 効果は、実験よりも前に第一原理計算によって理論予測されていた^{5, 6)}。詳細は割捨するが、Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)構造の MTJ 素子では、Fe の Δ_1 バンドの電子のトンネル確率が高く、かつ、 Δ_1 バンドのスピンの分極率が非常に高いことが巨大 TMR 効果の原因である。さらに、湯浅らと IBM の Parkin らは、MgO トンネル障壁層を用いた MTJ 素子において TMR 効果を劇的に改善し、室温で約 200% もの非常に大きな磁気抵抗効果を観測することに成功した^{7, 8)}。