

## 第19回青葉工学会賞



## スピンを用いた新概念電子デバイスに関する研究

東北大学電気通信研究所  
計算システム基盤研究部門  
准教授 金井 駿

スマートフォンやパーソナルコンピュータ等に用いられる電子デバイスは、近年のAIやIoT技術の急速な発展に伴い、従来にない計算能力と電力消費効率の大幅な向上を強く求められている。筆者は、磁性の源である「スピン」を活用した新たな電子デバイス応用の研究を通じて、①古典ビット、②確率ビット、③量子ビットという三様態にわたる高機能情報デバイスの設計と実証を行ってきた(図1)。本稿では、スピンの非平衡挙動に立脚した高機能情報デバイス実証と、その基盤となるプラットフォーム構築に関する成果を紹介する。



代表例：HDD/不揮発性MTJ 代表例：超常磁性MTJ 代表例：スピン色中心

図1 スピンを用いた各ビット様態(古典・確率・量子)。

## ① 超低消費電力不揮発性磁気メモリデバイスの研究

半導体メモリの微細化により、情報保持に必要な待機電力の削減が課題となっている。この課題の解として、情報保持に電力を要さない磁性体メモリ、特に磁気抵抗ランダムアクセスメモリ(MRAM)が注目されている。筆者は、磁性半導体で見出された磁性の電界効果に着目し、高性能MRAM向け磁気トンネル接合(MTJ)に用いられる金属磁性体CoFeBの磁性の電界効果を世界で初めて観測した[1]。さらに、電界パルスで磁化を非平衡に駆動した過渡応答を利用することで、垂直磁化容易MTJにおける電界誘起磁化反転を世界で初めて実証した[2]。その結果、磁化反転に必要なエネルギーを6.3フェムトジュールとすることに成功した[3]。この値はHDD等を含む全磁性体メモリ中で最小である。また、CoFeBを古典電磁気学に反して垂直磁化容易となる条件を世界で初めて明らかにし、現在主流の電流書き込み型MRAMの低消費電力化・微細化に向けて重要な指針を示した[1]。本研究で提示したデバイス構造は2018年に量産MRAMの標準構造として採用され、実際にスマートウォッチやIoT機器に搭載されている。

## ② 確率的計算機向けスピンドバイスの研究

スピン状態が大きなエネルギー障壁で隔てられる構造はメモリとして有用である。一方、障壁を熱エネルギーと同程度に小さくすると、励起エネルギーをほとんど消費せずに確率的計算が可能となる。MTJを用いた確率的計算機は、大規模化のための動作の高速化やデバイス間ばらつきの抑制、環境電磁場揺動に対する耐性の課題を解決する必要がある。筆者は、従来はMRAM向けの垂直磁化容易MTJ構造がそのまま

確率ビットに転用されていた点に着目し、デバイス構造を確率ビット向けには面内磁化容易構造へと改良することで、確率的計算の動作速度を10万倍向上可能であることを理論的に予言した[4]。実際に直径数十ナノメートルのデバイスを試作し、8ナノ秒での高速動作を実証したほか、磁場揺動耐性・電圧揺動耐性を兼ね備えたMTJデバイスを実証した。これらのデバイスを用い、半導体デバイスを凌駕する問題解決性能を実証することに成功するなど、確率的スピンドバイスの実用化に向けたプラットフォームを築きつつある[5]。

## ③ スピン色中心を用いた新たな量子ビット材料の研究

量子重ね合わせを実現する量子ビットでは、スピンの非平衡開放系としてのダイナミクスが重要となる。筆者は、1970年代以来未解決であった「スピン色中心の量子情報保持時間( $T_2$ )」の代数表現を世界で初めて導出した(図2左)。この式は、材料パラメータ(核スピンのg因子・スピン量子数・濃度)などに基づき $T_2$ を定量的に予測するものであり、従来の2種類の材料に限られていた色中心量子ビット材料候補を数百種類以上へと拡大する契機となった[6]。その結果、特に酸化物に多数の有望候補が存在することが明らかとなり(図2右)、実際に多数の国際グループが実証研究を展開し、筆者自身も新材料の新たな量子ビット材料・デバイスの実証を推進している。例えば、MTJの高性能障壁材料である酸化物(スピネル)において色中心スピンの制御を実験実証し、新たな量子ビットを実証する[7]など、量子ビット研究とスピントロニクスをはじめとした異分野融合プラットフォーム構築を推進している[8]。

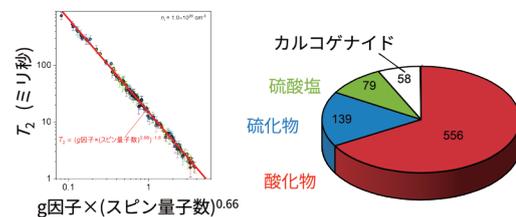


図2 スピン中心の量子情報保持時間( $T_2$ )の材料パラメータによる表現を発見し(左)、有望な新量子材料を提案した(右)。

- [1] M. Endo et al., Appl. Phys. Lett. 96, 212503 (2010).  
 [2] S. Kanai et al., Appl. Phys. Lett. 101, 122403 (2012).  
 [3] S. Kanai et al., Appl. Phys. Lett. 108, 192406 (2016).  
 [4] S. Kanai et al., Phys. Rev. B 103, 094423 (2021).  
 [5] 金井駿ら、日本物理学会誌 78, 256-261 (2023).  
 [6] S. Kanai et al., Proc. Natl. Acad. Sci. 119, e2121808119 (2022).  
 [7] M. Kawahara et al., Appl. Phys. Express 17, 082004 (2024).  
 [8] 金井駿、日本物理学会誌 79, 18-23 (2024).