

# 確率ビット向け微細磁性体の熱ゆらぎ

金井 駿 〈東北大学電気通信研究所 skanai@tohoku.ac.jp〉

深見 俊輔 〈東北大学電気通信研究所 s-fukami@tohoku.ac.jp〉

大野 英男 〈東北大学電気通信研究所 ohno@riec.tohoku.ac.jp〉

非決定論に基づいた新概念コンピューティングハードウェアが関心を集めている。中でも**確率論的計算機**は、決定論的計算機で誤動作の原因となる物理量のゆらぎや乱数を積極的に利用する。例えばCMOSで疑似乱数を生成して室温で演算を行う疑似的な量子アニーリングマシンが開発されている。

近年、我々は量産に至った不揮発性磁気抵抗ランダムアクセスメモリ（不揮発性MRAM）の中核をなす**MTJ素子**を用いて、**スピントロニクス確率論的コンピューティング**を実証した。本素子は、微細磁性素子の熱ゆらぎによる磁化方向の変化を利用した乱数の生成と、その制御・読み取りが可能であり、CMOSを用いた疑似乱数発生ユニットと比較してコンパクト・省エネな**確率ビット**の実現が期待される。

スピントロニクス確率ビットの性能は熱ゆらぎ下の磁化ダイナミクスで決定される。特に「熱ゆらぎでどれだけ高速にビット状態間を遷移するか？」という時間的指標は、計算機が単位時間に探索可能な解の数を決め、計算時間と精度に直結する。状態間の平均遷移時間を（状態）緩和時間と呼び、不揮発性MRAM向けMTJでは**ネール-アレニウス則**が半経験的指標として用いられてきた。**磁気異方性**によるビット間エネルギー障壁を熱エネルギーに対して充分に大きくすることで緩和時間が増大し、不揮発性が向上する。

前述の通り、確率ビット応用ではMRAM応用とは異なり短い緩和時間が求められる。我々は、ネール-アレニウス則を緩和時間低減の指標とし、エネルギー障壁を低減することで、緩和時間を試行時間（通常1 ns程度と仮定される）程度まで低減できると期待して研究を行った。しかし、**垂直磁化容易** MTJを用いた実験では、エネルギー

障壁を小さくしても緩和時間はサブマイクロ秒領域にすら到達しないことが明らかになった。

そこで我々は、磁性体ダイナミクスではあまり考慮されてこなかった磁化方向分布のエントロピーを導入し、従来の不揮発性MRAM向けMTJの研究では重要視されてこなかった試行時間の影響を再考して、確率ビット向けMTJ素子の設計指針をまとめた。

微細磁性体の磁化方向の確率密度分布の時間発展から、エントロピーの時間発展を解析的に計算し、磁性体におけるエネルギー緩和と状態緩和の関係、すなわち「エネルギー緩和が速いほど状態緩和も速くなる」というよく知られた経験則が一般の磁性体に対して定式化された。ここから、確率ビット向けMTJ素子では、試行時間を大きく変えずにエネルギー障壁を低減することが特に重要であるという、短い緩和時間を得るためのMTJの設計指針をまとめた。得られた指針に基づき**面内磁化容易** MTJを作製し、緩和時間8 nsが観測された。これは過去に報告されていた緩和時間の最小値を100倍短縮する値である。

本研究で得られた確率論的計算機向けMTJの熱ゆらぎの高速化指針は、スピントロニクス確率ビットの基本的な設計指針として今後活用されるものと期待される。また、エネルギー緩和と状態緩和の関係はスピントロニクス素子の動作機構の理解と性能向上に非平衡統計力学が重要な役割を果たすことを意味している。加えて、相対エントロピーの時間発展とゆらぎの定理の関連、エネルギー障壁の外場依存性と分岐理論の関連など、現代の統計力学や数学と微細磁性体の熱ゆらぎに関係した新たな現象が明らかになりつつあり、今後の益々の発展が期待される。

## 用語解説

### 確率論的計算機：

あるアルゴリズムにしたがってビットの集合状態を制御し、正解または近似解を導出する。あるいは解の候補をある精度で列挙可能な計算機。

### 磁気トンネル接合 (MTJ) 素子：

2層の強磁性体で絶縁体層を挟んだ3層構造を基本とするトンネル接合素子。2層の強磁性体層の磁化方向の相対方向により、トンネル抵抗が変化する。（トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果）

### スピントロニクス確率論的コンピューティング：

ビット間の2状態を熱的に自然と遷移する超常磁性MTJ素子を用いて実現した確率論的計算。

### 確率ビット：

確率論的計算機を構成する、状態が時間的にランダムに変化するビット。

### ネール-アレニウス則：

2状態間の平均緩和時間 $\tau$ をビット間エネルギー障壁 $E_b$ と熱エネルギー $k_B T$ の比により $\tau = \tau_0 e^{E_b/k_B T}$ と表す法則。係数 $\tau_0$ は試行時間と呼ばれる。

### 磁気異方性：

磁化方向により磁気エネルギーが変化する性質。

### 垂直磁化容易・面内磁化容易：

薄膜磁性体の膜面垂直（膜面平行）方向がエネルギー的に安定な磁性体を垂直（面内）磁化容易磁性体と呼ぶ。