

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

# 博士論文審査結果報告書

## 論 文 題 目

Study on Spin-Transfer Torque Magnetic Tunnel Junction Modeling for Magnetic Memories and Spiking Neural Networks

申 請 者  
Haoyan LIU

情報生産システム工学専攻  
新機能メモリシステム研究

2023 年 10 月

セミコンダクタメモリは金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) の寸法縮小化 (スケールリング) に伴って集積度を向上させてきた。例えば、主記憶装置として使われているダイナミック・ランダム・アクセス・メモリ (DRAM) は電荷をキャパシタに蓄えることでデータを記憶しているが、キャパシタのスケールリングが困難になりつつあり、集積度の限界に達している。この状況を克服すべく、現在様々な新規メモリが提案され研究開発が活発化している。その中で、書き込みに対する耐性に優れている磁気トンネル接合 (MTJ) を使った記憶装置である磁気ランダム・アクセス・メモリ (MRAM) は DRAM に比べてスケールリングが容易であると考えられているために、将来の大容量主記憶装置の候補として期待が大きい。

MTJ は二つの強磁性体層で絶縁膜を挟んだものであり、一方の強磁性体層の磁気モーメントが他方よりも反転しやすい構造をしている。前者を自由層、後者を固定層と呼んでいる。自由層の磁気モーメントが固定層と平行になった状態 (平行状態) は反平行になった状態 (反平行状態) に比べて絶縁膜における電子のトンネル電流が大きいことを利用してデータを記憶する。自由層の磁気モーメントの方向をスイッチさせる方法として、スピン注入による方法が主流になっている。これは、電流を自由層から固定層に向かって流すことで反平行状態を平行状態に、電流を固定層から自由層へ流すことで平行状態を反平行状態にそれぞれスイッチさせるものである。この方式によりスイッチングさせる MTJ をスピン注入型 MTJ (STT-MTJ) と呼んでいる。

STT-MTJ はフォン・ノイマン型コンピュータの将来の記憶装置として有望であるのみならず、インメモリコンピューティング方式の記憶装置への応用においても期待が高まっている。インメモリコンピューティングとは記憶装置自体に計算機能を持たせることで、従来のフォン・ノイマン型コンピュータにおいて必要であった CPU とメモリ間のデータ移動をなくした計算機である。これはデータ中心型の計算において大幅な高速・低消費電力化が実現できるアーキテクチャであり、ニューラルネットワークにおける積和演算アクセラレータがその典型である。その中で、生物学的な脳の特徴を模倣したシステムとして、スパイクングニューラルネットワーク (SNN) のアクセラレータが注目されている。SNN は入力データを一定振幅のパルス列にエンコードし、パルス入力タイミングと頻度に基づいて増加・減少する内部変数がある閾値を超えると次段へパルスを発生させるイベント駆動型ニューラルネットワークである。

この研究は、大規模な STT-MTJ を用いた MRAM (STT-MRAM) および SNN を事実上の標準である回路シミュレータ SPICE を使って設計するために、計算精度が高く、しかも計算機負荷が小さい汎用のデバイスモデルを提供することを目的としている。STT-MTJ のモデル化において注意すべき点の一つは STT-MTJ のスイッチング動作が熱擾乱に非常に影響を受けやすいことである。従って、デバイスモデルを作る上での基礎となる方程式はブラウ

ン運動の方程式に類似の確率微分方程式となり、これを数値計算的に解くためには多くの計算機リソースが必要になる。従来の STT-MTJ デバイスモデルにおいて、計算負荷が大きい確率微分方程式を直接解く方式の他に、スイッチング確率の時間変化を追う以下の二つの異なるアプローチが採用されてきた。一つは、現象論的な確率表現を利用するもの、他は確率微分方程式に対応したフォッカー・プランク方程式を元にする方法である。しかしながら、この研究の目的を達成するためには、これらのアプローチにおいても以下に述べるようにいくつかの問題点がある。これらの問題点を解決する手法を提案することがこの研究の主題である。

前者（スイッチング確率に基づいたモデル）のアプローチの問題点は、STT-MTJ へ入力する電流が臨界電流よりも充分大きい極限あるいは充分小さい極限ではスイッチング確率を電流とスイッチング時間で表すことが可能であるが、入力電流が臨界電流付近の場合には適当な式が存在しないことである。そのために、高い計算精度を得ることが困難であった。この研究では、両極の表現を内挿して中間領域の表現を求める精度の高い手法を提案し、実験データと比較をしている。

後者（フォッカー・プランク方程式に基づいたモデル）のアプローチの問題点は、個別の MTJ デバイスについて、その自由層と固定層の磁気モーメント間の角度  $\theta$  の時間変化に関する情報の抽出が出来ていなかった点である。この研究では、特定のデバイスの  $\theta$  を時間の関数で表すことを可能にするアルゴリズムを提案している。この時間変化する  $\theta$  の抽出は第一原理の確率微分方程式を元にしたモデルでも可能ではあるが、この論文が提案するアルゴリズムによって、それよりも効率よく計算できることが示されている。また、このモデルを使った SPICE シミュレーションにより SNN の動作検証を行い、 $\theta$  の時間変動を使って SNN の Leaky integrate-and-fire (LIF) ニューロンの機能を確認することができた。

この論文は5つの章から構成されている。以下、各章ごとにその内容の概略を述べ、評価を加えることにする。

第一章“Introduction”では、MTJの動作原理、その技術的発展の歴史ならびにその基本的な物理的性質について概説している。また、熱擾乱の中で確率的にスイッチング動作を行う STT-MTJ 自由層の磁気モーメントの過渡的な振舞いを記述する確率微分方程式 stochastic Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski (s-LLGS) 方程式を基礎としたデバイスモデルを紹介し、その回路シミュレーションにおける限界を明らかにするとともに、この研究の動機ならびに提案について述べている。

第二章“Switching probability model”では、STT-MTJ への入力電流が臨界電流よりも充分大きい場合において良い近似で成り立つ Sun モデルと充分小さい場合に良い近似で成り立つ Neel-Brown モデルとを含むスイッチング確率モデルについて解説する。このモデルは入力電流が臨界電流に近い場

合には物理的なモデル式が存在せず、入力電流が臨界電流をまたいで変動するような回路動作において正確なシミュレーション結果が得られない問題があった。この章では、このような状況においても正確なスイッチング確率が計算できるモデルを提案している。このモデルから得られた STT-MTJ のスイッチング動作と実験データの比較を行いその精度を明らかにしている。

第三章 “Model based on Fokker-Planck equation” では、フォッカー・プランク方程式を有限差分法により解くことで正確な STT-MTJ の確率的スイッチング動作をモデル化した。このモデルは本来磁気モーメント間の角度  $\theta$  に関する確率密度分布関数の時間発展を与えるものであるが、個々の MTJ の  $\theta$  の時間発展に関する情報を得るために、累積確率分布の特定断面値を抽出するアルゴリズムを提案した。この方法によって、s-LLGS 方程式を解くよりも短時間に個々の MTJ の  $\theta$  に関する情報が得られることを示した。

第四章 “Model application to spiking neural networks” では、STT-MTJ を利用した SNN のニューロンを提案し、第三章で述べたフォッカー・プランク方程式を基にしたデバイスモデルを適用して実施した動作検証について説明している。このニューロンは信号発火後の内部状態リセット動作が自動的に行われる特徴を有し、小型で省エネルギーな SNN を実現できることが示されている。この提案によるニューロン・シナプス・エネルギーは 45nm テクノロジーにおいて 0.23pJ/SOP (SOP: synaptic operation) であり、従来提案されている SNN よりも同テクノロジーノード換算で省エネルギーであることが示された。

第五章 “Conclusions” では、この論文の研究成果を総括し結論を述べている。

以上がこの研究の成果で、これを要約すると、STT-MTJ の回路シミュレーション用デバイスモデルを異なる二つのアプローチにより提案し、その実用性と有益性を検証した点にある。すなわち、高精度な内挿法に基づいたスイッチング確率を基にしたモデルにおいて大規模なメモリ回路への応用への道を切り開いた。一方で、 $\theta$  の時間変動情報を抽出できるフォッカー・プランク方程式を基にしたモデルにおいて大規模 SNN シミュレーションへの適用を可能にした。これらの成果は STT-MTJ を用いたメモリとニューラルネットワークの開発に大きく貢献するものと言える。よって、この論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2023 年 9 月 13 日

審査員

主査	早稲田大学教授	博士(工学)(筑波大学)	大澤	隆
	早稲田大学准教授	博士(工学)(東京工業大学)	高畑	清人
	早稲田大学准教授	博士(理学)(東京大学)	池橋	民雄
	東北大学准教授	博士(情報科学)(東北大学)	夏井	雅典