

修士学位論文要約（令和4年3月）

学習スパイクニューラルネットワーク回路のための スピントロニクスデバイス数理モデルの構築

菊地 優志

指導教員：堀尾 喜彦

Mathematical Modeling of Spintronics Devices for Learning Spiking Neural Network Circuit and its Application to Networks

Yushi KIKUCHI

Supervisor: Yoshihiko HORIO

In recent years, there has been increasing interest in edge AI hardware that emphasizes reduction of communication costs and real-time performance. Since spintronics devices are low power consumption and small devices, they have a high affinity with edge hardware. In addition, spintronics devices have been confirmed to behave like neurons and synapses, which are the basic components of the brain, and are expected to be applied to neural network hardware. By utilizing spintronics devices, the development of neural network circuits will be more efficient. In this paper, the validity of the proposed formula is shown by describing it by the operation formula of the spintronics device for use in the neural network circuit and comparing the result of the numerical calculation with the experimental result. We also show that the proposed formula can be applied to a simple neural network by constructing a neural network based on the proposed formula.

1. はじめに

現在、ニューロンやシナプスに似た動作を行うスピントロニクスデバイスが開発されている¹⁾。このスピントロニクスデバイスは、デバイス固有の物理的性質により再現されるニューロンやシナプスの動作に加え、スピントロニクスデバイスのメモリ特性によって、シナプス荷重といった情報をデバイス単体で保持することができる。このようなデバイスを用いることで、学習ニューラルネットワーク回路の実装はより効率的になるほか、より小型で低消費電力のニューラルネットワーク回路が実装可能になると期待される。このデバイスを用いて学習ニューラルネットワーク回路を実装するためには、集積回路設計のためのモデルに加え、ネットワーク設計のためのモデルが必要になる。そこで、本研究では、これらのモデルを作成するために必要となる、スピントロニクスデバイスの動作を記述した数式を提案する。

2. スピントロニクスデバイスの構造とメカニズム

本研究では、図1に示す3端子SOT (spin-orbit-torque) デバイスと呼ばれるスピントロニクスデバイスをニューロン・シナプスデバイスとして用いる。図に示すように、スピントロニクスデバイスはチャンネル層、自由層、絶縁層、参照層の4つの層によって構成される。このうち、自由層と絶縁層は強磁性体であり、内部に磁区と呼ばれる磁気モーメントの方向が揃う領域が M 個存在する。参照層内の磁区の磁気モーメントは一つの

方向に揃っているが、自由層内の磁区の磁気モーメントは、磁区ごとに、参照層の磁化方向に対して平行な方向あるいは反平行な方向のいずれかを取る。以下では、平行な磁区の状態を状態 p 、反平行な磁区の状態を状態 ap と呼ぶ。T1—T3 間に電圧を印加した際に、絶縁層を流れるトンネル電流の大きさは、印加された電位と各磁区によって発生するトンネルコンダクタンスの大きさの和によって決まる。各磁区のトンネルコンダクタンスは磁区の状態によって決まり、状態 p の磁区のトンネルコンダクタンスは状態 ap の磁区よりも大きい。

自由層内の磁区の磁化状態は、T2—T3 間に電圧パルスを入力する際に発生するスピン軌道トルクによって変化する。また、デバイス温度が高くなるほど、磁区の磁化状態は変化しやすくなる。

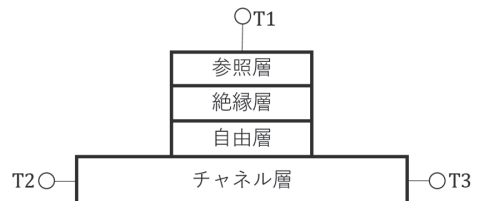


図1 3端子SOT (spin-orbit-torque) デバイス

3. スピントロニクスデバイスの数理モデル

本章では、三端子スピントロニクスデバイスの時刻 t におけるトンネルコンダクタンスの値 $g(t)$ を与える。

T2—T3 間に電圧 $V(t)$ が印加されたとき、チャネル層の電気抵抗からジュール熱が生じ、デバイス温度が上昇する。時刻 t におけるデバイス温度 $T(t)$ は以下のように記述される²⁾³⁾。

$$\tau_T \frac{dT(t)}{dt} = T_{\text{room}} - T(t) + KV^2(t) \quad (1)$$

τ_T は時定数、 T_{room} は室温、 K は比例定数である。

デバイス温度と入力電圧が決定されたことにより、 q 番目の磁区の状態 p および状態 ap へのネール緩和時間⁴⁾ $\tau_q^p(t)$ と $\tau_q^{ap}(t)$ を次のように求めることができる。

$$\tau_q^p(t) = \tau_0 \exp\left(\frac{E_b}{k_B T(t)} \left(1 - \frac{V(t)}{V_q^{sw0}}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$\tau_q^{ap}(t) = \tau_0 \exp\left(\frac{E_b}{k_B T(t)} \left(1 + \frac{V(t)}{V_q^{sw0}}\right)^2\right) \quad (3)$$

τ_0 は試行時間、 E_b はエネルギー障壁、 k_B はボルツマン定数、 V_q^{sw0} は q 番目磁区の磁化反転電圧である。

ここで、時刻 t に q 番目の磁区が状態 ap へ磁化反転する確率が q 番目の磁区が時刻 t に状態 p である確率 $P_q^p(t)$ に比例し、同様に、時刻 t に q 番目の磁区が状態 p へ磁化反転する確率が q 番目の磁区が時刻 t に状態 ap である確率 $1 - P_q^p(t)$ に比例すると仮定する。このとき、 $P_q^p(t)$ は次のように記述される

$$\frac{dP_q^p(t)}{dt} = \frac{1 - P_q^p(t)}{\tau_q^p(t)} - \frac{P_q^p(t)}{\tau_q^{ap}(t)} \quad (4)$$

これにより、時刻 t における各磁区の状態を数値計算によって求めることができる。

2章で述べたように、デバイス全体のトンネルコンダクタンスの大きさは、磁区ごとのトンネルコンダクタンスの大きさの総和で表すことができる。状態 p の磁区の数 $m^p(t)$ 、状態 ap の磁区の数 $m^{ap}(t)$ とおくと、デバイスのトンネルコンダクタンス $g(t)$ は、

$$g(t) = G^p m^p(t) + G^{ap} m^{ap}(t) \quad (5)$$

ここで、 G^p は状態 p の磁区がもつトンネルコンダクタンスの値の平均値、 G^{ap} は状態 ap の磁区が持つトンネルコンダクタンスの値の平均値である。ただし、これらの値を直接測定することは困難である。そこで、 $m^p(t) = M$ のときのトンネルコンダクタンスの値、つまりデバイスのトンネルコンダクタンスの最大値 G_{MAX} と $m^p(t) = 0$ のときのトンネルコンダクタンスの値、つまりデバイスのトンネルコンダクタンスの最小値 G_{MIN} を

用いて、以下のように変形する。

$$g(t) = G_{\text{MIN}} + (G_{\text{MAX}} - G_{\text{MIN}}) \frac{m^p(t)}{M} \quad (6)$$

以上の(1)–(6)式より、スピントロニクスデバイスのトンネルコンダクタンスを数式によって記述することができた。

4. まとめ

本研究ではスピントロニクスデバイスをニューラルネットワーク回路へと応用可能とするために、スピントロニクスデバイスのトンネルコンダクタンスの値を数式によって記述した。

今後の研究では、今回作成した記述式をもとに、スピントロニクスデバイス集積回路設計のための回路モデルおよび、スピントロニクスデバイスを用いたニューラルネットワーク設計のためのスピントロニクスニューロン・シナプスモデルを作成する。また、作成したこれらのモデルをもとに、スピントロニクスニューラルネットワーク回路を実装する。

文献

- 1) A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, and H. Ohno, “Artificial neuron and synapse realized in an antiferromagnet/ferromagnet heterostructure using dynamics of spin-orbit torque switching,” *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 23, p. 1900636, 2019.
- 2) 菊地優志, 佐藤拓, A. Kurenkov, 堀尾喜彦, 深見俊輔, “熱ダイナミクスを利用したスピントロニクスニューロンデバイスの数理モデル,” 電子情報通信学会技術報告, vol. 119, no. 381, NLP2019–104, pp. 99–104, 2020.
- 3) Y. Kikuchi, Y. Horio, A. Kurenkov, S. Fukami, “Mathematical modeling of neuron/synapse-like spintronics devices,” in *Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications*, pp. 77–80, online, Nov. 16–19, 2020.
- 4) L. Néel, “Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites,” *Ann. Géophys.* 5, 99–136 (1949) (in French); an English translation is available in *Selected Works of Louis Néel*, edited by N. Kurti (Gordon and Breach, New York, 1988, ISBN 2881243002), pp. 407–427.