

ニューラルネットワークハードウェアにおける抵抗変化型メモリの積極的利用に関する一考察

～ホップフィールドネットワークを例にとって～

赤穂伸雄 浅井哲也 雨宮好仁

北海道大学 大学院情報科学研究科

近年、デジタルメモリの大容量化を目指した抵抗変化型記憶デバイス (ReRAM) の研究が盛んに行われている[1]。この素子は電気的には抵抗素子であるが、その抵抗値の書き換え (記憶) は可能である。ニューラルネットワークハードウェアにおいてニューロン回路間を結合するシナプス回路は通常は抵抗素子で構成されるが、その抵抗値は学習に応じて書き換える必要がある。従来の抵抗素子の代わりに ReRAM を用いれば、より直接的にシナプスの役割を果たせそうである。現在、ReRAM 構造を用いた基本的なシナプスデバイス (シナプス単体) に関する研究報告 [2]があるものの、それらを多数組み合わせさせたネットワーク規模の回路に関する報告はされていない。そこで本研究では一例として「ホップフィールドニューラルネットワーク」を取り上げ、ReRAM を用いてネットワークを組む方法、およびその問題点について考察する。

本研究の対象とする ReRAM (ユニポーラ型) は酸化薄膜を金属で挟んだ構造を持つ (図 1)。この ReRAM の金属端子間は初期状態では絶縁されている。この金属端子間に高い電圧をかけると端子間にフィラメントと呼ばれる電流パスが形成され、絶縁状態から抵抗状態に変化すると考えられている (この状態変化時の電流の大きさによって記憶する抵抗値が決まる)。さらに電流を流すとフィラメントが切れ、絶縁状態に戻ると考えられている [1]。

上記の ReRAM を用いた相互結合ネットワークの構成案を図 2 に示す。酸化薄膜を金属配線のクロスバーで挟む事により、各交差点に ReRAM を構成する。上層、下層の金属配線をそれぞれ軸索、樹状突起ラインとすれば、各交差点の ReRAM はシナプスとなる。このデバイス構造を用いてホップフィールドニューラルネットワークを構成する。ただし、簡単のためニューロン間の結合重みは 2 値 (± 1) とする。負の重みをニューロン出力の -1 倍で表現すると、各ニューロンに対して軸索ラインが二つ必要になる。また、離散時間と連続時間動作の両方を評価する。

ホップフィールドネットワークのハードウェアを構成する場合、電圧または電流モードの回路構成が考えられる。まず、ニューロンの入出力を電圧で表す「電圧モード」の構成を考える。ニューロンの入力はアナログ電圧で表され、その出力はアナログ電圧を 2 値化した電圧となる (その動作のためにコンパレータを用いる)。その電圧を負荷 (=ReRAM) に与えるためにオペアンプを用いる。離散時間動作ではニューロン出力をフリップフロップに蓄え、連続時間動作では ReRAM のシナプス後電流をキャパシタで積分する (表 1 左)。ただし、ReRAM の抵抗値が低い場合はシナプスに大電流が流れるため、消費電力は大きいと予想される。次に、ニューロンの入出力を電流で表す「電流モード」の構成を考える。各 ReRAM に流れる電流は、「軸索ライン-樹状突起ライン間電圧」と「ReRAM の抵抗値 (結合重み)」によって決まる。よって「軸索ライン-樹状突起ライン間電圧」が等しくなるように、各ニューロンの入力電位 (樹状突起ライン) 電圧を等しくする必要がある。ここで、抵抗状態にある ReRAM (シナプス) に流れる電流は「軸索ラインに流す電流」を「同じ軸索ラインに接続された抵抗状態にある ReRAM の数」で割った値となる。よって同じ軸索ラインに接続された抵抗状態にある ReRAM の数が違うと、別々の ReRAM に同じ接続重み (抵抗値) を設定していても違う電流が流れてしまう。これによって結合が意図した値と異なると、ネットワークの記憶容量が落ちる可能性がある。電流モードでは、ニューロンの入力はアナログ電流で表される。離散時間動作では入力のアナログ電流を電流コンパレータで 2 値の電圧に変換し、フリップフロップに保持する (表 1 右上)。連続時間動作では膜電位に相当する電流を保持するためキャパシタを用い、キャパシタの電圧をコンパレータで 2 値に変換する (表 1 右下)。ただし入力電位を一定にするための電流ホロアが必要となる (表 1 右下)。電流モードにおけるニューロンの出力はアナログ電流を 2 値化した電流となるため、2 値化した電圧を MOSFET で構成した V-I 変換器で 2 値化した電流に変換する (表 1 右)。電流モードではシナプスに流れる電流の総量を V-I 変換器から出る電流で決める事ができるため、消費電力を抑える事ができる。

図 2 に示す ReRAM のクロスバー構造では、ある特定の ReRAM (シナプス) の抵抗値を書き換えるために工夫が必要である (多数の ReRAM が軸索、樹状突起ラインを共有しているため、所望の ReRAM 以外の ReRAM の抵抗値も書きかわってしまう恐れがある)。この問題はアーキテクチャ上の工夫 (ReRAM の 3 端子化等) により解決出来る可能性がある。

表 1 ニューロン回路の実装例

	電圧モード	電流モード
離散時間動作		
連続時間動作		

参考文献

- [1] A. Sawa, "Resistive switching in transition metal oxides," Materials Today, vol. 11, no. 6, pp. 28-36, 2008.
- [2] Y. Sasago, M. Terao, M. Kinoshita, K. Ono, K. Kurotsuchi, R. Takemura, Y. Fujisaki, and N. Takaura, "Resistive switching solid state brain neocortex-like device for advanced non-volatile logic applications," Proceedings of the 214th ECS Meeting, Abs# 2116, 2008.

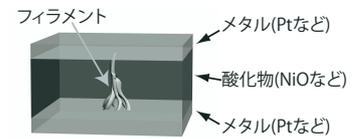


図 1 ユニポーラ ReRAM の模式図

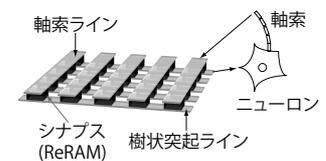


図 2 相互結合ニューラルネットの構成案