## ドナー密度分布制御型メモリスタ素子における抵抗変化機構の 有限要素法シミュレーション

Finite Element Analysis of Resistive Switching Characteristics in Memristive Devices

## 阪大院基礎工 <sup>0</sup>永田善也, 藤平哲也, 酒井 朗

Osaka Univ. °Zenya Nagata, Tetsuya Tohei, Akira Sakai

## E-mail: sakai@ee.es.osaka-u.ac.jp

**背景**:脳神経回路を模したアルゴリズムの開発により人工知能技術が大きく発展した。一方で、これ らソフトウェア実装に止まらず、脳型コンピュータのハードウェア実装に大きな期待が寄せられてい る。脳神経回路のシナプスの役割を模倣可能な受動素子として、メモリスタが注目されている。メモ リスタはその抵抗変化特性により、単一素子でシナプス間結合強度変化(シナプス可塑性)を模倣す ることができる。一方で、シナプスは介在シナプスからの作用に由来する異シナプス可塑性など、よ り高度な機能を持ち、学習効率・忘却効率の変調や連合学習などの高次脳機能を可能としている。メ モリスタの抵抗変化メカニズムに関しては、Strukov らによってキャリア及びドーパントイオンのドリ フト・拡散による1次元モデルが提唱されている[1]。我々は、これまでに還元 TiO<sub>2</sub>結晶を用いた独自 の4端子構造を持つメモリスタ素子を開発してきた[2]。本研究では、対向2端子でもう1対の対向2 端子間の酸素空孔密度分布を制御することで、(擬)2次元的な酸素空孔分布の変化をもたらし、介在 シナプスからの作用によるシナプス間結合強度変化である異シナプス可塑性をはじめとする高度シナ プス機能の模倣を実証した。また、二次元平面型端子デバイスの抵抗変化特性の理論的解析を目的と して、Strukov の1次元抵抗変化モデルを発展させた、二次元有限要素法シミュレーションモデルを構 築し、実験で観測された酸素空孔分布と抵抗変化挙動を再現することに成功した。

実験方法:シミュレーションでは、キャリアのドリフト・拡散を考慮した定常状態でのキャリア(電子・正孔)連続式(1)及び、ポアソン方程式(2)をニュートン法で解き、酸素空孔のドリフト・拡散を考慮した連続式(4)をクーラン条件[3]の下で解くことで、ドナー密度分布N<sub>D</sub>(x,y)を求める。これら(1)(2) 及び、(3)を再帰的に解くことで、特定の電圧印加条件下でのドナー密度分布変化を評価した。

$$\nabla \cdot (-en(x, y)\mu_n \nabla \varphi_n(x, y)) = 0 \quad \nabla \cdot (-ep(x, y)\mu_p \nabla \varphi_p(x, y)) = 0 \tag{1}$$

$$-\varepsilon\Delta\varphi(x,y) = e(p(x,y) - n(x,y) + N_D(x,y) - N_A)$$
<sup>(2)</sup>

$$\frac{\delta N_D(x,y)}{\delta t} = \nabla \cdot (D_i \nabla N_D(x,y) - N_D(x,y)u_i \nabla \varphi(x,y))$$
(3)

**実験結果**: 図 1(a)(d)はそれぞれ端子 2,4 への正及び負電圧印加後の光学顕微鏡像 である。また、図 1(a)及び(d)と同じ電圧印 加条件でのドナー密度分布及び端子 1-3 間 電流密度分布のシミュレーション結果が (b)(c)および(e)(f)である。図 1(a)(b)及び (d)(e)を比較することにより、光学顕微鏡 像で見られる酸素空孔分布(電気着色現象 による暗領域)が本シミュレーションによ り良く再現されていることがわかる。ま た、実験による電気測定において図 1(a)及 び(b)の端子 1-3 間抵抗値がそれぞれ150

Ω及び230 Ωと求められた。この結果と、

SN = (x, y)



Fig. 1. Comparison of simulation and experimental result. (a)(d) Optical microscope image, (b)(c)(e)(f) Simulation result.

図 1(c)(f)のシミュレーション結果が整合することから、端子 2,4 への正(負) 電圧印加により端子 1-3 間が低抵抗化(高抵抗化)する挙動が再現できていることがわかった。

謝辞:本研究は、JSPS 科研費 JP17H03236、 JP17K18881 の助成を得て行われた。

[1] D. Strukov *et al*, small 5, 1058, 2009.

[2] S. Takeuchi et al., Sci. Rep. 9, 2601(2019).

[3] R. Courant et al., IBM J. Res. Dev, 11, 215, 1967.