

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310107

研究課題名(和文)原子移動型素子を用いたニューロン動作に関する研究

研究課題名(英文)Neuron operation using atom movement controlled devices

## 研究代表者

長谷川 剛 (Hasegawa, Tsuyoshi)

独立行政法人物質・材料研究機構・その他部局等・その他

研究者番号：50354345

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子/イオンの移動とその酸化・還元反応を制御して動作する原子移動型素子を基盤技術として用い、脳型コンピューターを実現する上で不可欠なニューロン動作素子の開発を目指した。その結果、ニューロン動作を特徴づける3つの基本現象、「入力信号の蓄積」、「発火」、「発火後の自己減衰」の実現に成功した。今後、シナプス動作素子との集積化を行うことで、本成果が脳型コンピューターの実現に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The research was aimed developing a device working as a neuron which is indispensable in developing neuromorphic computing systems. In the research, technology of an atom movement-controlled device, which operates by controlling atom/ion movement and their reduction/oxidation reaction, was used. As a result, all three characteristic phenomena of a neuron, i.e., 'storing information without any output', 'firing' and 'self-depressing', were successfully demonstrated. Integration of the neuronal devices developed in this study and synaptic devices will contribute in realizing neuromorphic systems.

研究分野：ナノサイエンス

キーワード：ナノ電子デバイス 原子スイッチ ニューロン

1. 研究開始当初の背景

(1)スーパーコンピュータ「京」の開発にも象徴されるように、現在のノイマン型コンピュータの特徴は、膨大な数の演算を一瞬で実行できることにある。例えば、将棋やチェスの試合では、コンピュータは次の一手のみならず、その後の可能な展開を一瞬で計算し尽くすことが可能である。そして、過去のデータとの比較から最適な一手を打つ。コンピュータの高性能化に伴い、最近では、チェスの王者や将棋の女流王将がコンピュータに負ける事態も報道されている。

(2)一方、一瞬であらゆる手を計算し尽くしてしまうコンピュータと人間が対等に渡り合えるのは人間の脳は必要な情報のみを記憶し、無意識のうちにその記憶に基づく「直感」で判断しているからだと考えられている。人間の脳は情報の入力頻度が高いほど確実に記憶し、逆に入力頻度が低ければ曖昧な記憶しか形成されずに忘却する。情報の重み付けを行うことで過去の経験を蓄積し、新たな判断に利用しているのである。この点は、予めプログラムされた通りの判断しかできないノイマン型コンピュータとは対称的である。

(3)脳型コンピュータが開発できれば、複雑な情報処理を極めて小さな消費電力で実行できることになる。この実現のため、脳型コンピュータを構成するために必要な要素技術の開発が盛んになっていた。例えば、人間の脳においては、シナプスは入力信号履歴に応じて結合荷重を変化、ニューロンへの入力信号強度を調整する。ニューロンはシナプスを介して入力される信号を蓄積し、その信号が一定の条件(値)に達すると「発火」する。図1に、その模式図を示す。従来、これらの機能はアナログ素子やCMOS素子からなる電子回路によって実現されてきたが、最近になって、抵抗変化素子のいくつかは単体でシナプス動作をすることが分かってきた。

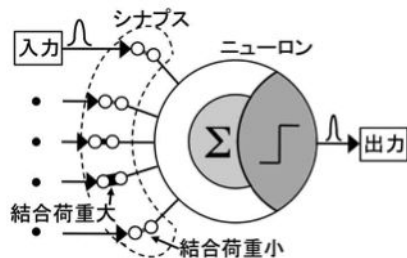


図1 ニューロンとシナプスの模式図

2. 研究の目的

シナプスの動作は単体素子で実現されたが、ニューロンの動作は単体素子では未だ実現されていない。この理由は、ニューロン動作には、1) 出力を変えることなく入力信号の情報を蓄える機能と、2) 増幅(発火)機能が必要であるが、この双方の機能を備えた単

体素子の開発が難しいことにある。本研究では、応募者が開発を進めている原子移動型3端子素子「アトムトランジスタ」の技術を活用して、この双方の機能を単体素子で実現することを目的としている。図2に、アトムトランジスタの動作模式図を示す。

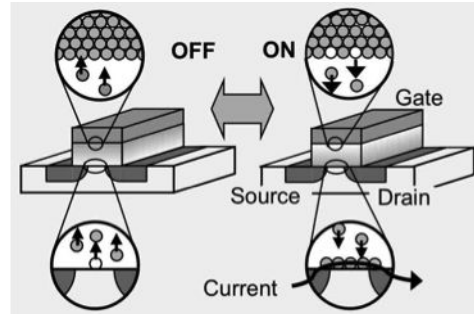


図2 アトムトランジスタの動作模式図

3. 研究の方法

(1)本研究では、ゲート電極から絶縁体材料中へ注入した金属イオンの量とその分布を変数として、入力情報(ゲート電極への印加履歴)を素子内部に蓄積する手法を開発する。金属イオンの濃度が一定の値に達するまではソース・ドレイン間の伝導度が変化しない材料系を探索することで、ニューロン動作の特徴である「発火」現象を単体素子で実現する。電圧パルスを入力信号に見立てて、ニューロン動作における入力頻度依存性などを評価する。

(2)信号蓄積機能の開発では、金属イオン濃度が一定の値に達するまでは絶縁性を示し、一定の値に達した瞬間に高い電子伝導度を示す材料系の探索を行う。例えば、アトムトランジスタの材料としても用いている酸化タンタルが金属イオン濃度を変数として電子伝導度をステップ関数的に変化させるか、注入した金属イオンの分布が印加中のゲート電圧のみならず、過去のゲート電圧の印加履歴にも依存するかを検証する。図3に本研究で期待する動作の模式図を示す。ゲート電極から注入された金属イオンの濃度が一定の値に達するまでは、ソース・ドレイン電極間は絶縁されている。しかし、ゲート電圧の印加履歴は、注入金属イオン量とその分布として蓄積される。ソース・ドレイン電極近傍の金属イオン濃度が一定の値に達すると、伝導経路が形成される(d)。

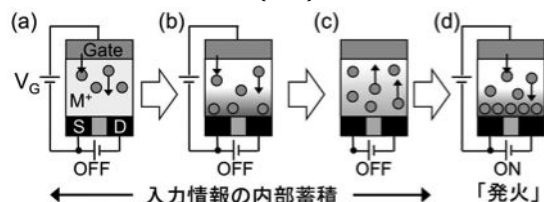


図3 金属イオンによる入力情報の内部蓄積

なお、ゲート電圧の印加を止めると内部拡散による金属イオンの再分布が起こる(c)と期待できるので、ゲート電圧の印加履歴にもこの動作は依存するはずである。

(2)一方、「出力後の自己減衰」を単体素子で実現することは難しい。CMOS回路による従来のニューロンでも、フィードバック回路による出力の停止が行われている。本研究では、発火信号の出力に際してソース・ドレイン間に流れる電流による伝導経路の自己切断を試みる。図4に、ジュール熱を利用した方法の模式図を示す。

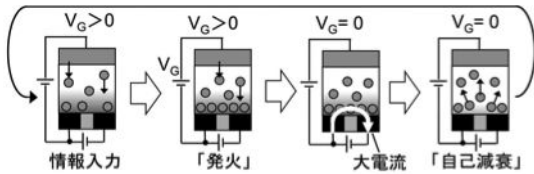


図4 ジュール熱を利用した自己減衰

#### 4. 研究成果

(1)本研究では、イオン拡散層として酸化タンタルを、金属イオンとして銀を用いて、原子移動制御型3端子素子を作製し、以下の実験を行った。

(2)入力情報の内部蓄積と発火現象：出力を変えなく入力情報の内部蓄積が可能であるか否かを検証するため、一定のゲート電圧を印加し続けることで、ソース・ドレイン電極間の抵抗が変化するか否かを計測した。電圧印加に伴ってソース・ドレイン電極間の抵抗が僅かであっても直ちに变化してしまえば、外部出力があったと判断される。実験の結果、作製直後の初期状態にある素子では、数V程度の電圧を印加しても出力に変化が現れないこと、印加を続けることで初めて、ソース・ドレイン電極間の抵抗に変化が現れることが分かった。これは、酸化タンタルをイオン拡散層として用いたアトムトランジスタ構造が、出力を変えなく入力情報を内部蓄積していることを示唆していた。

次に、電圧走査を繰り返すことで、入力信号が散発的に来る場合を模した実験を行った。図5に、測定結果を示す。実験では、ゲート電圧を0Vと0.9Vの間で繰り返し走査した。この間、ソース・ドレイン電極間に1mVの電圧を印加して、ソース・ドレイン電極間に流れる電流値を計測した。その結果、8回目の走査まではソース・ドレイン電極間の電流は測定限界以下(ノイズレベル)であったが、9回目の走査の途中でソース・ドレイン電極間電流が1ナノアンペアに増大した。これは、酸化タンタル中に供給された銀イオンの濃度が過飽和に達して核形成が起こり、ソース・ドレイン電極間に伝導経路が形成されたことを意味する。すなわち、8回目の入力に

ついては、出力を変えなくその入力情報を蓄積し、9回目にして出力が変化した(発火した)ことになる。

以上の実験結果から、原子移動制御型3端子素子を用いれば、入力信号の内部蓄積と一定条件に達することでの発火現象の再現が可能であることが分かった。

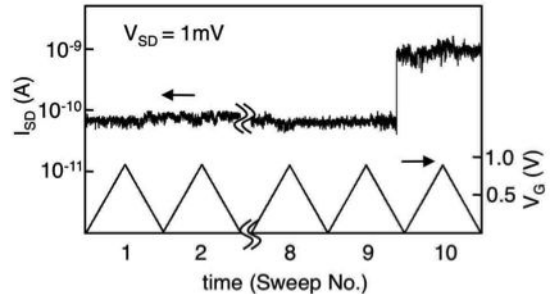


図5 電圧走査による発火現象の再現

(3)発火後の自己減衰：前述の実験では、ジュール熱による伝導経路の溶融・切断には至らなかった。この原因は、ソース・ドレイン間に印加した電圧が1mVと小さく、形成された伝導経路を流れる電流も小さいためであると考えられた。

ジュール熱を利用した発火後の自己減衰が可能であるか否かを検証するため、続いて、ソース・ドレイン電極間の電圧を大きくして実験を行った。しかしながら、今度は、発火現象を誘起するに至らなかった。この原因は、酸化タンタル中における銀イオンの分布は電位の関数であること、ソース・ドレイン電極間に大きな電圧を印加すると、ソース・ドレイン電極間の電位分布が非対称となってしまうこと、そのためにソース・ドレイン電極間において銀イオンの過飽和状態を実現することが出来なかったものと思われた。以上の実験結果を基に、伝導経路が形成された素子に対してソース・ドレイン電極間に大きな電圧を印加することでジュール熱を発生させる実験を行った。その結果を図6に示す。ソース・ドレイン電極間電圧を9Vまで走査することで、伝導経路の消滅に成功した。このことから、原理的には、ジュール熱による伝導経路の消滅(発火後の自己減衰)が可能であることが分かった。

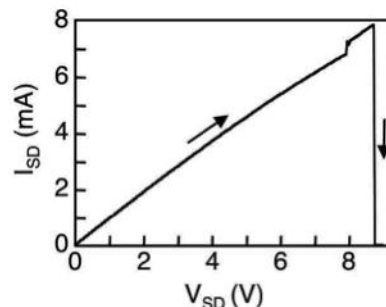


図6 電圧走査による自己減衰の実現

(4) 想起回路：本研究では、ニューロン動作における物理・化学現象の解明を目的として、2端子素子を用いた研究も平行して進めた。具体的には、イオン伝導体のモデル材料である硫化銀を素子主要部材として用い、入力と出力の関係を入力信号（電圧の大きさ）の関数として計測した結果、数十ミリボルトの小さな電圧を数分程度印加（初期化）することで、その後の素子動作に特異な現象が現れることを見いだした。すなわち、印加する電圧が概ね3V以下の場合には揮発性の動作を、3V以上の場合には不揮発性の動作をすることが分かった。初期化を行った素子でのみ観察されるこの現象を用いることで、いわゆる想起メモリを実現できる可能性があることも分かった。図7にその観測結果を示す。

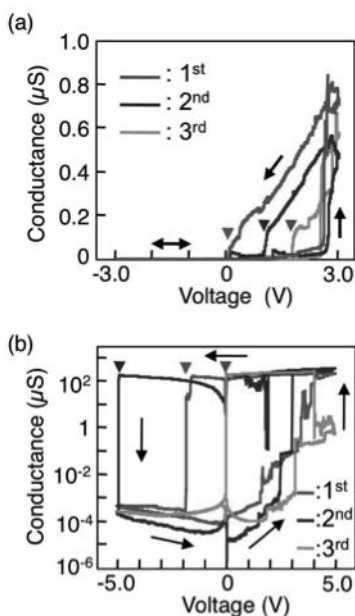


図7 (a)揮発性, (b)不揮発性動作

人間の脳では、この想起現象（過去の情報や経験が、特定の条件によって突然想起起こされること）はニューロン動作によって実現されていると考えられている。当初予想しなかった本研究成果は、従来素子では実現し得ない機能の発見であり、ニューロン動作を原子移動型素子で実現することで、新しい脳型コンピューターの開発に繋がる可能性があることを示唆している。本研究の重要な成果の一つであると考えられる。

(5) まとめ：以上の実験結果は、原子移動制御型3端子素子を用いることで、「入力信号の内部蓄積」と「一定の条件に達した時点での出力（発火）」現象を再現できること、「ジュール熱による発火後の出力の自己減衰」が可能であることを示している。本研究期間中に、これらの現象を一連の動作として実現するまでには至らなかったが、素子構造に非対称性を導入することなどで、連続した動作と

して実現できるものと考えている。今後、その実証に向けて研究を続けていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2件)

日野貴美、長谷川剛、田中啓文、鶴岡徹、小川琢治、青野正和、Influence of Atmosphere on Photo-Assisted Atomic Switch Operations、Key Engineering Materials、査読有、596巻、2014、116-120。DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.596.

116

日野貴美、長谷川剛、田中啓文、鶴岡徹、寺部一弥、小川琢治、青野正和、Volatile and nonvolatile selective switching of a photo-assisted initialized atomic switch、NANOTECHNOLOGY、査読有、24巻 38号、2013、384006-1-7

DOI:10.1088/0957-4484/24/38/384006

〔学会発表〕(計 18件)

長谷川剛、青野正和、Novel functions achieved by atom/ion movement controlled devices、CIMTEC2014、平成26年6月15日、モンテカティーニテルメ(イタリア)。

長谷川剛、Volatile and nonvolatile selective operation of a two-terminal gap-type atomic switch、ISCAS2014、平成26年6月4日、メルボルン(オーストラリア)。

長谷川剛、Emerging devices for Neuromorphic architecture、ERD/ERM Joint Workshop、平成25年12月3日、国際会議場(つくば市)。

長谷川剛、Synaptic operation by a gap-type atomic switch、MemCo Workshop - Memristors for Computing、平成24年11月20日、Frejus(フランス)。

長谷川剛、電気化学素子とその脳型コンピューティングへの応用、ポストSi スケーリング材料・デバイス技術分科会委員会、平成24年9月18日、JEITA(東京都)。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川剛 (HASEGAWA TSUYOSHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究者  
研究者番号：50354345