

令和 2 年 5 月 23 日現在

機関番号：17501

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0181

研究課題名（和文）電気化学材料が創る新しい知能情報処理デバイス（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Novel intelligent information processing devices created by electrochemical materials(Fostering Joint International Research)

研究代表者

大野 武雄（Ohno, Takeo）

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：90447144

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,100,000円

渡航期間： 4ヶ月

研究成果の概要（和文）：従来までシリコントランジスタを用いて開発されてきた知能情報処理デバイス・システムのさらなる高性能化を行うためにイオン伝導体を用いた人工知能の研究が注目されている。本研究では、硫化銀およびタンタル酸化膜などのイオン伝導体が適用された人工シナプスデバイスを複数個用いたシステムを構築し、その動作検証を行った。その結果、イオン伝導体の膜密度、組成などの違いがシナプス回路の応答特性に影響を与えることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、人工知能や深層学習の技術は身近になりつつあり、例えば検索エンジンや顔認証などの分野で実用化されている。この分野で重要であるのは基本的にはコンピュータであるが、従来までは伝統的なシリコントランジスタが用いられてきた。最近、より高機能で高速な情報処理を行うために、生物シナプスやニューロンの動作を取り入れる取り組みが試みられている。本研究課題は、この分野では新しい材料となるイオン伝導体を用いて知能情報処理デバイス・システムを構築し、人工知能や深層学習の分野で新しい基礎技術を確立するという意義があり、加えて、将来の新たな社会や産業の創成にも貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the performance of intelligent information processing devices and systems that have been developed using silicon transistors, research on artificial intelligence using ionic conductors has attracted much attention. In this study, a system using several artificial synaptic devices with ionic conductors, such as silver sulfide and tantalum oxide films, have been constructed and verified their operation. It was confirmed that differences in film density and composition of ionic conductors affect the response characteristics of the synaptic circuit.

研究分野：工学

キーワード：知能機械 知能情報処理システム イオン伝導体

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、人工知能（アーティフィシャルインテリジェンス、AI）や深層学習（ディープラーニング）の技術は情報処理の分野において極めて注目されている。人工知能や深層学習を実行するためには基本的にはコンピュータが必要であるが、コンピュータのうちで最も重要な部品はシリコン半導体で作製されるトランジスタである。トランジスタはいわゆる“0”と“1”を用いて演算など様々な情報処理を行っている。人工知能や深層学習の分野では、従来までの演算方法を駆使して各種機能を実行する研究が進んでいる一方で、より高機能で高速な情報処理を行うために、生物学におけるシナプスやニューロンの動作模倣を取り入れる取り組みも試みられている。しかしながら現状、それらの動作模倣についても主にトランジスタ、回路設計およびプログラミングが用いられ、基本的にはデジタル回路設計に依存している。

(2) このような状況の中、研究代表者は従来までの知能情報処理デバイスとは構成材料そして動作原理が全面的に異なる“無機シナプス”の現象を報告した（引用文献）。このシナプス模倣動作の特徴は、電気化学材料中のイオンと原子の移動を利用してシナプス特性をうまく再現できる、入力電気信号の演算（判定）とその記憶の両方を同時に行える、回路設計やプログラミングが必要無きこと、などが挙げられる。この無機シナプスの構造は、日本発のデバイスである“原子スイッチ”をベースにしている（引用文献）。

(3) 本研究課題で実現する電気化学材料であるイオン伝導体を用いた知能情報処理デバイスシステムはアナログ的動作が可能である。これは、従来までの“0”と“1”を用いたデジタル情報処理とは異なる概念で、ノイマン型アーキテクチャとはその動作が大きく異なる。ノイマン型のボトルネックを打破する可能性を秘めた基本デバイスシステムを提案することは、学術的に重要であるだけでなく、将来の新たな社会や産業の創成にも貢献できると考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、研究代表者が発見したイオンと原子の酸化還元反応に基づいて動作する新規な人工シナプスデバイスについて、単一デバイスから複数個のデバイス数に増やしたシステムへの展開を考える。知能情報処理デバイスにとって新しい材料となるイオン伝導体を用いて生物の神経回路の重要な構成要素であるシナプスおよびニューロンの動作の再現を試み、その構造に関する信号応答の様子を調査することで、アナログ的な情報処理実現の可能性を探索する。この目標が達成されれば、電気化学材料ベースの知能情報処理システム構築への足掛かりが作られ、非ノイマン型アーキテクチャについて実デバイスレベルでの可能性を示すことができると考えられる。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、知能情報処理デバイスを構築するための材料としてイオン伝導体を二種類用いた。一つ目は、イオン・電子混合伝導体である硫化銀を研究対象とした。イオン・電子混合伝導体というのは名前の通り、イオンおよび電子が伝導する材料である。この材料に電圧を印加すると、材料中で電子の移動と金属イオンの泳動が生じ、電気化学反応によって材料内部あるいはその外部に金属フィラメントが形成される。この金属フィラメントには分かりやすく言えば寿命があり、一時的に形成されたり、あるいは長期間形成されている状態を保持することが可能である。この現象をシナプス結合の可塑性の特性再現に利用した。二つ目は、タンタル酸化膜という金属酸化膜を研究対象とした。一般的には、金属酸化膜はイオン伝導体ではないが、その膜の厚さを十分小さくすることでその内部を比較的高速にイオンが移動することが知られている。そのため、薄いタンタル酸化膜はイオン伝導体として働くことが可能である。

(2) 複数個の無機シナプスを配置するために必要なクロスバー構造を金属電極パターンニングによって作製した。シナプス動作を再現するための実験系やデバイス構造として、硫化銀と対向金属電極との間にトンネル電流が流れる程度の数ナノメートルの空気ギャップをもつ構成を用いた。加えて、数ナノメートル厚さのタンタル酸化膜を二種類の金属電極で挟みこんだ構造も検討した。これらの構造を構築するために、電子線描画装置によるリソグラフィ技術、スパッタリング法などの各種薄膜成膜法、タンタル酸化膜の膜質調整のための酸素プラズマ照射技術を適用した。

(3) 試作したデバイスの動作確認には半導体パラメータアナライザを用いて電気信号を入力し、その際の応答を電流値または電圧値でモニタすることを基本とした。デバイスはウェハ上に形成し、マニュアルプローバを用いてデバイス電極にアクセスした。

## 4. 研究成果

(1) 無機シナプス構造中にあるイオン伝導体において、金属酸化物のイオン伝導体の膜密度に着目してデバイス構造を試作し、その電気特性の評価を行った。タンタル酸化膜を形成したのちに酸素プラズマを照射してタンタル酸化膜の密度を調整した。その結果、タンタル酸化膜

の膜密度が低いほどデバイスの動作しきい値電圧が低く、密度が高いほどしきい値電圧が高いことが確認された。膜密度が低いほど金属イオンの酸化膜中の泳動が促進されることが予想される。これらの結果から、デバイス構造はそのままにシナプス・ニューロン特性の調整を可能にすることが示された。実際に、同一のデバイスにおいて、揮発および不揮発なスイッチ特性が得られることを確認した。これまで金属酸化膜の膜密度に関してはいくつかの報告例があるが、デバイスの使用開始時に必要なフォーミング電圧に関する結果の報告が主であり、一方で本研究では膜密度が連続スイッチング特性に影響するという結果を得られた。加えて、硫化銀を用いた無機シナプスデバイスの材料特性に関する調査も行った。硫化銀の形成温度を変化させた場合に電気的特性の差異が大きく現れた。具体的には、200℃以下で形成した時のオフ抵抗値が数百MΩ、200℃以上で形成した時は数十kΩであった。この原因は硫化銀の相と相の違いにあると考えられる。これらの結果は外国機関であるドイツ・RWTH Aachen Universityの研究者との共同研究によって得られた。

(2) 複数個の無機シナプスを配置するために必要なクロスバー構造の形成を目的としたナノファブリケーション技術の構築を行った。クロスバー構造の利点はデバイス配置の密度を高くすることができ、加えて、デバイスにアクセスするための電極の総数を減らすことが可能であることである。電子線リソグラフィ技術を用いて下部および上部電極を100nm幅で構築し、無機シナプスデバイス数を100個配置した構造を作製した(図1)。この構造に電圧印加を行って信号入力し、複数のデバイスが同時に動作可能であることを確認した。しかしながら、当初目的である単一シナプスデバイスを複数個接続したときと一つだけ接続したときの動作の違いを発生させることが比較的困難であった。

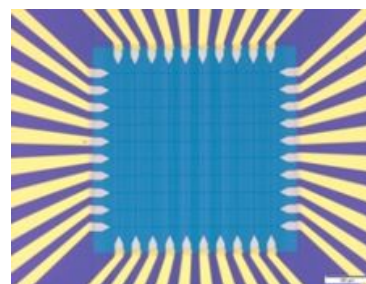


図1 10×10クロスバー構造

(3) 上記クロスバー構造を用いずに無機シナプスを複数個組み込んだ回路を形成するために、樹枝状形状をした回路中に無機シナプスを構築する実験を行った。硫化銀のワイヤーを複数本用意し(図2)、それらをランダムに重なるように配置すれば、それらの交点はスイッチつまり無機シナプス一つに対応する。この構造における電流-電圧特性を調査すると、電気信号を入力する回数によって硫化銀ワイヤーネットワークのシナプス結合強度が徐々に変化した(図3)。このようなアナログ的特性はこれまで主に単一デバイスにて得られているが、本研究で作製した複数個のデバイスを接続した状態から結合強度の変化出力が得られている点が興味深い結果となった。これらの結果は外国機関であるアメリカ・University of California, Los Angelesの研究者との共同研究によって得られた。

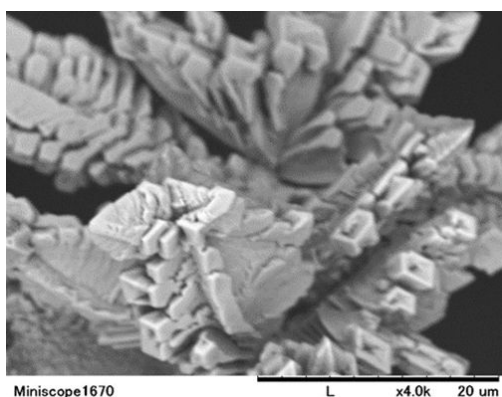


図2 硫化銀のワイヤー構造

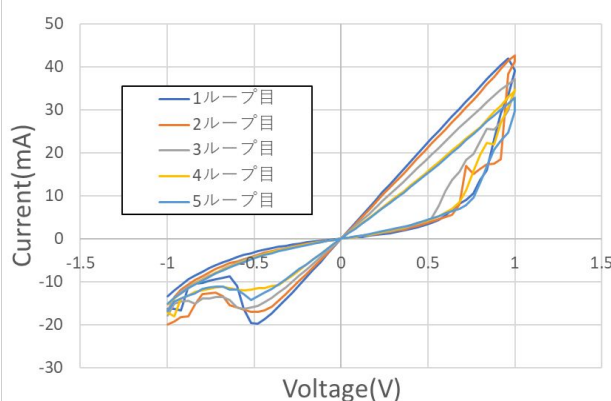


図3 硫化銀ワイヤー構造の電流-電圧特性

#### <引用文献>

Takeo Ohno, Tsuyoshi Hasegawa, Tohru Tsuruoka, Kazuya Terabe, James K. Gimzewski and Masakazu Aono. "Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses". *Nature Materials* **10**, pp. 591-595 (2011).  
DOI: 10.1038/nmat3054

Kazuya Terabe, Tsuyoshi Hasegawa, Tomonobu Nakayama and Masakazu Aono. "Quantized conductance atomic switch". *Nature* **433**, pp. 47-50(2005).  
DOI: 10.1038/nature03190

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大野武雄
2. 発表標題 原子/イオン移動型素子を用いたニューロモルフィック動作
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeo Ohno, Adam Stieg, James Gimzewski
2. 発表標題 イオン伝導体メモリ中のマルチフィラメント形成
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部第71回連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小畑 壹成、大野武雄、Adam Stieg
2. 発表標題 マルチワイヤー構造を用いたReRAM デバイスの形成
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部第72回連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Tohru Tsuruoka, Takeo Ohno, Alpana Nayak, Rui Yang, Tsuyoshi Hasegawa, Kazuya Terabe, James K. Gimzewski, and Masakazu Aono	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 25
3. 書名 Atomic Switch - From Invention to Practical Use and Future Prospects	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	パロブ イリア  (Valov Ilia)	アーヘン工科大学・Dept. Electrical Eng.・シニア研究員	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	スティーグ アダム  (Stieg Adam)	カリフォルニア大学ロサンゼルス校・CNSI・准ディレクター	