

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01382

研究課題名（和文）ヒトの脳機能を遥かに超えるpsオーダーで動作可能な超格子相変化人工シナプスの研究

研究課題名（英文）Ultrafast Superlattice Phase-change Artificial Synapse

研究代表者

イン ユウ (Yin, You)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：10520124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：近年、脳の基本構成要素であるニューロンとシナプスの機能を再現できる新概念の脳型システムが提案され、研究が著しく進んでいる。材料・動作原理・動作法の制約により、人工シナプスの動作速度が遅いといった問題点がある。将来のあらゆる場面での応用を見据え、瞬時的な状況変化への迅速な対応が必要とされる自動運転等の新技術を実現・発展するには、シナプス機能材料・動作原理・動作法を探索する必要がある。本研究では、第一原理計算法を用い、他原子添加法により新相変化超格子材料を探索した。また、作製した相変化デバイスにパルスを印加し、ヒトの脳を遥かに超える動作速度を実証した。パルスの形状を階段状に変え、制御性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新規超格子状メモリ機能相変化材料の理論解析から応用まで多くの研究報告例があったが、他原子添加法による物性制御の研究がほぼ見当たらない。本研究では、他原子の添加により革新的超格子シナプス機能材料を開発でき、超格子材料の人工知能分野への新規応用が期待される。また、将来のあらゆる場面での応用を見据え、瞬時的な状況変化への迅速な対応が必要とされる自動運転等の新技術を実現・発展するには、ヒトの脳機能を遥かに超える脳型システムの開発が極めて重要である。本研究はそれに向かって着実に進んだものである。

研究成果の概要（英文）：In recent years, a new concept of brain-like systems that have the functions of neurons and synapses, the basic components of the brain, has been proposed, and research has progressed significantly. Artificial synapses have the problem of slow speed due to limitations in materials, operating principles, and operating methods. In order to realize and develop new technologies such as autonomous driving, which require rapid response to instantaneous situation changes, with a view to application in all future situations, we have to explore synaptic functional materials, operating principles, and operating methods. In this study, we used first-principles calculation methods to search for new phase change materials by adding other atoms. It was demonstrated that the fabricated synapse device exhibited much faster operating speed than those of the human brain. The controllability was investigated by changing the pulse shape into a step-like shape.

研究分野：電子デバイス

キーワード：シナプス素子 相変化材料 人工知能 高速化

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

経済産業省が公表した産業技術ビジョン2020によると、今後のIoT社会を支えるキーテクノロジーとしての脳型情報処理技術等に重点を置き、2025年、更に遠い将来2050年に向けて、デジタル関連技術の研究開発を加速させる方針である。既存のノイマン型コンピュータ上で実行する深層学習技術が開発され、様々な分野に応用しつつある。また、近年、脳の基本構成要素であるニューロンとシナプスの機能を直接再現できる新概念のハードウェアユニット（脳型システム）が提案され、研究が著しく進んでいる。

この脳型システムが実現できれば、ヒトの脳のように、極めて小さなエネルギーによって認識、学習や記憶など高度な情報処理が可能となる。そのため、ニューロン間の情報伝達の役割を担う、脳の基幹となる圧倒的に多いシナプスの機能模倣は最も重要なことである。シナプス強度の長期増強(LTP)と長期抑制(LTD)は基本的学習機能であり、世界の各研究機関があらゆる材料を用いてこのシナプス機能を模倣している。材料・動作原理・動作法の制約により、人工シナプスの動作速度が遅いといった問題点がある。将来のあらゆる場面での応用を見据え、瞬時的な状況変化への迅速な対応が必要とされる自動運転等の新技術を実現・発展するには、シナプス機能材料・動作原理・動作法を探索し、ヒトの脳(動作速度:ms程度)を遥かに超える高速脳型システムの開発が極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、脳型システム構築に必要な不可欠な基本デバイスである人工シナプスデバイス用の新機能材料を開発する。デバイスを高速化し、独自の動作法により制御性を向上させることとする。具体的には、第一原理計算により、人工シナプス用の機能性材料としてのNや0等の異原子添加GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子状(DSL)多層相変化材料を検討する。RFマグネトロンスパッタ法により相変化材料を作製し、相変化デバイスを完成する。さらに、デバイスにパルスを印加することにより、ヒトの脳機能を遥かに超える高速動作を実証する。

### 3. 研究の方法

#### (1)材料探索

新しい結晶構造と機能の探索に広く使われている第一原理計算法を用い、他原子添加法により導電率が変えられる新相変化材料を探求する。最初に、GeTe、Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>単体とGeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子多層材料の結晶構造モデルを作成する。計算によって最安定構造まで緩和させる後に、電子バンド構造を計算し、バンドギャップを取得する。この結果に基づき、N等の進入型他原子を添加したGeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子(DSL)の構造モデルを作成し、計算により電子バンド構造を求めることによって、バンドギャップの制御性を検討する。

#### (2)デバイス作製と評価

リソグラフィやリフトオフなどにより、相変化材料を用いたデバイスを作製する。電極層としては相変化材料に適した接触材料を用い、電極と相変化膜とのコンタクト幅は数100nmとする。また、パルスの印加とデバイス抵抗値の測定をスイッチの切り替えで交互に行う回路を構築する。差動アンプで増幅された電圧を読み取り、抵抗値 $R (=1/G)$ を検出する。パルスをデバイスに繰り返し印加し、高速シナプス特性を実証する。

### 4. 研究成果

#### (1)第一原理計算

本研究では、モデル作成から解析までAdvance/Phaseを用いて計算を行っている。本研究で用いたモデルの作成については、材料参照から、他原子添加などの作成までを本ソフトウェアのGUI(Graphical User Interface)上で実行可能である。また解析手法である自己無撞着計算(SCF計算)、構造最適化、状態密度計算、BANDギャップエネルギー算出なども本ソフトウェアを利用して行った。

(1.1) GeTe と  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$

図 1(a) と (b) が何も添加していない GeTe と  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の最適化構造である。また、図 1(c) と (d) は図 1(a) と (b) に構造における状態密度を示す。

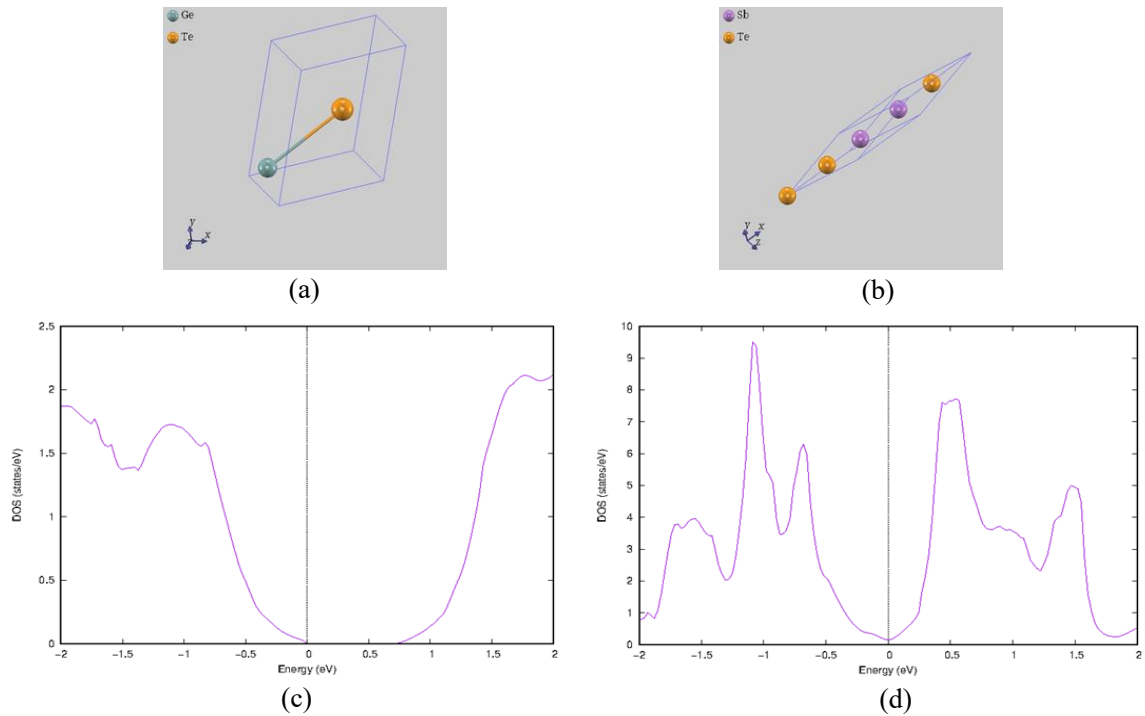


図 1 GeTe と  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  の最適化構造と状態密度

(1.2) GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子と酸素添加 GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子

図 2(a) と 2(c) は、従来の他元素添加なしの GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子のペトロフ構造と逆ペトロフ構造のプリミティブセルを示す。また 2 つの超格子構造の対応するバンド構造もこれらの図に示す。図 2(b) から、ペトロフ構造は低抵抗状態 (LRS) の金属的であるのに対し、逆ペトロフ構造は高抵抗 (HRS) の半導体特性を示すことがわかる。高抵抗状態と低抵抗状態の間の切り替えは、従来相変化材料の非晶質-結晶相転移ではなく、Ge 原子の移動に基づくわずかな構造変化によって行うことができる。

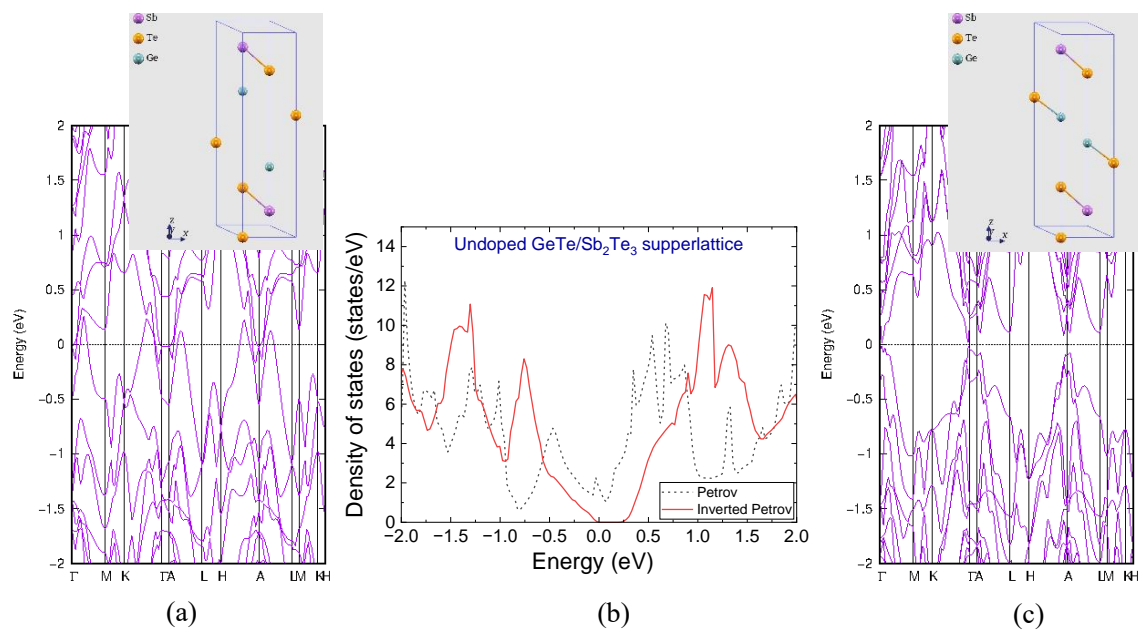


図 2 他元素添加なしの GeTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  超格子 (a) ペトロフ構造の原子構造とバンド構造 (b) 状態密度 (c) 逆ペトロフ構造の原子構造とバンド構造

図 3(a) と 3(c)は、5 個の O 原子がプリミティブセルに添加した場合のペトロフ構造および逆ペトロフ構造の GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子のプリミティブセルを示す。構造の最適化後、O を高濃度に添加した原子構造は添加されていない超格子の原子構造とかなり異なることが判明した。2つの O 添加超格子構造の対応するバンド構造も図に示す。図 3(b)から、O 添加したもののバンドギャップが逆ペトロフ構造の従来の超格子のバンドギャップより広いことが明らかである。これは、GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子に O を添加することで、人工シナプスへの応用において抵抗値（シナプス結合強度）を制御できることを意味する。

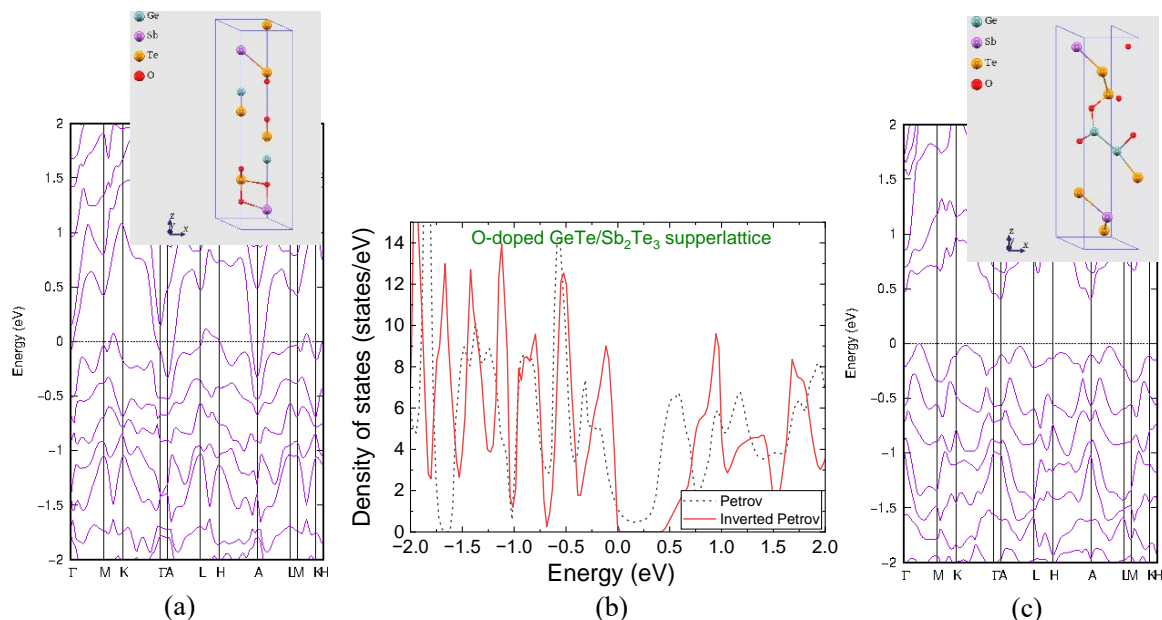


図 3 酸素添加 GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子 (a)ペトロフ構造の原子構造とバンド構造 (b)状態密度 (c)逆ペトロフ構造の原子構造とバンド構造

## (2) デバイス作製と評価

### (2.1) デバイス

試作したデバイスの光学顕微鏡像と SEM 像を図 4(a)に示す。図 4(a)の左上図は電極を加工した後のウェハである。図 4(a)の左図で金色に見えるのが Al 電極である。1チップ上に 10 個のデバイスが形成されている。1つのデバイスに対して左右の電極に 2つのパッドがそれぞれ配線されている。右下図で H 字状に見える部分が相変化材料等の領域であり、両サイドに広がった部分が TiN 電極である。完成したデバイスの断面模式図を図 4(b)に示す。

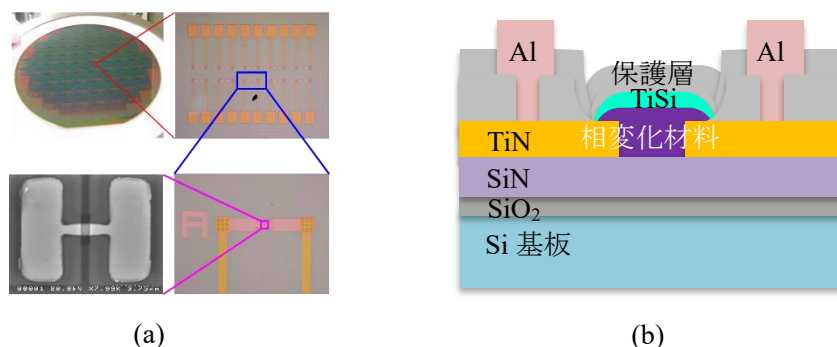


図 4 (a)デバイスの写真 (b)断面模式図

### (2.2) 電気特性評価システム

実験に使用した回路は図 5 に示す。パルス印加と抵抗値測定をスイッチの切り替えで交互に行うことができる。LabVIEW により、差動アンプにより増幅された電圧を読み取り、データの保存と抵抗値の算出を行い、抵抗値の検出をする。デバイスと実験のための回路はプローバーにより電圧印加及び抵抗測定を行っている。

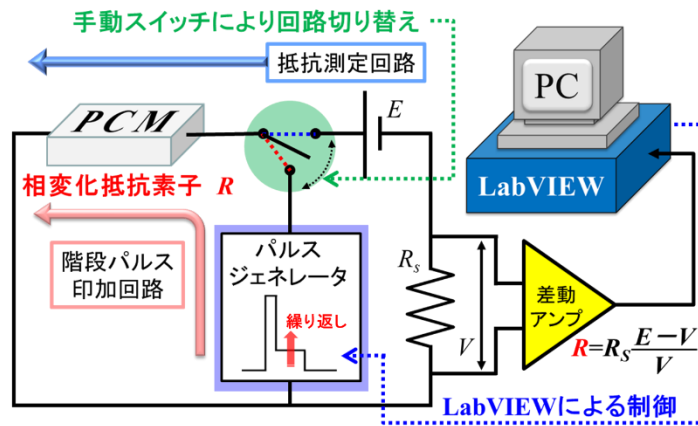


図5 電気特性評価システム

### (2.3) 電気特性評価結果

相変化デバイス的高速相変化実験結果を図6(a)に示す。電圧パルス半値幅を5 ns、10 ns、25 nsとしたときの電圧パルス増加に伴う抵抗変化(シナプス結合強度)を示している。電圧を徐々に大きくすると、結晶化開始電圧よりデバイス抵抗値は2桁程度低下し、その後、ほぼ一定となり、さらに増加すると、上昇する。これは、デバイスの状態がアモルファス状態から結晶状態に、さらに、アモルファス状態へと変化していることがわかる。この状態変化はシナプス強度の長期増強(LTP)と長期抑制(LTD)に対応している。また、結果は、結晶化のための必要エネルギーは  $\#V^2t/R$  ( $t$ : パルス幅) であることから、パルス幅が長いほど、結晶化開始電圧が低くなることと一致している。パルス幅が5 nsまでの短パルスを使用しても、デバイス抵抗は2桁程度下がった。所有装置の性能制約により検証できなかったが、デバイスを更に微細化し、1 ns程度若しくはそれ以上の速さで動作させることが期待できる。

また、試作デバイスに電圧制御階段パルスを印加し、実験を行った。印加した階段パルスは第1パルス幅50 ns、電圧値10 V、第2パルス幅100 nsを印加した。この抵抗値変化は、第1パルスにより融点以上まで加熱し、第2パルスで結晶化領域のコントロールによるものである。階段パルス印加によるデバイス抵抗値変化を6(b)に示す。結果から見ると、第2パルスの電圧0.8 Vに増加したとき、抵抗値が最低になったことがわかる。このとき、デバイスの結晶領域が最大になると考えられる。階段パルスを印加することで、図に示すように抵抗(シナプス結合強度)変化がより細かく制御できる。

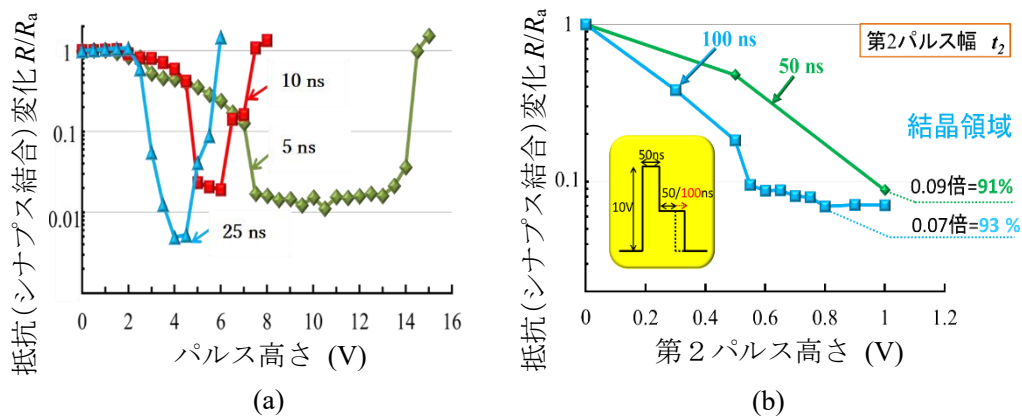


図6 (a) 動作の高速化 (b) 階段パルスによる制御性向上

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Y. Yin	4. 巻 4
2. 論文標題 Proposal of a Novel Operation Method to Precisely Control Synaptic Strength for Phase-Change Artificial Synapse	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System	6. 最初と最後の頁 13, 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fujiwara Takao, Niiyama Koji, Yin You	4. 巻 62
2. 論文標題 Characterization of undoped and N-Ti codoped Zn5Sb3Te chalcogenides	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1023 ~ SG1023
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acbda5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Liu Y. H., Wang J. J., Wang H. Z., Liu S., Wu Y. C., Hu S. G., Yu Q., Liu Z., Chen T. P., Yin Y., Liu Y.	4. 巻 13
2. 論文標題 Braille recognition by E-skin system based on binary memristive neural network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5437 ~ 5437
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-31934-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Yahagi, and Y. Yin	4. 巻 6
2. 論文標題 N-Doped GeTe for Phase-Change Device with High Reliability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System	6. 最初と最後の頁 10-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

[学会発表] 計22件(うち招待講演 6件/うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Y. Yin, K. Niiyama, W. Matsuhashi and T. Fujiwara
2. 発表標題 Doped Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> Phase-Change Materials for High Performance Artificial Synaptic Device
3. 学会等名 International Conference on Technology and Social Science 2021 (ICTSS2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yin, K. Niiyama, W. Matsuhashi, R. Shirakawa, T. Fujiwara, and K. Sawao
2. 発表標題 Chalcogenides for Their Application to Phase-Change-Memory-Based Synaptic Devices
3. 学会等名 2021 IEEE 14th International Conference on ASIC (ASICON 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Shirakawa and Y. Yin
2. 発表標題 Finite Element Analysis of Phase-Change Device with Incorporated Nanostructures for Lowering Writing Current
3. 学会等名 International Conference on Technology and Social Science 2021 (ICTSS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Shirakawa and Y. Yin
2. 発表標題 Structural analysis for lowering writing current of phase-change device with nanostructure by finite element method
3. 学会等名 The 4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Niiyama and Y. Yin
2. 発表標題 N-O co-doped Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> chalcogenide memristive material
3. 学会等名 The 4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yin
2. 発表標題 C-N-codoped Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> chalcogenides for high-performance phase-change devices
3. 学会等名 The 4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yin
2. 発表標題 Pulse programming method for phase-change artificial synapse
3. 学会等名 The 4th International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems (MEMRISYS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yin, K. Niiyama and T. Fujiwara
2. 発表標題 N-O Co-Doped Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> Chalcogenide for High Performance Artificial Synaptic Device
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 新山 浩司、尹 友
2. 発表標題 人工シナプス素子の高性能化に向けたN-0コドーブSb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> 相変化材料の開発
3. 学会等名 2022年春季第69回 応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松橋 航、尹 友
2. 発表標題 Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> へのC-Nコドーピングによる相変化デバイス書き込み電流の削減
3. 学会等名 The 18th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers (IEEE TOWERS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新山 浩司、尹 友
2. 発表標題 シナプス素子の高性能化に向けたN-0コドーブSb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> 新相変化材料の開発
3. 学会等名 The 18th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers (IEEE TOWERS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白川 遼馬、尹 友
2. 発表標題 局所的電流密度増強による相変化素子の低動作電流化
3. 学会等名 The 18th IEEE Transdisciplinary-Oriented Workshop for Emerging Researchers (IEEE TOWERS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白川 遼馬、尹 友
2. 発表標題 ナノ構造を有する相変化素子の低動作電流化のための有限要素法解析
3. 学会等名 2021年秋季 第82回 応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yin
2. 発表標題 High-Performance Chalcogenide-based Phase-Change Memory Technology
3. 学会等名 2024 IEEE the 13th International Conference on Communications, Circuits, and Systems (ICCCAS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Yin, and K. Niyama
2. 発表標題 N-0 Doped Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> Phase-Change Materials for High Performance Artificial Synaptic Device
3. 学会等名 2024 IEEE 7th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 M. Miuchi, E. Sawai, S Yahagi, and Y. Yin
2. 発表標題 Doping 0 into Conventional GeTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> Superlattice for Functional Material of Artificial Synapse
3. 学会等名 The 7th International Conference on Technology and Social Science 2023 (ICTSS2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Yahagi, M. Miuchi, S. Yoshimoto, T. Miyata, T. Fujiwara, and Y. Yin
2 . 発表標題 O-Doped GeTe Chalcogenide for High-Performance Phase-Change Device
3 . 学会等名 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 M. Miuchi, R. Shirakawa, E. Sawai, S. Yahagi, and Y. Yin
2 . 発表標題 First-Principles Study of O-Doped GeTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> Superlattice
3 . 学会等名 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Yin, M. Miuchi, S. Yahagi, and T. Fujiwara
2 . 発表標題 Doped Chalcogenides for High-Performance Phase Change Devices
3 . 学会等名 2023 IEEE 15th International Conference on ASIC (ASICON 2023) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Yahagi and Y. Yin
2 . 発表標題 N-Doped GeTe for Highly Reliable Phase-Change Device
3 . 学会等名 11th International Science, Social Sciences, Engineering and Energy Conference (I-SEEC 2022) and 6th International Conference on Technology and Social Science 2022 (ICTSS 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Yin, T. Fujiwara, K. Niiyama and S. Yahagi
2. 発表標題 Undoped and Doped Zn5Sb3Te Chalcogenides for Use in Phase-Change Device with High Thermal Stability
3. 学会等名 11th International Science, Social Sciences, Engineering and Energy Conference (I-SEEC 2022) and 6th International Conference on Technology and Social Science 2022 (ICTSS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Fujiwara, K. Niiyama and Y. Yin
2. 発表標題 N-Ti Codoped Zn5Sb3Te1 Chalcogenide for Artificial Synaptic Functional Material
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	難波 一輝 (Namba Kazuteru) (60359594)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授  (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------