

脳型集積システムのためのGTOメモrista（延長）

代表研究者 木村 睦

龍谷大学 先端理工学部 電子情報通信課程 教授

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 客員教授

共同研究者 中島 康彦

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 教授

1 研究調査の目的

人工知能は今後の社会の中心となる技術として期待されている。しかしながら、現在の人工知能は超高速・超大規模・超ハイスpekのノイマン型コンピュータで実行される複雑・長大なソフトウェアであり、ハードウェアのサイズが大型で消費電力も膨大となる。特に消費電力は、2050年には全発電量の60%にもなると試算されており、人工知能の普及に致命的な制約となる。また、冗長構造を設けても基本的に全ての素子が異常なく動作していることが前提でロバスト性に劣る。

そこで我々は、生体の神経回路に構造・動作・機能の起源をもち、デバイスレベルから生体の神経回路を再現するアナログニューラルネットワークを用いた脳型集積システムの研究を行っている(表 1)。電子デバイスの微細化と3次元構造で人間の脳よりもコンパクトとなる。

さらに並列分散処理で個々の素子の動作速度を抑制し

つつ全体の動作速度を維持し、非同期型でクロック信号も不要となり、消費電力が大幅に低減できる。また、全体に機能が分散されるため、一部の素子の故障に対し、ロバスト性も期待される。研究の最終目標は、ロボット・IoT センサーへ搭載可能な超小型・超低消費電力・ロバストな人工知能を実現することである。

これまで我々は、素子レベルのハードウェアによるアナログニューラルネットワークの基礎研究を進めてきた[2-6]。脳型集積システム実現に必要な課題は、下記の通りである。

(a) ニューロン素子とシナプス素子を多数集積化するための構造簡略化

(b) ハードウェアに適したネットワーク構成の提案

(c) 素子レベルのハードウェアによるニューラルネットワークとして脳型集積システムの3次元作製技術

(a)については、ニューロン素子を2インバータ回路まで簡略化し、シナプス素子を可変コンダクタンス素子や電界効果トランジスタまで簡略化することに成功した。(b)については、隣接するニューロンだけに接続するセルラニューラルネットワークで動作検証に成功した。現時点では簡単な論理の学習や文字認識であるが、大規模化により様々な機能の実現が期待できると考えている。本研究調査は、ニューラルネットワークの大規模化が可能となる(c)に関するものである。アナログニューラルネットワークはニューロン素子とシナプス素子から成り、脳型集積システムの実現には、微細化と3次元化が可能かつ可塑的な結合強度をもつ簡略構造のシナプス素子が必須である。

本研究調査の目的は、このシナプス素子を、我々が研究しているGa-Sn-O(GTO)薄膜メモristaで実現することにある。2018年度は、2017年度に確認したGTO薄膜メモrista単体の特性を、シナプス素子に応用・機能検証した。GTO薄膜メモristaの単体で、スパッタプロセスの条件最適化で、安定したヒステリシス特性(図1)と10000秒の保持特性・10000回の繰り返し特性という信頼性を実現することに成功した[7]。つぎに、大気圧ミストCVD法で成膜したGTOメモristaの、ヒステリシス特性

表 1. 我々の目指す脳型集積システム

これまでの人工知能	構成	我々の目指す脳型集積システム
ノイマン型コンピュータでソフトウェアとして動作		ハードウェアレベルから神経網を模倣
順次・同期	× 動作	○ 並列分散処理
高	○ 汎用性	× 低
大型	× サイズ	○ コンパクト
高	× 消費電力	○ 低
低	× ロバスト性	○ 高
搭載できるものは限定的	× 搭載方法	○ 個々の「モノ」に自律型人工知能

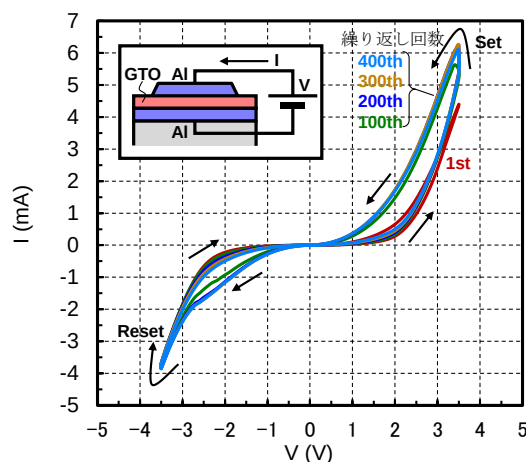


図 1. GTO 薄膜メモristaのヒステリシス特性

を確認した。さらに、ニューラルネットワーク評価システムの初号機を完成した。2019 年度は、膜中酸素の含有量制御による多層化で、メモrista特性のさらなる向上を目的とする。

2 研究調査の方法・進め方

我々は、並行して進めている In-Ga-Zn-O (IGZO: イグゾー) 薄膜メモristaで、膜中酸素の含有量制御による多層化で(図 2)、安定性の改善は必要だが、メモrista特性となるヒステリシスのさらなる向上が可能であることを確認している(図 3)。しかしながら、IGZO 薄膜メモristaはレアメタルの In を含むため、将来の人工知能の普及で多量の使用が現実となると、資源枯渇・材料供給の懸念がある。そこで、2019 年度に、これらの懸念のない我々が研究している GTO 薄膜[8,9]を用いたメモristaにおいて、膜中酸素の含有量制御による多層化で、メモrista特性のさらなる向上を目指す。具体的には、GTO 薄膜を RF マグネトロンスパッタリング法で成膜するときにスパッタガスの酸素流量を制御したり、ミスト CVD 法でキャリアガスの酸素流量を制御したりする。ともに成膜プロセスでの簡便な制御であり、生産性・コストへの影響はほとんどない。

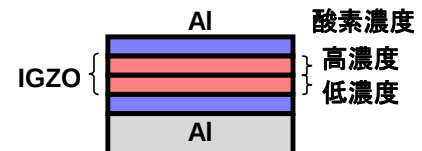


図2. 多層化 IGZO 薄膜メモristaのデバイス構造

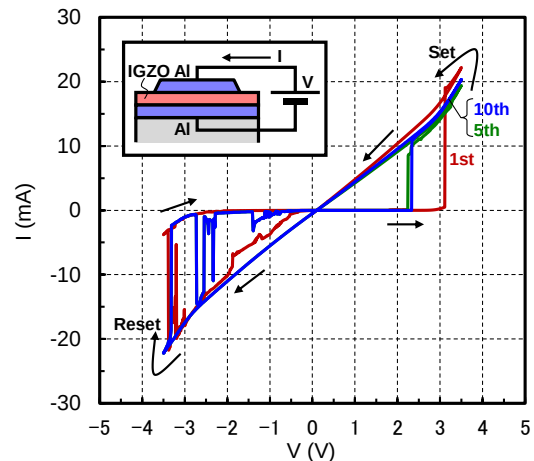


図3. 多層化 IGZO 薄膜メモristaのヒステリシス特性

3 研究調査の結果・考察

3-1 RF マグネトロンスパッタリング法

RF マグネトロンスパッタリング装置(図 4)で、酸素分圧の異なる条件で 2 層の GTO 薄膜を成膜して、2 層 GTO 薄膜メモristaを作製し、メモrista特性を得ることに成功した(図 5)。いまのところ、400 回程度のヒステリシス再現性と 5.0 程度のオンオフ比を得ている。既に論文を投稿して出版されている[10]。メモrista動作の動作メカニズムについても考察し、電界により酸素イオンが移動し、酸素空孔密度の異なる酸素リッチ層と酸素プア層の配分により、コンダクタンス変化が誘起されていると推測している(図 6)。これらの値でもニューラルネットワークのシナプス素子として応用が可能であるが、現在さらなる多層化など改善を図っている。



図4. RF マグネトロンスパッタ装置

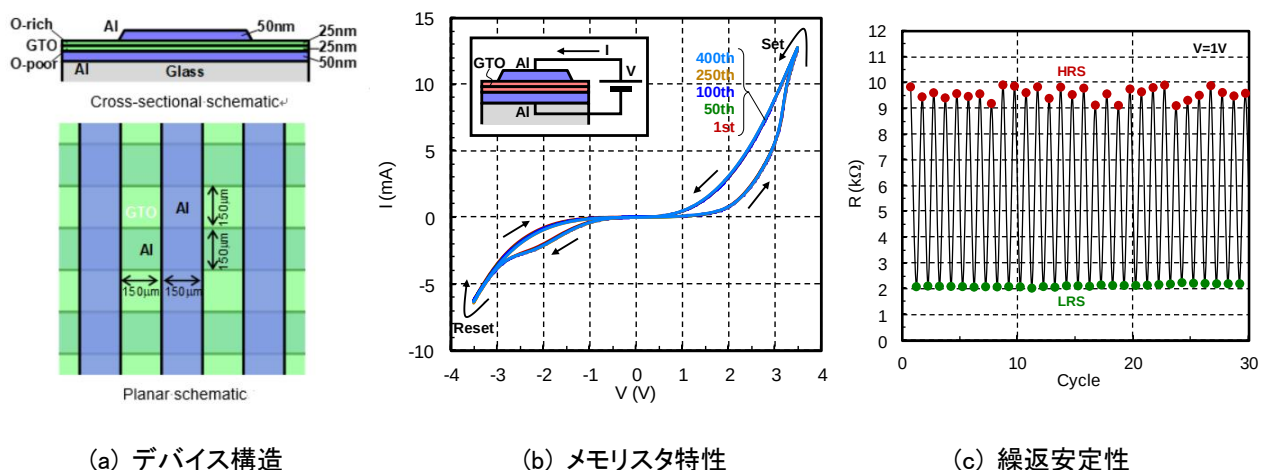


図5. RF マグネトロンスパッタリング装置で作製した 2 層 GTO 薄膜メモrista

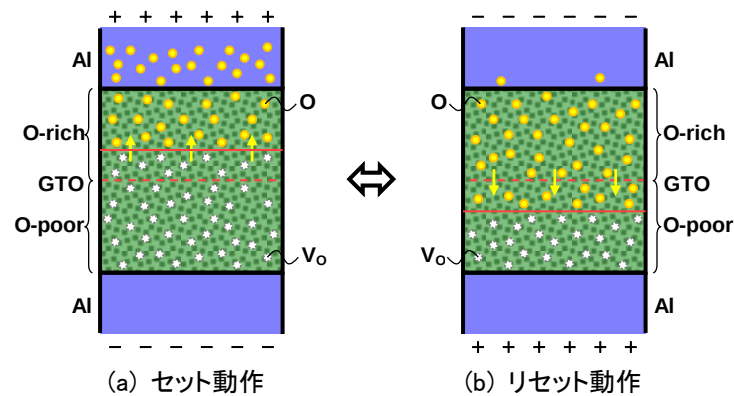


図 6. 2 層 GTO 薄膜メモリスタの動作メカニズム

3-2 ミスト CVD 法

ミスト CVD 装置(図 7)で GTO 薄膜を成膜して、単層 GTO 薄膜メモリスタを作製し、メモリスタ特性を得ることに成功した(図 8)。既に論文を投稿して出版されている[11]。やはり、メモリスタ動作の動作メカニズムについても考察し、RF マグネトロンスパッタリング装置で作製した 2 層 GTO 薄膜メモリスタと同様の挙動が、ミスト CVD 装置で作製した単層 GTO 薄膜メモリスタでも、うまいぐあいに誘起されていると推測している。現在は、特性を向上させるため、多層化 GTO 薄膜メモリスタを作製することに着手している。キャリアガスの流量制御によるプロセス条件の最適化を図っている。

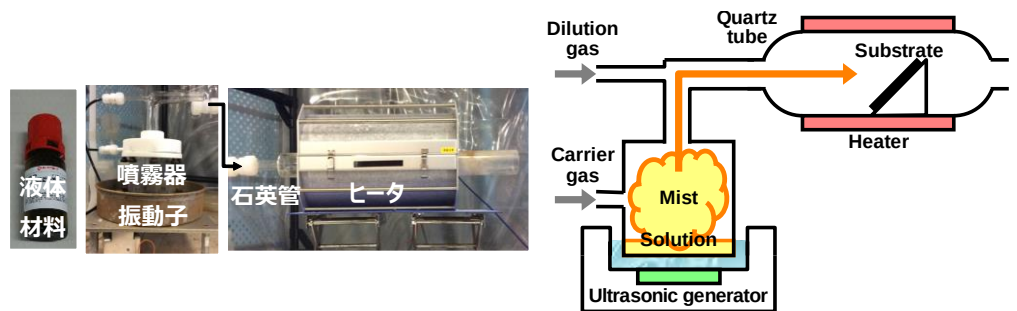


図 7. ミスト CVD 装置

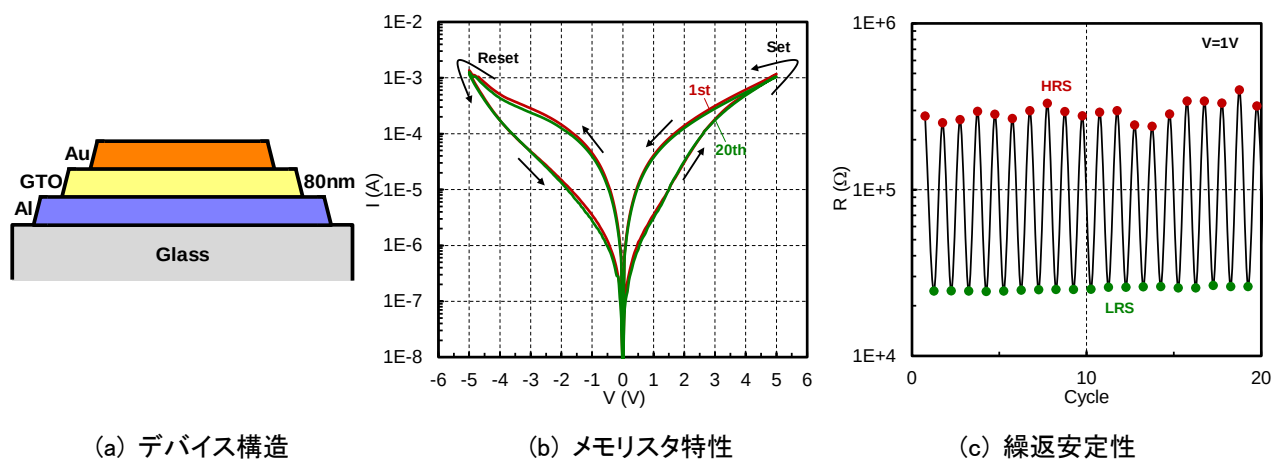


図 8. ミスト CVD 装置で作製した単層 GTO 薄膜メモリスタ

3-3 機能確認

研究調査期間の研究開始のときは、RF マグネトロンスパッタリング・ミスト CVD 法により得られたそれぞれ最高性能の多層化 GTO 薄膜メモristaをニューラルネットワーク評価システムに実装し、シナプス素子の機能確認を行う予定であったが、中間報告のときに、多層化 GTO 薄膜メモristaの評価には印加電圧の連続的制御が必要であることがわかり、ニューラルネットワーク評価システムに回路基板を追加することとなり、設計を完了し発注した。現在は、納品され検収も完了し(図 9)、今後は早速に前述の、RF マグネトロンスパッタリング・ミスト CVD 装置で作製した GTO 薄膜メモristaを、ニューラルネットワーク評価システムに実装し、シナプス素子の機能確認を行ってゆく。



図 9. 印加電圧の連続的制御の回路基板

4 研究調査の結論

脳型集積システムを実現するためのGTOメモristaの研究を行った。まず、RF マグネトロンスパッタリング装置で、酸素分圧の異なる条件で2層のGTO薄膜を成膜して、2層GTO薄膜メモristaを作製し、メモrista特性を得ることに成功した。メモrista動作の動作メカニズムについても考察し、電界により酸素イオンが移動し、酸素空孔密度の異なる酸素リッチ層と酸素プア層の配分により、コンダクタンス変化が誘起されていると推測している。次に、ミストCVD装置でGTO薄膜を成膜して、単層GTO薄膜メモristaを作製し、メモrista特性を得ることに成功した。さらに、ニューラルネットワークの機能確認として、多層化GTO薄膜メモristaの評価には印加電圧の連続的制御が必要であることがわかり、ニューラルネットワーク評価システムに回路基板を追加することとなり、設計を完了し発注し納品され検収も完了した。現在は、RF マグネトロンスパッタリング装置で作製したGTO薄膜メモristaについては、さらなる多層化など改善を図っている。ミストCVD装置で作製したGTO薄膜メモristaについては、特性を向上させるため、多層化GTO薄膜メモristaを作製することに着手していて、キャリアガスの流量制御によるプロセス条件の最適化を図っている。

【参考文献】

- [1] 木村 睦, 搭載!! 人工知能, 電気書院, 2016年5月.
- [2] Mutsumi Kimura, Tomoaki Miyatani, Yusuke Fujita, and Tomohiro Kasakawa, Apoptotic Self-Organized Electronic Device using Thin-Film Transistors for Artificial Neural Networks with Unsupervised Learning Functions, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 3S, 03CB02, Feb. 2015.
- [3] Mutsumi Kimura, Ryohei Morita, Sumio Sugisaki, Tokiyoshi Matsuda, Tomoya Kameda, and Yasuhiko Nakashima, Cellular Neural Network formed by Simplified Processing Elements composed of Thin-Film Transistors, Neurocomputing Vol. 248, pp. 112-119, March and July 2017.
- [4] Mutsumi Kimura and Tokiyoshi Matsuda, Neuromorphic Application of Oxide Semiconductors, ECS Trans., Vol. 79, No. 1, pp. 169-175, May 2017.
- [5] Mutsumi Kimura, Hiroki Nakanishi, Nao Nakamura, Tomoharu Yokoyama, Tokiyoshi Matsuda, Tomoya Kameda, and Yasuhiko Nakashima, Simplification of Processing Elements in Cellular Neural Network, J. Electrical Engineering and Electronic Technology, Vol. 6, Issue 1, Apr. 2017.
- [6] Mutsumi Kimura, Yuki Koga, Hiroki Nakanishi, Tokiyoshi Matsuda, Tomoya Kameda, and Yasuhiko Nakashima, In-Ga-Zn-O Thin-Film Devices as Synapse Elements in a Neural Network, IEEE J. Electron Devices Society, Vol. 6, Issue 1, pp. 100-105, Dec. 2017.
- [7] Sumio Sugisaki, Tokiyoshi Matsuda, Mutsunori Uenuma, Toshihide Nabatame, Yasuhiko Nakashima, Takahito Imai, Yusaku Magari, Daichi Koretomo, Mamoru Furuta, and Mutsumi

- Kimura, Memristive Characteristic of an Amorphous Ga-Sn-O Thin-Film Device, Scientific Reports, Vol. 9, 2757, Feb. 2019.
- [8] Tokiyoshi Matsuda, Kenta Umeda, Yuta Kato, Daiki Nishimoto, Mamoru Furuta, and Mutsumi Kimura, Rare-Metal-Free High-Performance Ga-Sn-O Thin Film Transistor, Scientific Reports, Vol. 7, 44326, March 2017.
- [9] Tokiyoshi Matsuda, Ryo Takagi, Kenta Umeda, and Mutsumi Kimura, Room-Temperature Fabrication of Ga-Sn-O Thin-Film Transistors, Solid State Electronics, Vol. 134, pp. 19–21, May 2017.
- [10] Ayata Kurasaki, Ryo Tanaka, Sumio Sugisaki, Tokiyoshi Matsuda, Daichi Koretomo, Yusaku Magar, Mamoru Furuta, and Mutsumi Kimura, Memristive Characteristic of an Amorphous Ga-Sn-O Thin-Film Device with Double Layers of Different Oxygen Density, Materials, Vol. 12, Issue 19, 3236, Oct. 2019.
- [11] Yuta Takishita, Masaki Kobayashi, Kazuki Hattori, Tokiyoshi Matsuda, Sumio Sugisaki, Yasuhiko Nakashima, and Mutsumi Kimura, Memristor Property of an Amorphous Sn-Ga-O Thin-Film Device deposited using Mist Chemical-Vapor-Deposition Method, AIP Advances, Vol. 10, Issue 3, 035112, Mar. 2020

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Analysis of Carrier Mobility in Amorphous Metal-Oxide Semiconductor Thin-Film Transistor using Hall Effect, Kota Imanishi, Tokiyoshi Matsuda, and Mutsumi Kimura	IEEE Electron Device Lett.	To be published
Influence of Characteristic Variation of Oxide Semiconductor and Comparison of the Activation Function in Neuromorphic Hardware, Hiroya Ikeda, Hiroki Yamane, Yuta Takishita, Mutsumi Kimura, and Yasuhiko Nakashima	NOLTA IEICE, Vol. 11, No.2, pp. 232-252	Apr. 2020
Memristor Property of an Amorphous Sn-Ga-O Thin-Film Device deposited using Mist Chemical-Vapor-Deposition Method, Yuta Takishita, Masaki Kobayashi, Kazuki Hattori, Tokiyoshi Matsuda, Sumio Sugisaki, Yasuhiko Nakashima, and Mutsumi Kimura	AIP Advances, Vol. 10, Issue 3, 035112	Mar. 2020
レアメタルフリー Ga-Sn-O 材料の薄膜トランジスタへの応用, 松田 時宜, 梅田 鉄馬, 加藤 雄太, 西本 大貴, 杉崎 澄生純生, 古田 守, 木村 睦	[招待論文] 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J102-C, No.11, pp. 305-311	Nov. 2019
Memristive Characteristic of an Amorphous Ga-Sn-O Thin-Film Device with Double Layers of Different Oxygen Density, Ayata Kurasaki, Ryo Tanaka, Sumio Sugisaki, Tokiyoshi Matsuda, Daichi Koretomo, Yusaku Magar, Mamoru Furuta, and Mutsumi Kimura	Materials, Vol. 12, Issue 19, 3236	Oct. 2019
Emerging Applications using Metal-Oxide Semiconductor Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura	[STAP Reviews] Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 58, No. 9, 090503	Sep. 2019
Neuromorphic System with Crosspoint-type Amorphous Ga-Sn-O Thin-Film Devices as Self-Plastic	ECS Trans., Vol. 90, Issue 1, pp. 157-166	May 2019

Synapse Elements, Mutsumi Kimura, Kenta Umeda, Keisuke Ikushima, Toshimasa Hori, Ryo Tanaka, Junpei Shimura, Atsushi Kondo, Takumi Tsuno, Sumio Sugisaki, Ayata Kurasaki, Kaito Hashimoto, Tokiyoshi Matsuda, Tokiyoshi Kameda, and Yasuhiko Nakashima		
Neuromorphic System using Thin-Film Devices as a Novel Computing System, Mutsumi Kimura	[Keynote] ISACIT 2019	Aug. 2019
薄膜デバイスを用いたニューロモーフイックシステムー有機デバイスの可能性ー, 木村 睦	[招待講演] 高分子学会 有機エレクトロニクス研究会	2020 年 5 月
薄膜デバイスを用いたリアルニューロモーフイックシステム, 木村 睦	[招待講演] エレクトロニクス実装学会 第34回春季講演大会 特別シンポジウム「IoT によるフィジカル空間変革とAI 社会実装」	2020 年 3 月
薄膜デバイスを用いたニューロモーフイックシステム, 木村 睦	薄膜材料デバイス研究会 高知特別研究会	2020 年 3 月
Brain-like Integrated System using Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura	[Invited] The 8th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer	Feb. 2020
Neuromorphic Chip using AOS Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura	[Invited] The 77th Fujihara Seminar, pp. 16-17	Oct. 2019
Novel application using TFTs, Mutsumi Kimura	[Invited] IMID 2019, B65-3, pp. 653	Aug. 2019
Neuromorphic System using Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura	[Invited] 2019 ULSIC vs. TFT Conference	May 2019
Neuro-inspired System with Crossbar Array of Amorphous Metal-Oxide-Semiconductor Thin-Film Devices as Self-Plastic Synapse Units – Letter Recognition of Five Alphabets –, Mutsumi Kimura, Kenta Umeda, Keisuke Ikushima, Toshimasa Hori, Ryo Tanaka, Tokiyoshi Matsuda, Tomoya Kameda, and Yasuhiko Nakashima	The 26th International Conference on Neural Information Processing, ICONIP 2019, Pt. II, LNCS 11954, pp. 481-491	Dec. 2019
In-Ga-Zn-O Film Thickness Dependence of Memristor Characteristic for Resistive Random Access Memory, Kaito Hashimoto, Ayata Kurasaki, Mutsumi Kimura, and Tokiyoshi Matsuda	IMFEDK 2019	Nov. 2019
Ga-Sn-O Thin Film Synapse for Neural Network, Yuki Shibayama, Daiki Yamakawa, Yuki Onishi, and Mutsumi Kimura	IMFEDK 2019	Nov. 2019
Synapse Elements in Neural Network Based on Multilayer Cross-Point Device using IGZO, Takumi Tsuno, Junpei Shimura, Atsushi Kondo, and Mutsumi Kimura	IMFEDK 2019	Nov. 2019
Crystal Growth of (Bi, La) ₄ Ti ₃ O ₁₂ Using a Two Step Deposition Process, Homare Yoshida, Yuta Miyabe, and Mutsumi Kimura	IMFEDK 2019	Nov. 2019
ニューラルネットワーク用 Ga-Sn-O 薄膜シナプス, 柴山 友輝, 山川 大樹, 大西 祐輝,	薄膜材料デバイス研究会 第 16 回研究集会, pp. 129-131	2019 年 11 月

山根 弘樹, 中島 康彦, 木村 睦		
アモルファス In-Ga-Zn-O 薄膜シナプスの可塑性, 山川 大樹, 柴山 友輝, 大西 祐輝, 池田 裕哉, 中島 康彦, 木村 睦	薄膜材料デバイス研究会 第 16 回 研究集会, pp. 65-67	2019 年 11 月
Real Neuromorphic System using LSI Chip and Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura, Keisuke Ikushima, Daiki Yamakawa, Hiroki Yamane, and Yasuhiko Nakashima	ICONS 2019	July 2019
Development of Two-Layered ReRAM using Ga-Sn-O Thin Film, Ayata Kurasaki, Sumio Sugisaki, Ryo Tanaka, Tokiyoshi Matsuda, and Mutsumi Kimura	AM-FPD '19, P-25	July 2019
Evaluation of IGZO Synapses for Neuromorphic Systems, Daiki Yamakawa, Yuki Shibayama, Hiroki Yamane, Yasuhiko Nakashima, and Mutsumi Kimura	AM-FPD '19, P-22	July 2019
Evaluation of Neuromorphic Hardware using Cellular Neural Networks and Oxide Semiconductors, Hiroya Ikeda, Hiroki Yamane, Yuki Shibayama, Mutsumi Kimura, and Yasuhiko Nakashima	APDCM 2019	May 2019
Brain-like Integrated System using Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura	FY 2019 RIEC Annual Meeting on Cooperative Research Projects	Feb. 2020
Ga-Sn-O 薄膜を用いた抵抗変化型メモリのメモリスト特性の電極依存性, 橋本 快人, 倉崎 彩太, 田中 遼, 杉崎 澄生, 角田 涼, 木村 睦	映像情報メディア学会, IDY2019-74, pp. 29-32	2019 年 12 月
2 段階堆積プロセスを用いた(Bi,La) ₄ Ti ₃ O ₁₂ 薄膜の結晶成長, 吉田 誉, 石崎 勇真, 宮部 雄太, 木村 睦	映像情報メディア学会, IDY2019-73, pp. 25-28	2019 年 12 月
ニューラルネットワークのための多層クロスポイント型シナプス素子, 映像情報メディア学会, 津野 拓海, 近藤 厚志, 新村 純平, 田中 遼, 山川 大樹, 柴山 友輝, 岩城 江津子, 木村 睦	映像情報メディア学会, IDY2019-72, pp. 21-24	2019 年 12 月
Neuromorphic System using an LSI Chip and α -IGZO Thin-Film Devices, Mutsumi Kimura, Keisuke Ikushima, Daiki Yamakawa, Hiroki Yamane, and Yasuhiko Nakashima	38th Electronic Materials Symposium, Fr2-04, pp. 267	Oct. 2019
局所学習則と薄膜デバイスを用いるリアルニューロモフィックシステム - 文字学習の動作確認 -, 木村 睦, 田中 遼, 山川 大樹, 柴山 友輝, 池田 裕哉, 滝下 雄太, 中島 康彦	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-F211-7, pp. 19-026	2019 年 9 月
トップよりエッジを目指せ., 木村 睦, 丸 幸弘	News Picks https://newspicks.com/news/4749550/	2020 年 3 月
通過の電荷記憶 抵抗変化 ガリウム・スズ酸化物 非晶質薄膜の特性発見, 木村 睦	刊工業新聞 2019 年 2 月 27 日	2019 年 2 月