

高温環境下のメモリデバイス・ エッジAIデバイス向けメモリスタ素子

大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム創成専攻
教授 酒井 朗

2026年1月29日

研究・技術的背景

- 生成AIの台頭により高度なメモリハードウェアの重要性が増大
- Si系半導体メモリが依然として主流 → 動作温度の典型限界：400–473 K
- 将来のAIシステムは高温環境での動作へ拡張

車両向けエンジン制御への応用
588 K 以上



地熱発電向け井戸掘削・監視
673 K 以上



金星探査への応用
623 K 以上



原子力熱モニタリング
973 K 以上



高温動作メモリ開発の重要性が増大

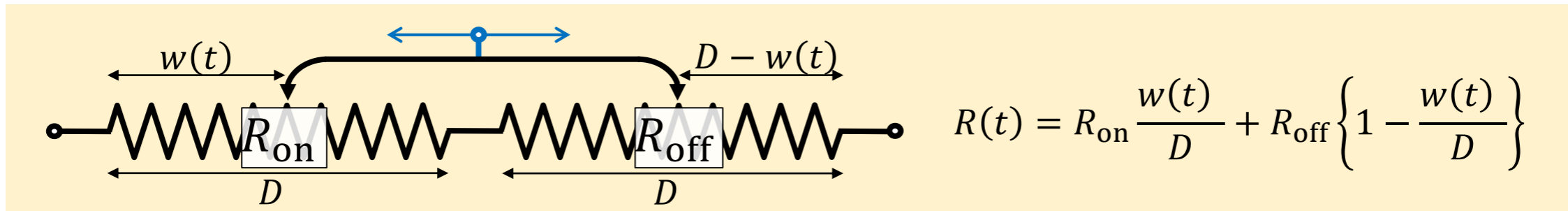
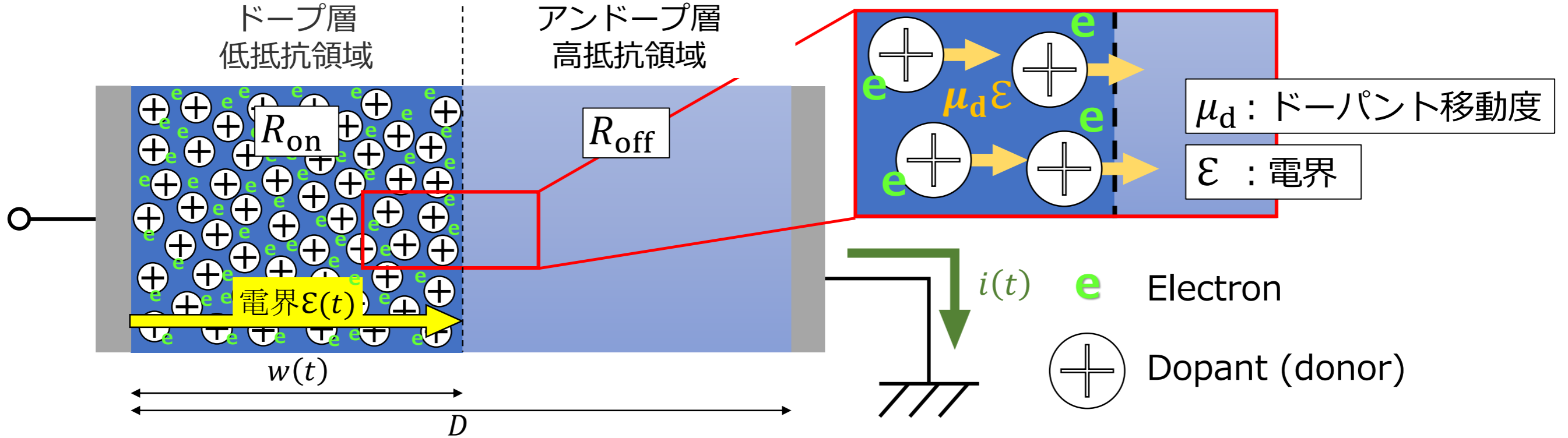
研究・技術的背景

高温対応メモリ素子の開発動向（研究開発ベース）

メモリタイプ	揮発性	材料系	動作温度	参考文献
FET SRAM	揮発	GaN-on-Si	573 K	Yuan et al., IEEE EDL (2022).
JFET RAM	揮発	4H-SiC	773 K	Neudeck et al., JMEP (2018).
フラッシュメモリ	不揮発	Si	<358 K	Lee et al., IEEE TED (2013).
強誘電体メモリ	不揮発	LiNbO ₃	450 K	Jiang et al. JAC (2021).
	不揮発	Al _{0.68} Sc _{0.32} N	873 K	Pradhan et al., NE (2024).
	不揮発	Al _{0.72} Sc _{0.28} N	873 K	Guido et al., ACS AMI (2023).
	不揮発	Epitaxial ScAlN/GaN	670 K	Wang et al., AEM (2022).
	不揮発	Hf _{0.5} Zr _{0.5} O ₂ /β-Ga ₂ O ₃	573 K	Noh et al., IEEE TED (2021).
抵抗変化型メモリ (メモリスタ)	不揮発	Al ₂ O ₃ /HfO ₂ /Al ₂ O ₃	358 K	Wang et al., NRL (2015).
	不揮発	graphene/MoS _{2-x} O _x /graphene	613 K	Wang et al., NE (2018).
	不揮発	Amorphous GaO _x	600 K	Sato et al., SR (2023).
	不揮発	WO _{3-x} /YSZ	473 K	Kim et al., AEM (2023).

- フラッシュメモリは高温環境での動作に制約
- AlScN系強誘電体メモリは比較的高い動作電圧が必要
- 金属酸化物メモリスタは有望な候補

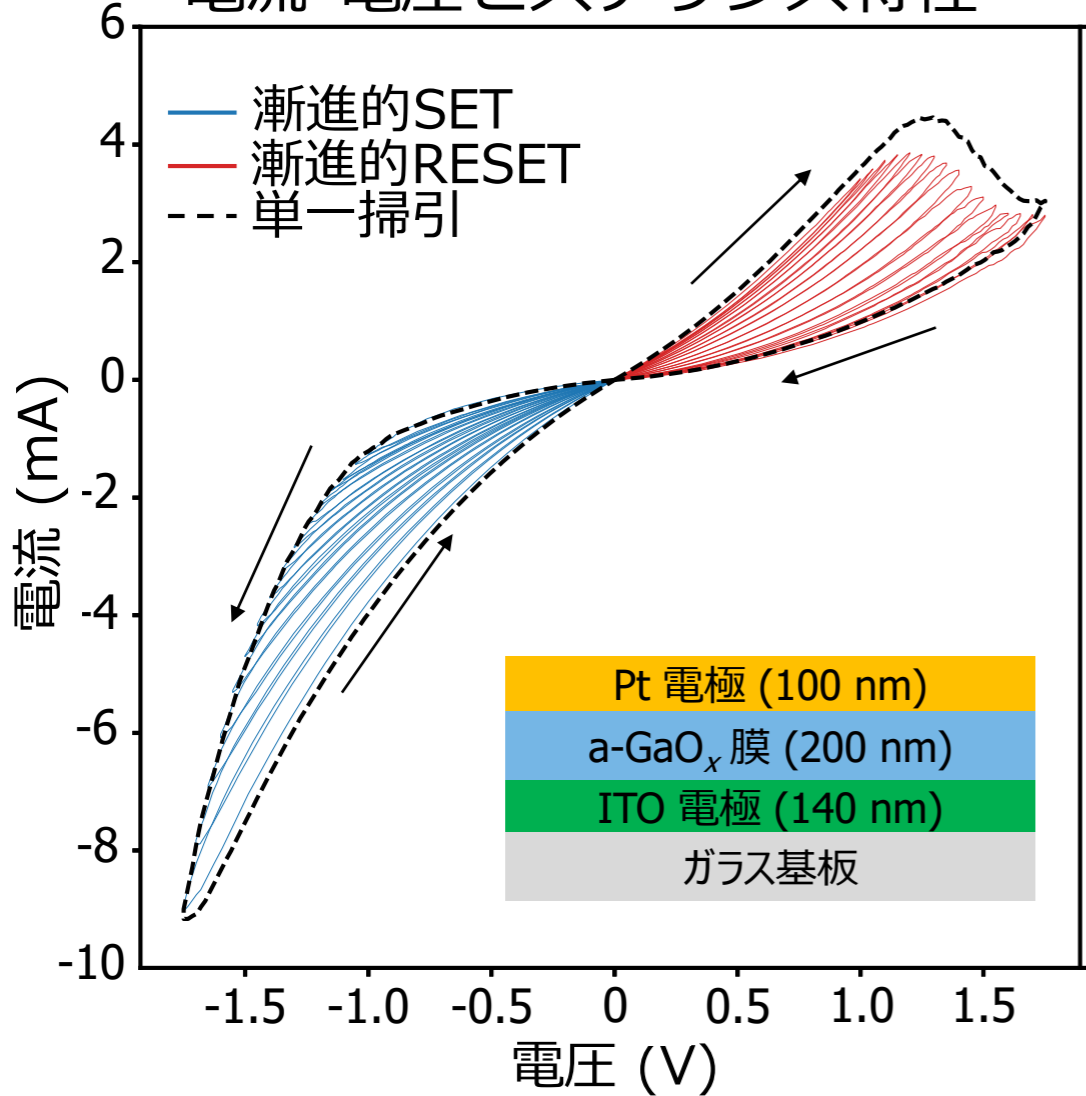
メモリスタとは抵抗変化型メモリである



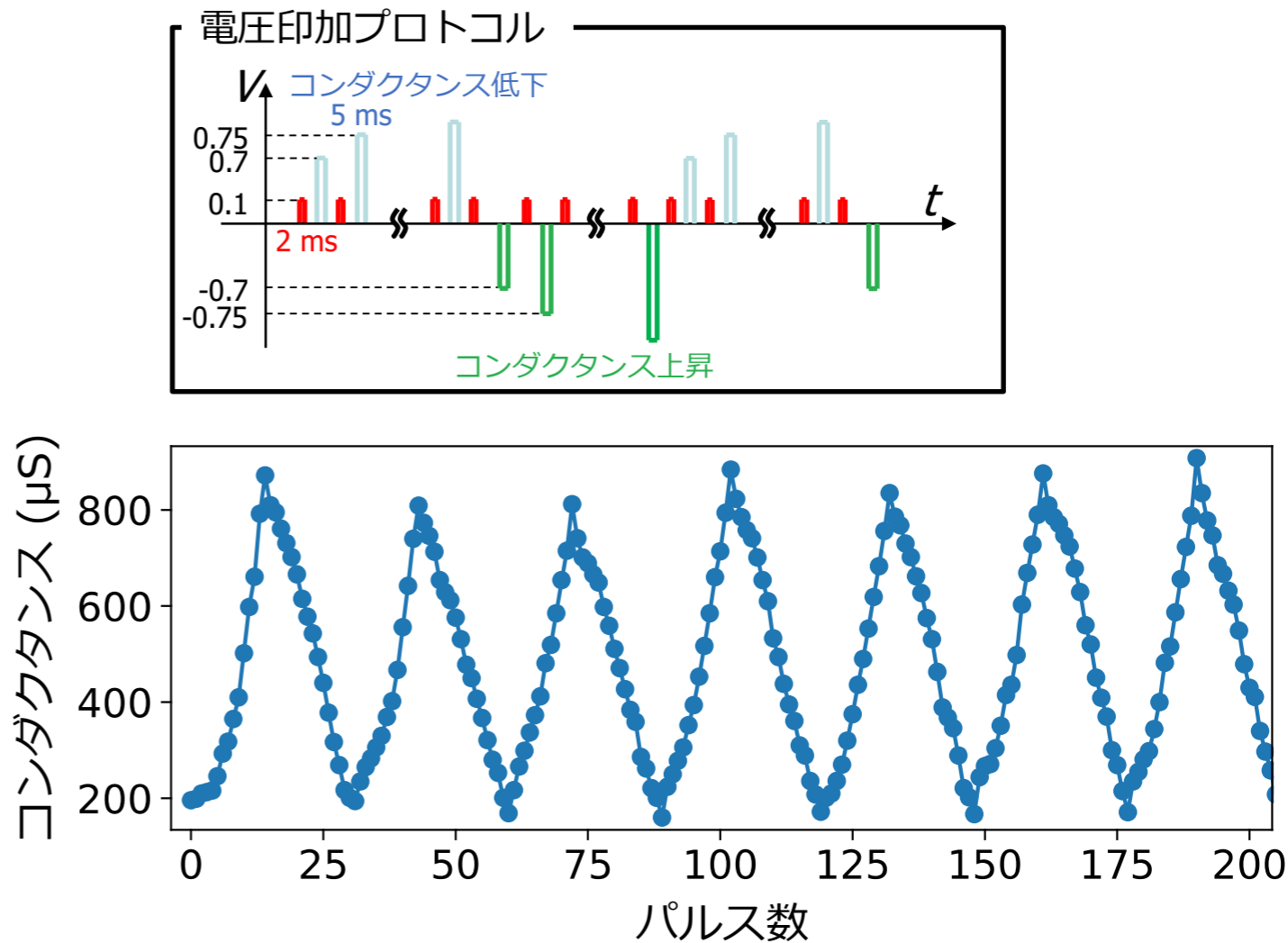
- ある閾値電圧によってドーパントが移動し、抵抗が不揮発に変化するメモリ素子

アモルファスGaO_x (a-GaO_x) メモリスタ

電流-電圧ヒステリシス特性



電圧パルスによるコンダクタンス変化



■ 多値コンダクタンスはAIニューラルネットワークのシナプス重み変化に有効利用可能

従来技術とその問題点

既に実用化されている半導体メモリとして

- 電荷蓄積型フラッシュメモリ (NAND Flash)
- 強誘電体メモリ (FeRAM)

などが挙げられるが、

- 電荷閉じ込めや分極反転に起因する熱劣化
- 温度上昇に伴う保持特性や信頼性の低下
- 高温環境用途での適用制限

といった課題があり、

800 K 級の高温環境での安定動作を必要とする
応用分野では、広範な利用には至っていない

新技術の特徴・従来技術との比較

メモリスタは、電荷蓄積や分極反転に依存せず、材料内部の構造状態によって情報を保持するため、高温環境でも情報が失われにくい

新規メモリスタの特徴

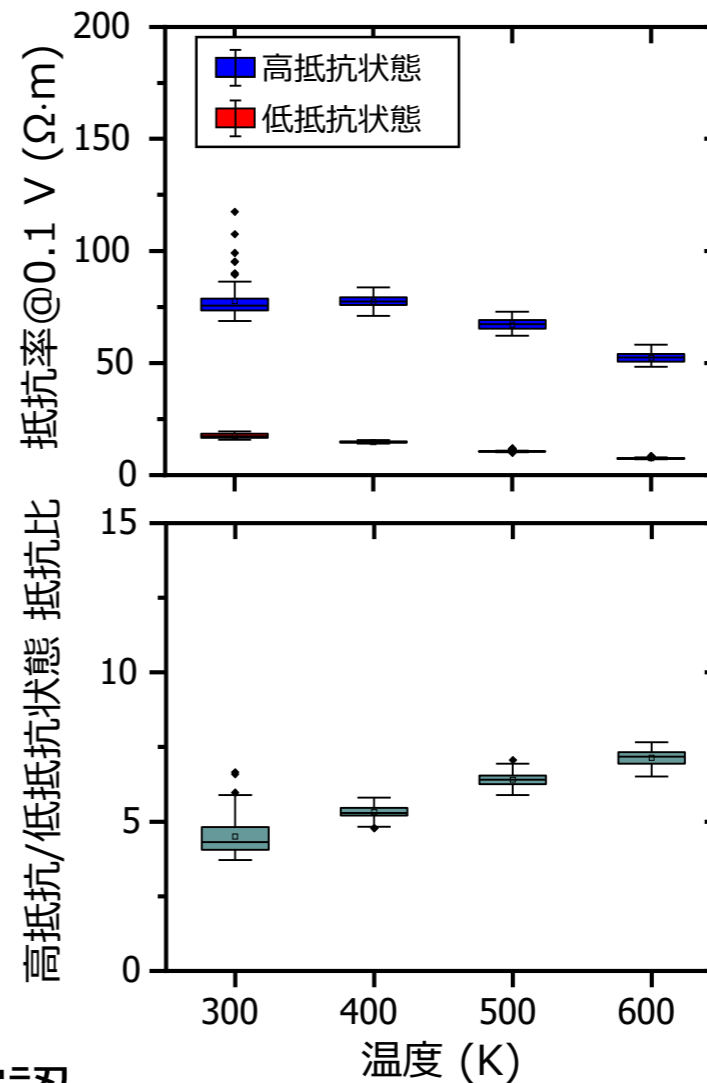
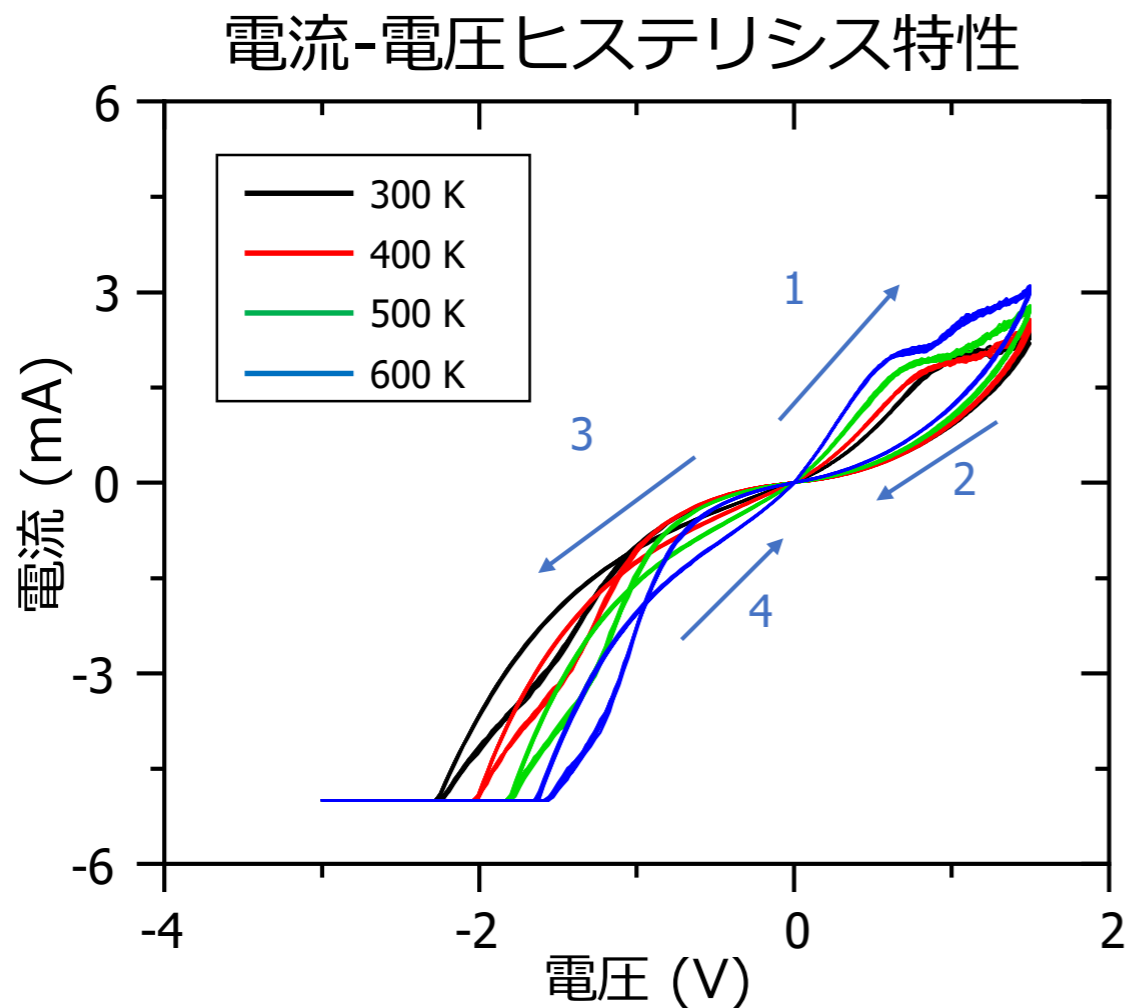
新技術（本研究）

- 非フィラメント型・バルク伝導による抵抗変化
- 高温下でも安定・再現性良好
- CMOS互換・低温プロセス

従来技術

- フィラメント形成／断線に依存する抵抗変化
- 高温での不安定性・ばらつき
- 高温用途への適用が困難

高温で動作する a-GaO_x メモリスタ

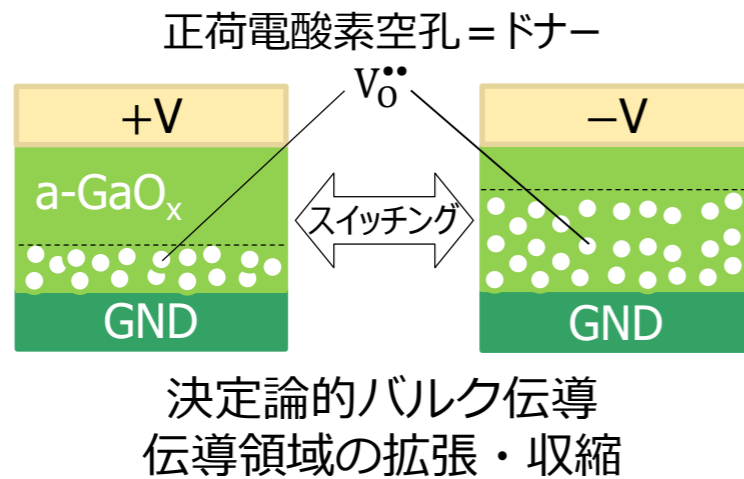


- **600 K** の最高温度でも抵抗変化を確認
- 高抵抗・低抵抗状態ともに抵抗率が低下
→ 半導体的伝導、非フィラメント型の特性と整合

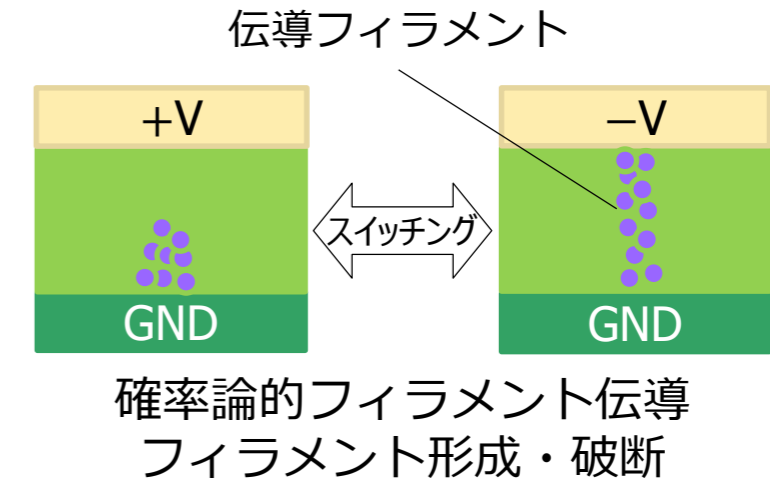
K. Sato, AS et al., Sci. Rep. 13, 1261 (2023).

a-GaO_x系メモリスタの主要特長

- 酸素空孔分布の制御による非フィラメント型抵抗変化

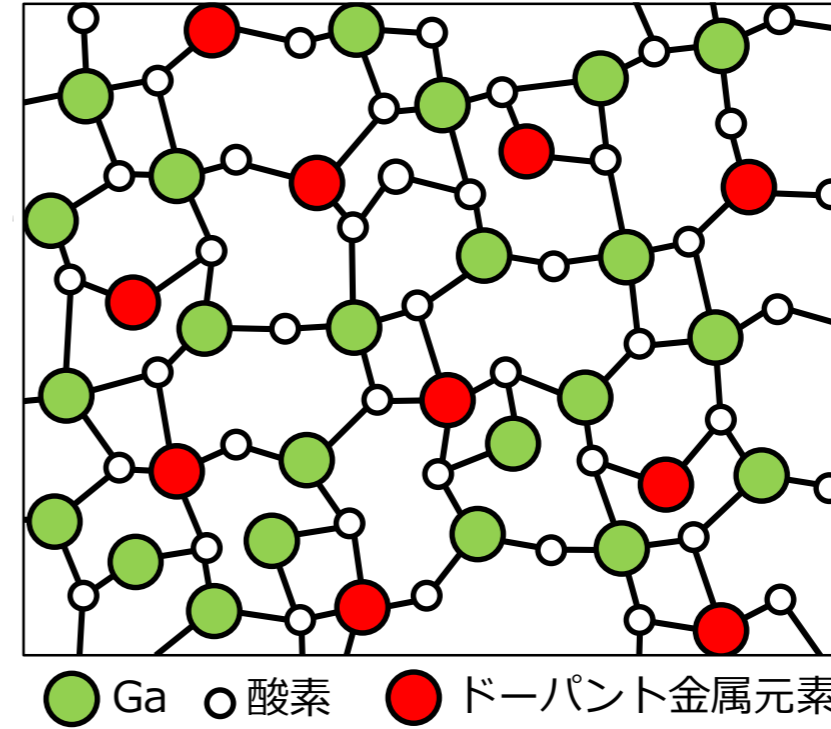
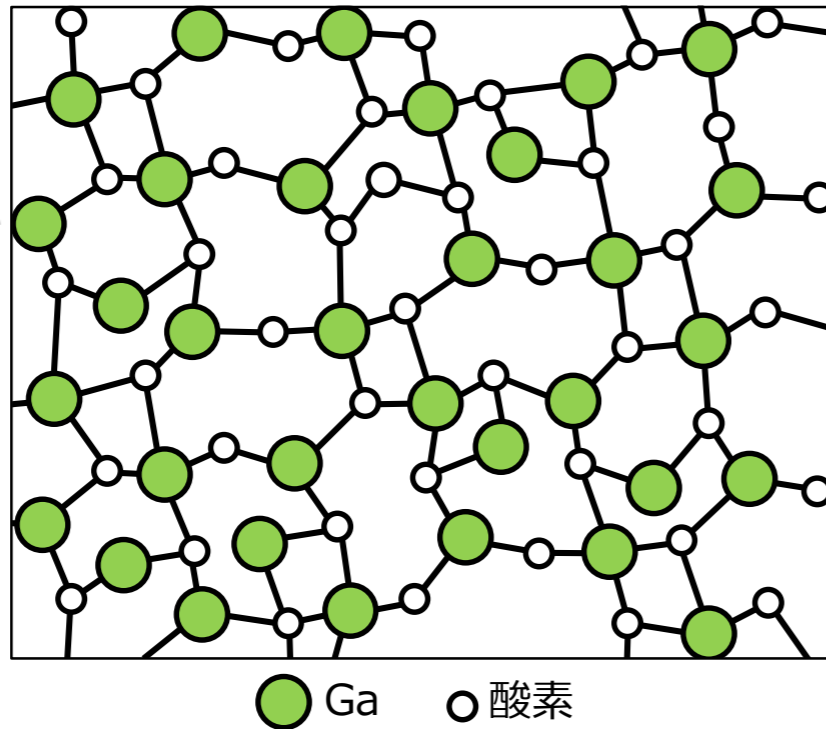


- 伝導フィラメントは高温で自発的に分解



- 結晶化温度の高いアモルファス相
 - 結晶化に起因する高温耐性劣化を抑止
 - CMOS適合・低温成膜プロセスで作製可能
- アナログ/マルチレベル抵抗状態
 - バイナリメモリだけでなくニューロモルフィック素子にも適用可能

さらなる高温動作を実現する技術要素



金属元素ドーピングによるアモルファス構造の熱的安定性の向上

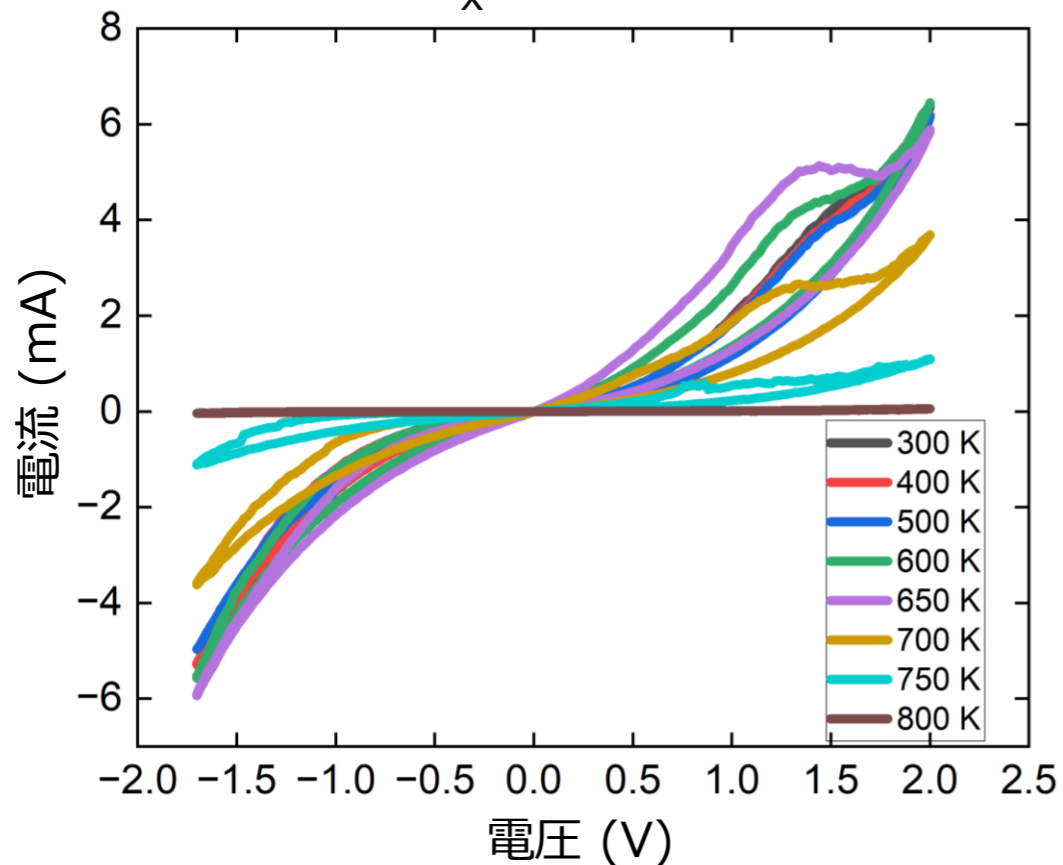
■ ドーパントは

- 1) 金属酸化物とした場合にガリウムと同じ酸化数を有する (M_2O_3 型)
- 2) 酸化ガリウムにおけるガリウムよりも酸素との結合エネルギーが大きい
の条件を満たす金属元素からなる群より選択される1種以上の金属元素

分類	原子番号	元素記号	M ₂ O ₃ 酸化物の 標準生成ギブス自由エネルギー [kJ/mol]	M ₂ O ₃ 酸化物の 標準生成エンタルピー [kJ/mol]
典型 元素	13	Al	-1582.3	(-1675.7)
	31	Ga	-998.3	(-1089.1)
	49	《In》	-830.7	(-925.8)
遷移 金属	21	Sc	-1819.4	(-1908.8)
	24	Cr	-1058.1	(-1139.7)
	26	《Fe》	-742.2	(-824.2)
	39	Y	-1816.6	(-1905.3)
希土類 元素	57	La	-1705.8	(-1793.7)
	58	Ce	-1706.2	(-1796.2)
	59	Pr	ND	-1809.6
	60	Nd	-1720.8	(-1807.9)
	62	Sm	-1734.6	(-1823.0)
	63	Eu	-1556.8	(-1651.4)
	64	Gd	ND	-1819.6
	65	Tb	ND	-1865.2
	66	Dy	-1771.5	(-1863.1)
	67	Ho	-1791.1	(-1880.7)
	68	Er	-1808.7	(-1897.9)
	69	Tm	-1794.5	(-1888.7)
	70	Yb	-1726.7	(-1814.6)
71	Lu	-1789.0	(-1878.2)	

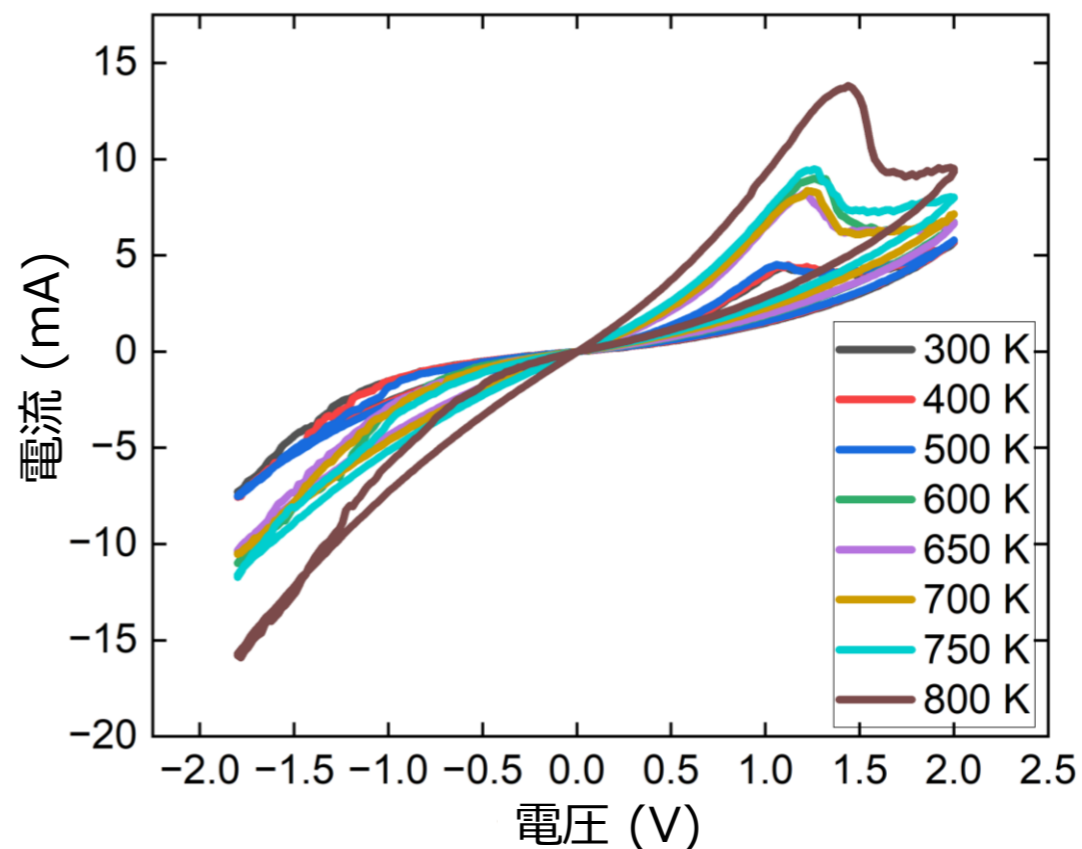
温度依存電流-電圧ヒステリシス特性の比較

a-GaO_x メモリスタ



- 750 K まで抵抗変化を確認
- 700 K から電流値の低下

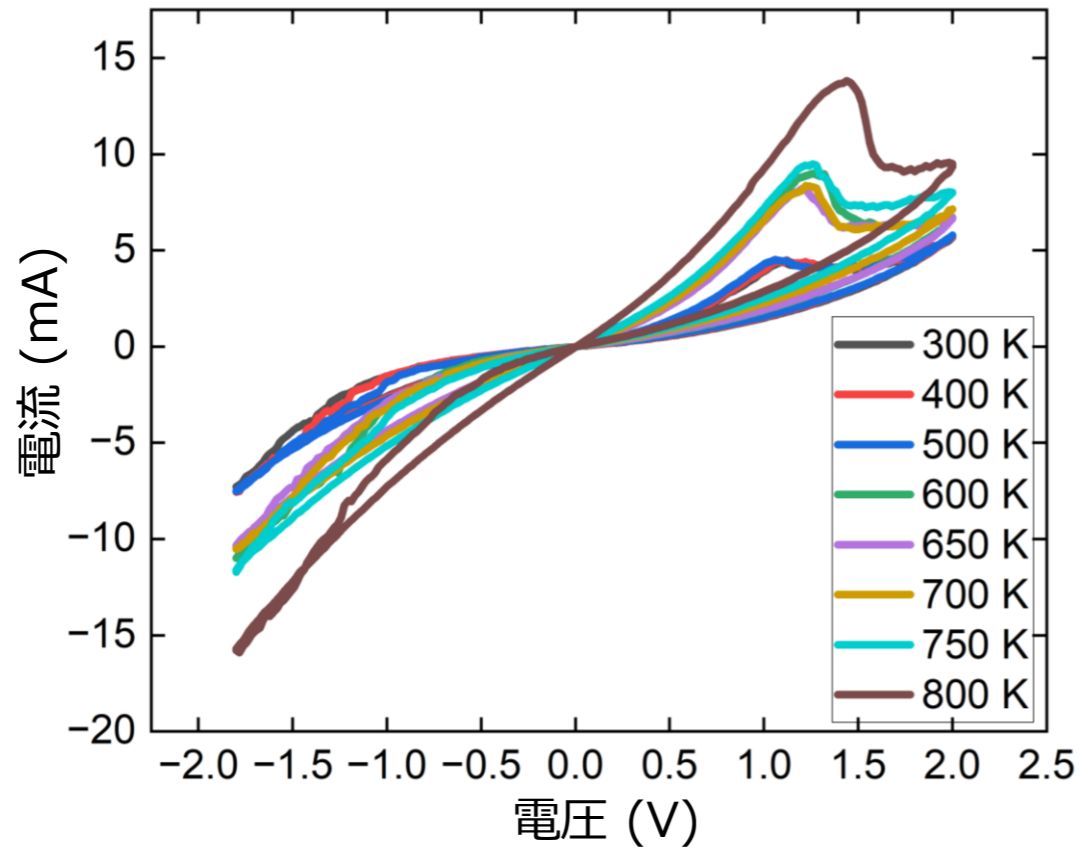
Scドープ a-GaO_x メモリスタ



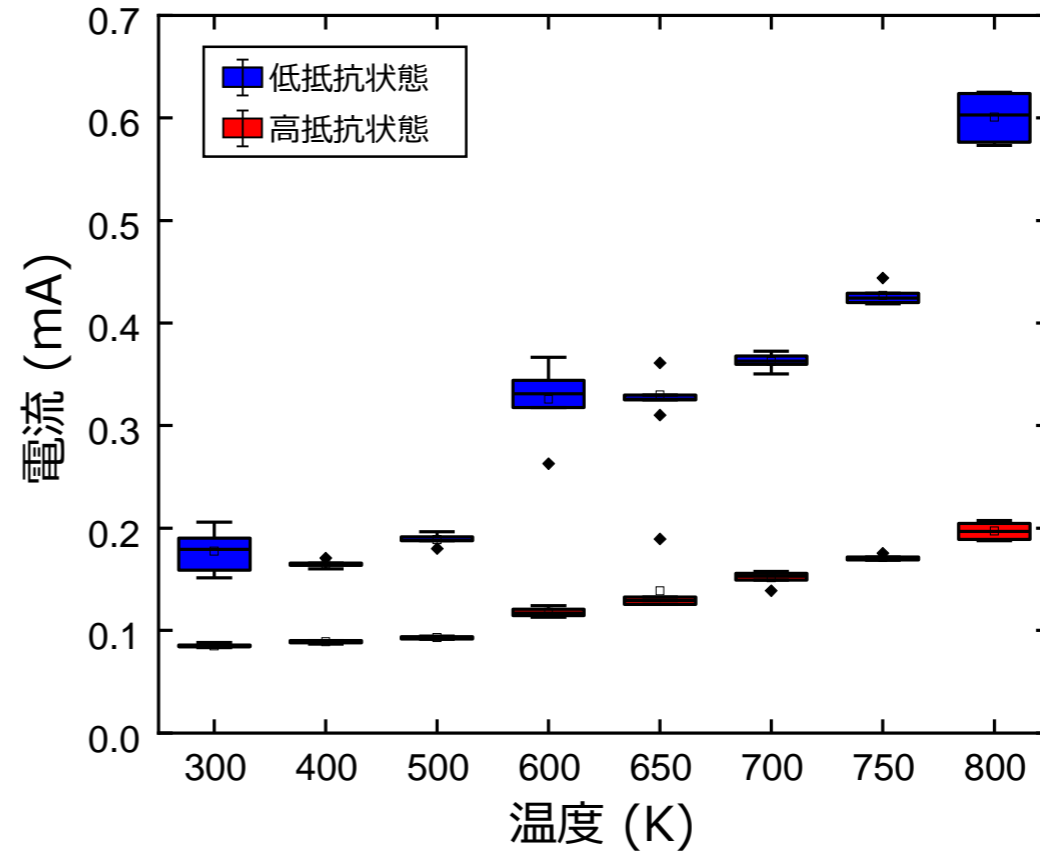
- **800 K まで抵抗変化を実現**

Scドープ a-GaO_x メモリスタの温度特性

電流-電圧ヒステリシス特性



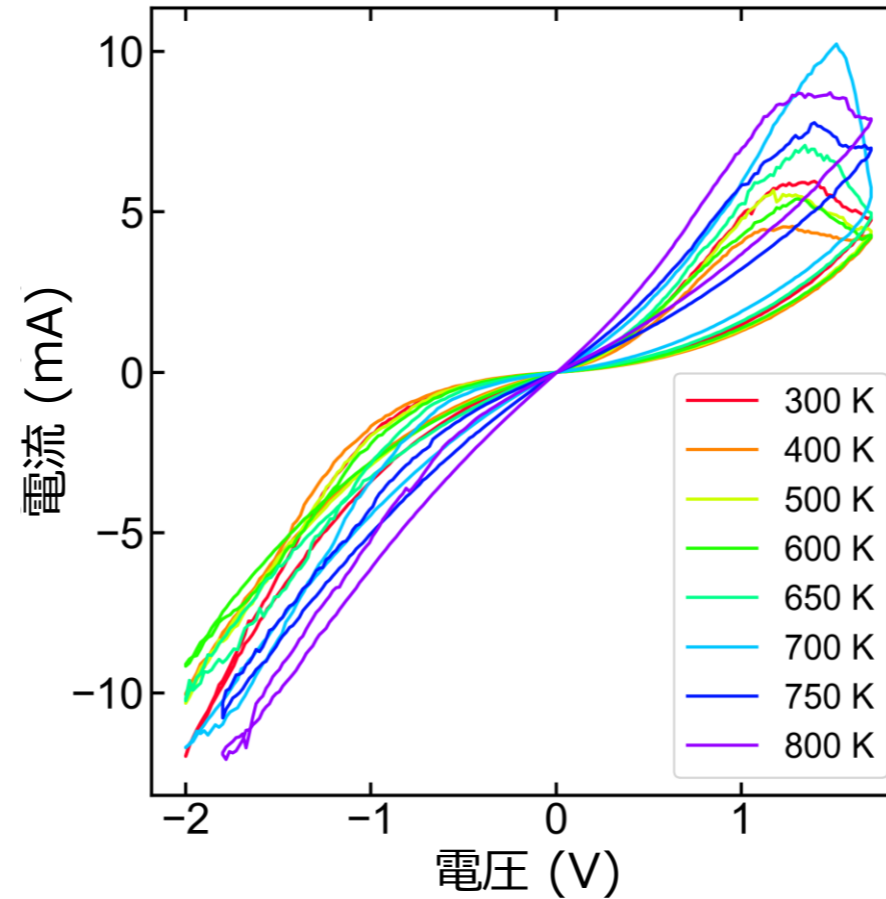
0.1 Vにおける電流値の温度依存性



- 800 K まで抵抗変化を実現
- 高温下であるほど電流値が増加 → 半導体的伝導、非フィラメント型の特徴と整合

Luドープ α -GaO_x メモリスタの温度特性

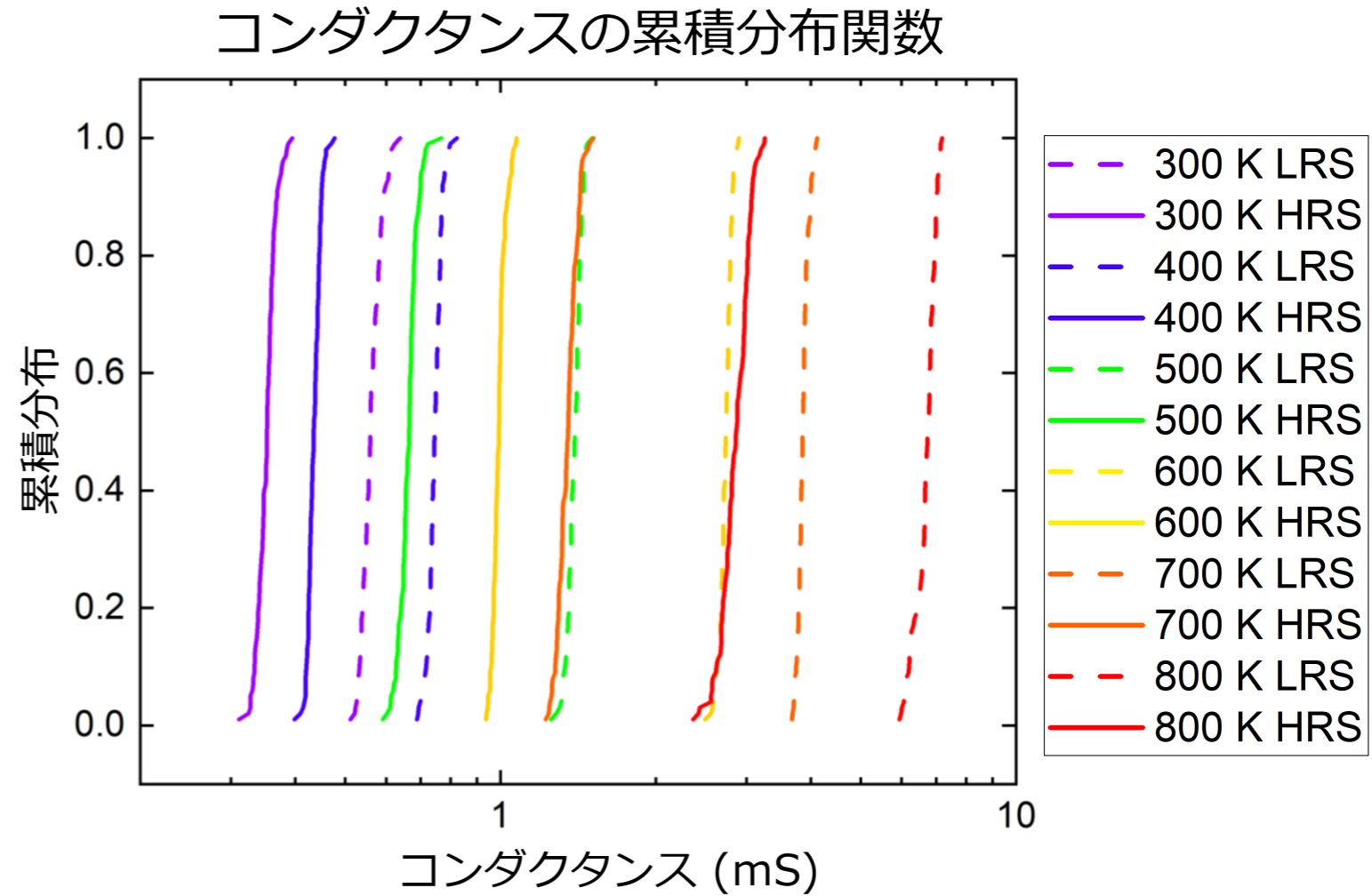
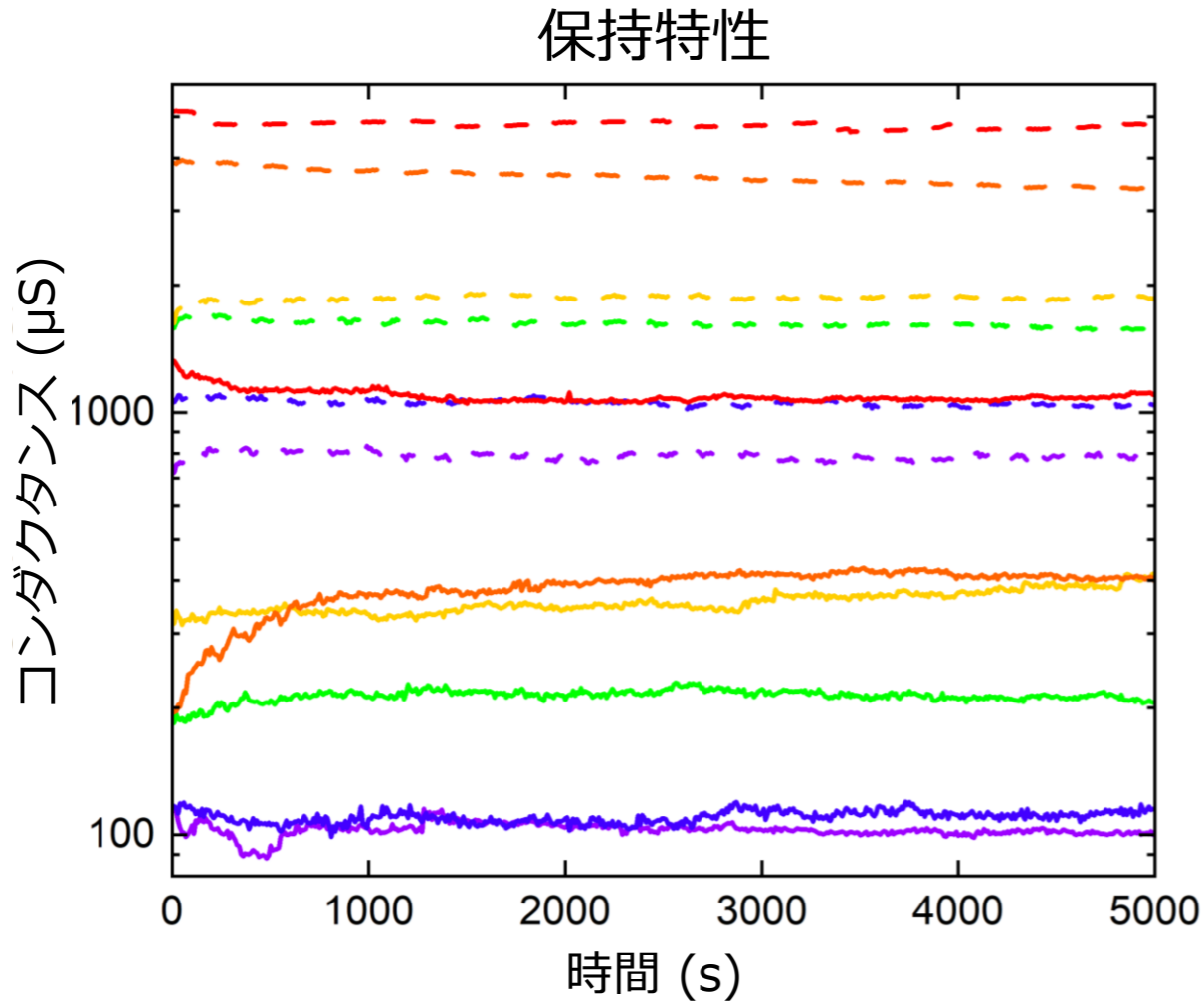
電流-電圧ヒステリシス特性



- 300~800 K の温度範囲で抵抗スイッチングを確認

温度依存保持特性・繰り返し耐性

Scドープ α -GaO_x メモリスタ



Y. Komizo, AS et al., SSDM 2025.

■ 300~800 Kにおいて5000秒、100サイクルの間に2つの抵抗状態を維持

想定される用途

① バイナリメモリ応用（高温対応不揮発メモリ）

高温環境下で安定動作する不揮発メモリ素子

- 高温下でも抵抗変化特性を維持可能
- 電荷蓄積型メモリが適用困難な環境に対応
- CMOS互換プロセスによる既存回路との集積が可能
- 車載エンジン制御・パワーエレクトロニクス周辺
- 原子力・プラント設備の温度モニタリング
- 地熱井掘削・高温センサ近傍メモリ
- 惑星探査など極限環境向け電子機器

② ニューロモルフィックデバイス応用（アナログ／多値メモリ）

多値抵抗状態を利用したシナプス素子

- アナログ／マルチレベル抵抗状態によるシナプス重み表現
- 非フィラメント型動作による高い再現性・安定性
- 高温環境下でのAI演算・学習動作が可能
- 高温環境対応AIアクセラレータ
- エッジAI・インメモリコンピューティング
- 自律制御・異常検知システム

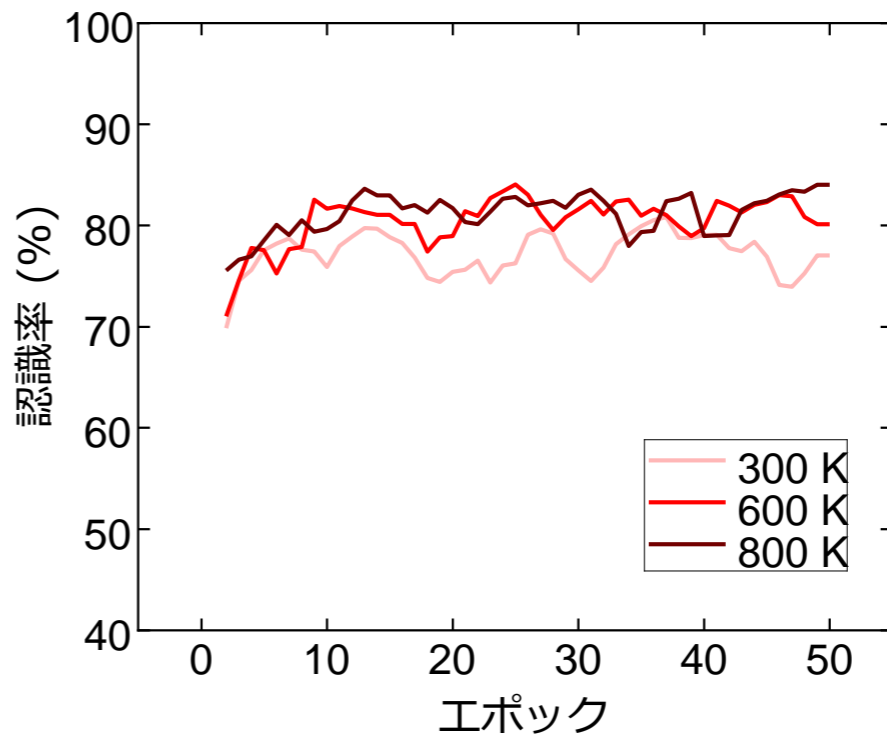
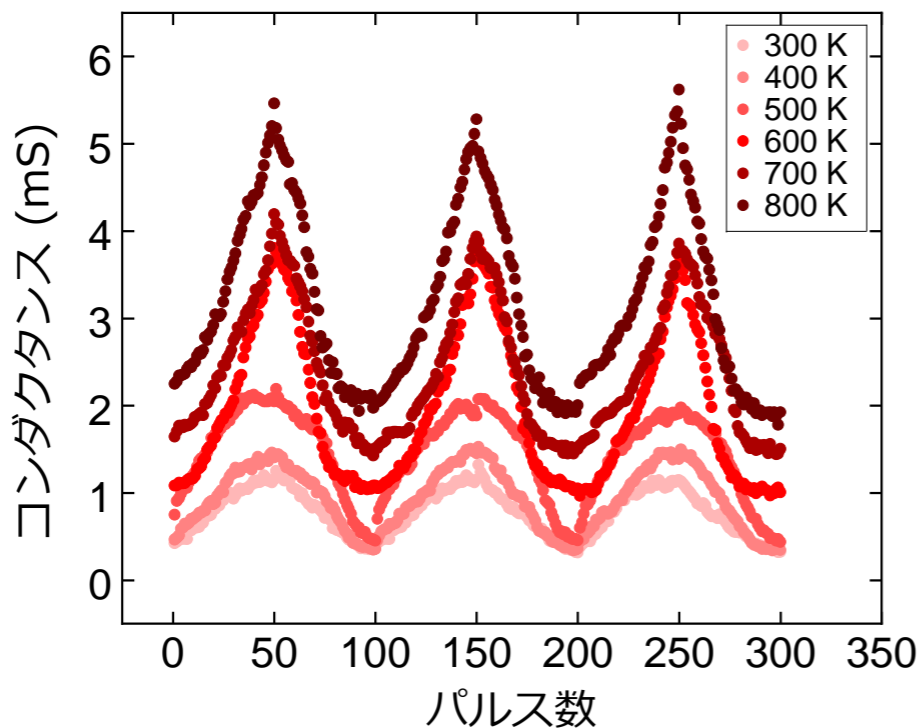
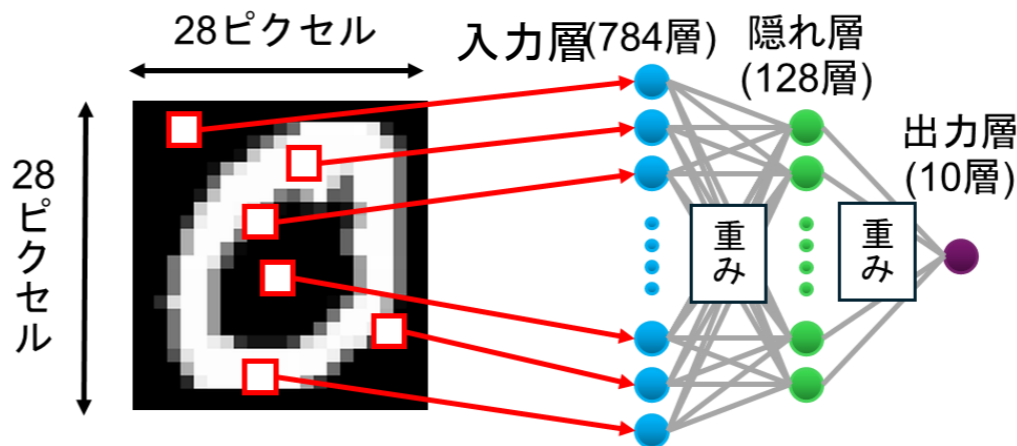
③ その他の応用可能性（拡張用途）

高温耐性 × 抵抗可変性を活かした応用

- 高温動作可能な可変抵抗素子・アナログ回路部品
- 環境耐性が求められる宇宙・防災・インフラ監視デバイス
- 放射線・高温耐性を活かした特殊環境用電子回路

高温でのMNIST画像認識シミュレーション

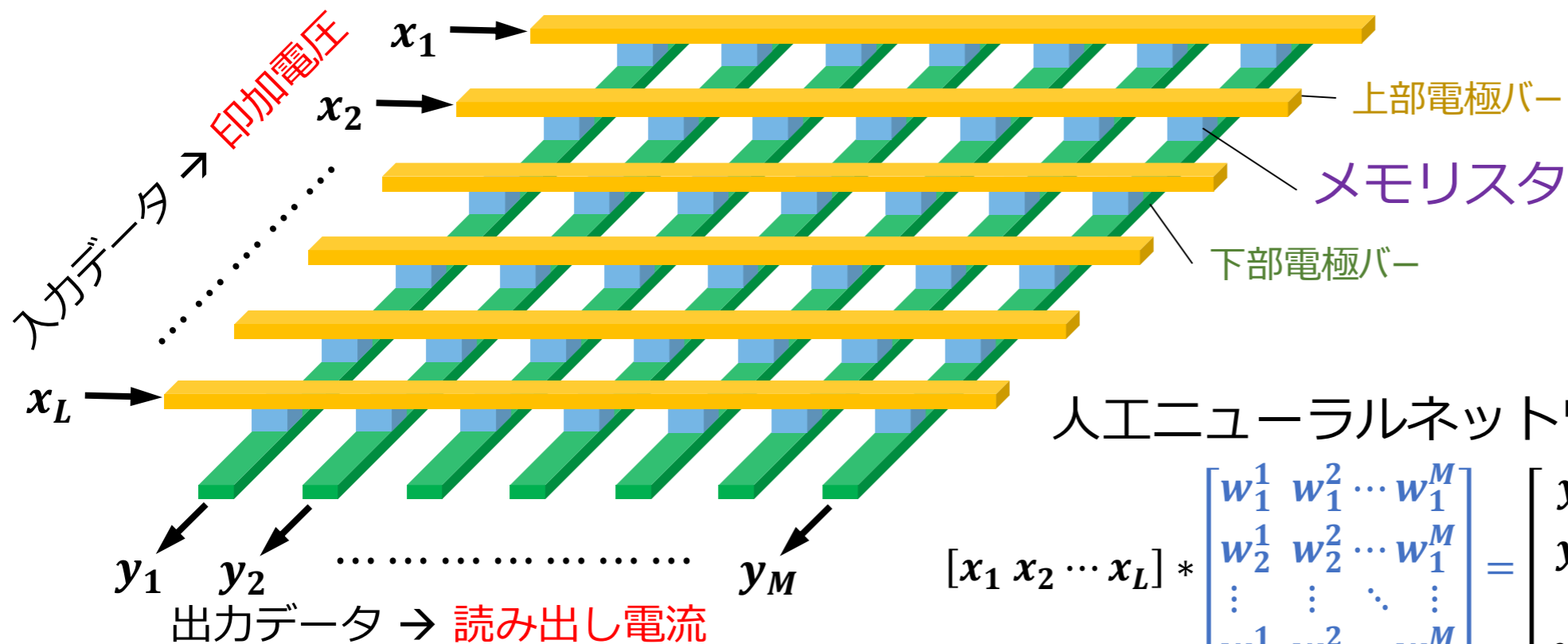
- 手書き数字を用いた機械学習
- 人工シナプス素子としての学習・認識性能の検証



Y. Komizo, AS et al., SSDM 2025.

- 線形的なコンダクタンス変調により、どの温度においても認識率75~80%を達成

クロスバーアーキテクチャ



人工ニューラルネットワークにおける積和演算

$$[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_L] * \begin{bmatrix} w_1^1 & w_1^2 & \dots & w_1^M \\ w_2^1 & w_2^2 & \dots & w_2^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_L^1 & w_L^2 & \dots & w_L^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 = w_1^1 x_1 + w_1^2 x_2 \dots + w_1^L x_L \\ y_2 = w_2^1 x_1 + w_2^2 x_2 \dots + w_2^L x_L \\ \vdots \\ y_M = w_M^1 x_1 + w_M^2 x_2 \dots + w_M^L x_L \end{bmatrix}$$

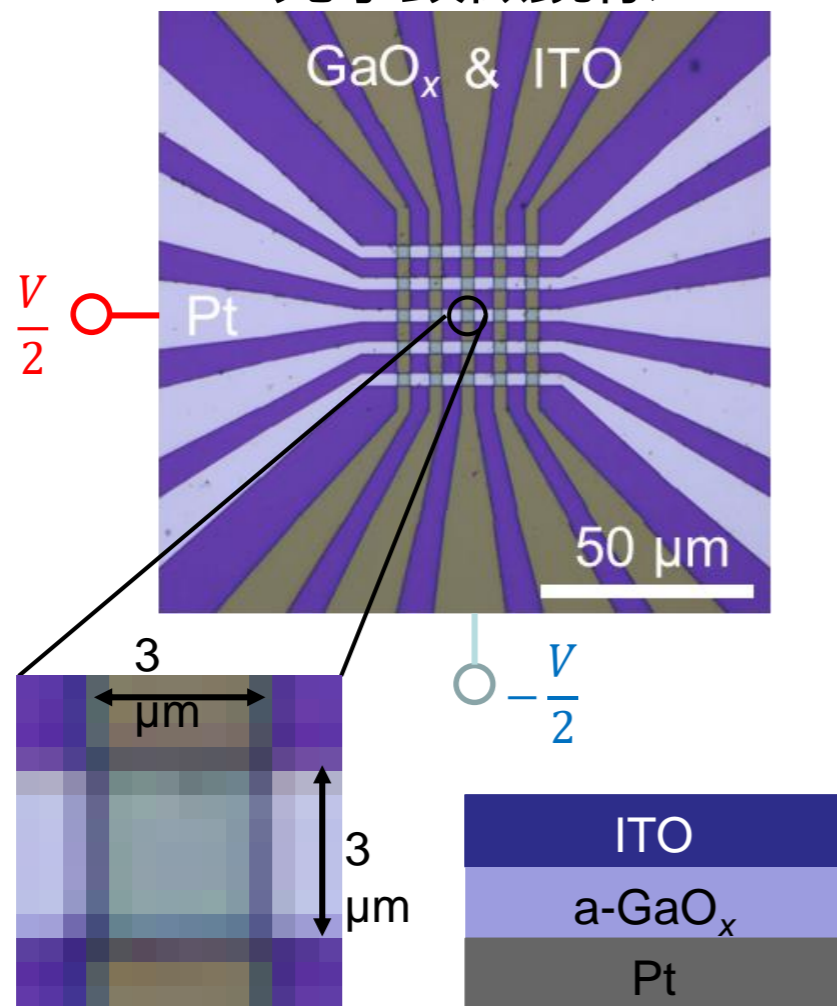
電圧 × コンダクタンス = 電流

クロスバー構造の採用により

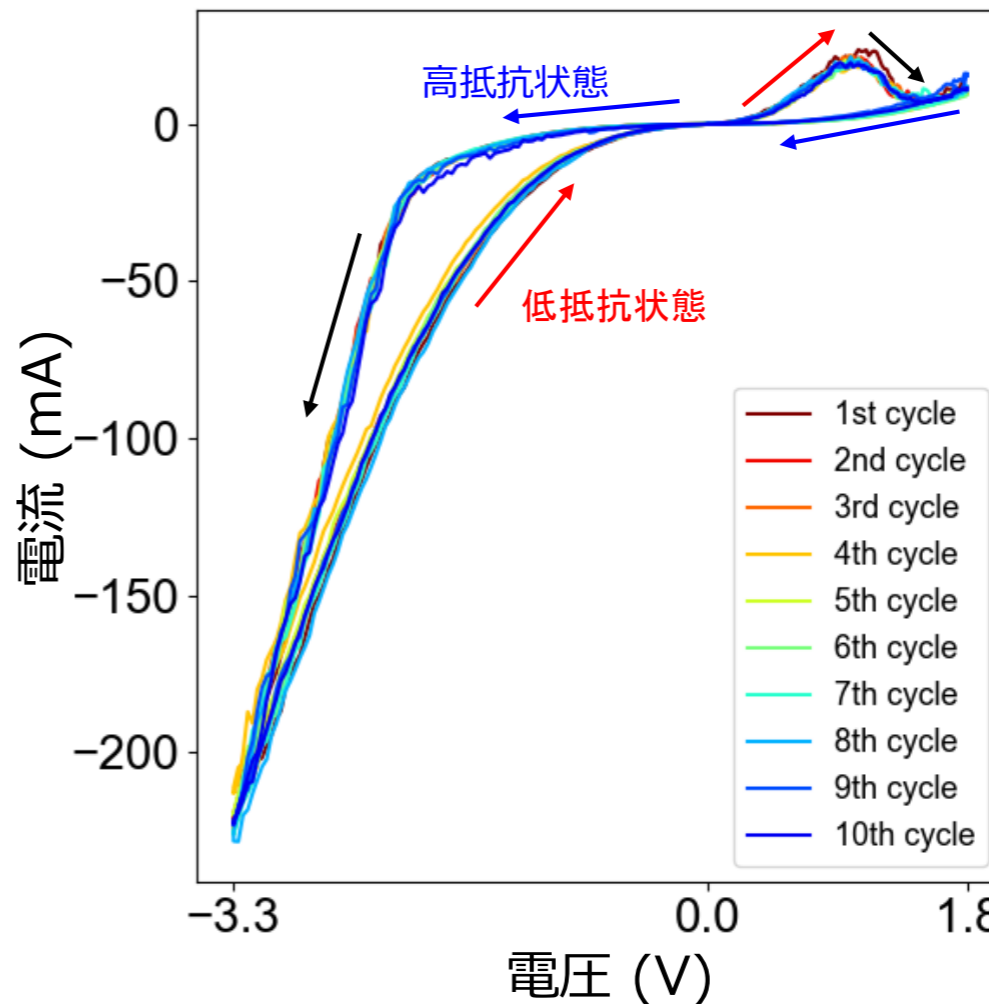
- ハードウェア上で積和演算が実行可能
- メモリスタ素子の集積化が可能

a-GaO_x 5×5 クロスバーアレイメモリスタ

光学顕微鏡像



電流-電圧特性



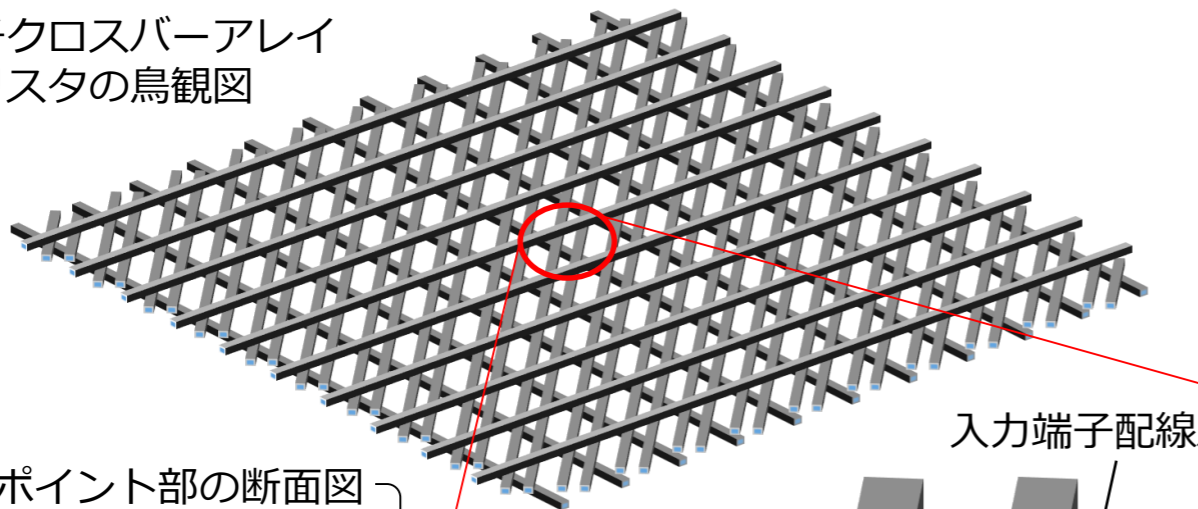
N. Masaoka, AS et al., Jpn. J. Appl. Phys. 62, SC1035 (2023).
M. Joko, AS et al., Jpn. J. Appl. Phys., 59, SMMC03 (2020).

- a-GaO_x メモリスタでクロスバーアレイを実現し抵抗スイッチング特性を確認

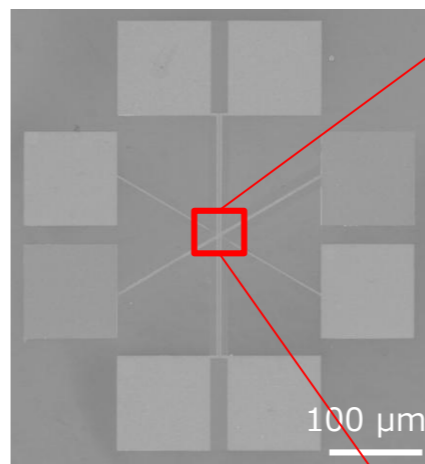
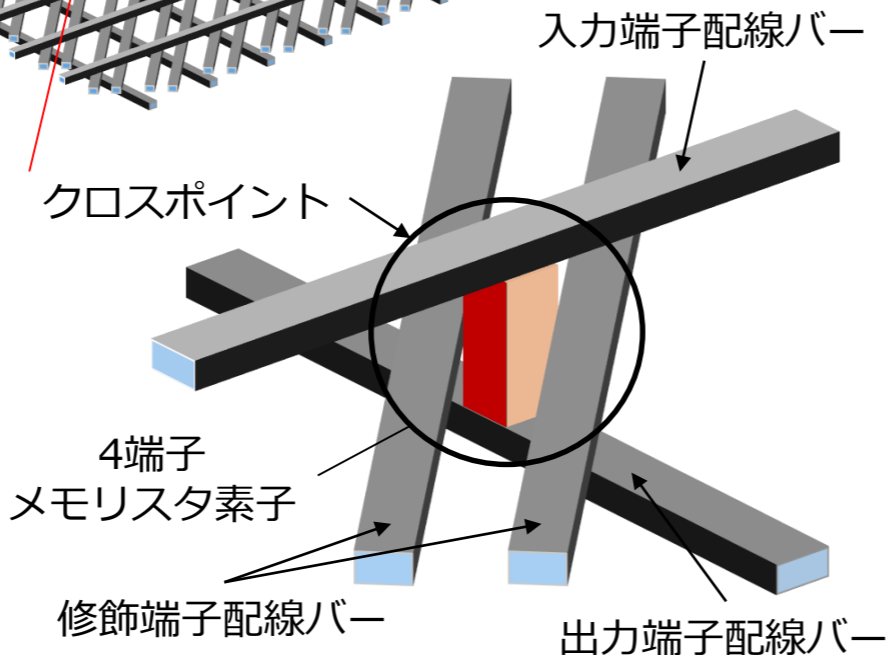
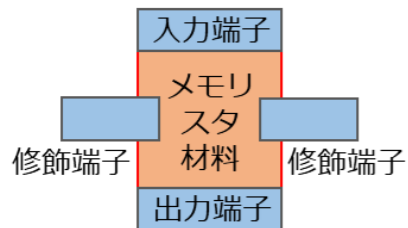
4端子ヘテロシナプティックプラットフォーム

- 入出力バー + 修飾バー × 2 の4端子メモリスタ構造
- 酸素空孔分布を入力端子・修飾端子の双方で変調
- 多入力多出力のヘテロシナプス機能を実現

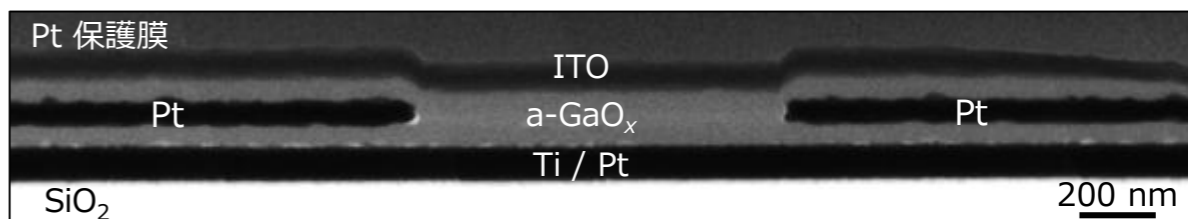
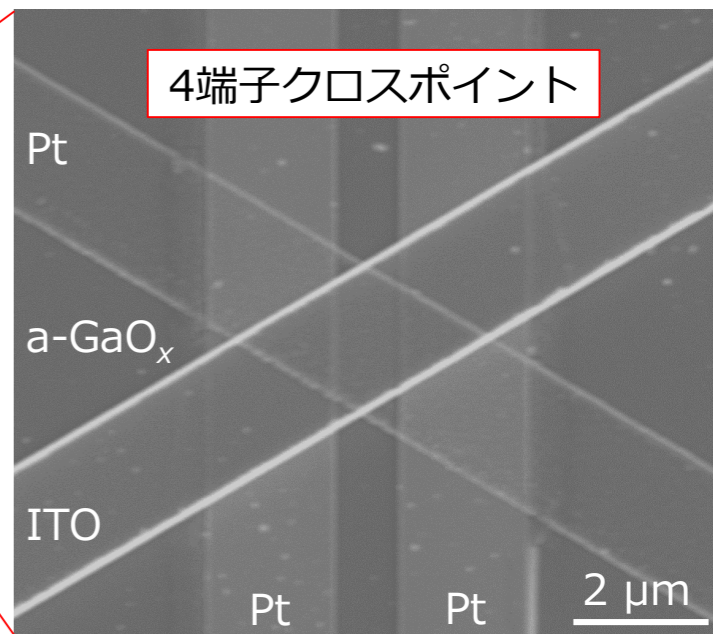
4端子クロスバーアレイ
メモリスタの鳥観図



クロスポイント部の断面図
3次元空間で4端子
に囲まれた構造



走査電子顕微鏡像



4端子クロスポイントの断面透過電子顕微鏡像

N. Yamashita, AS et al., MEMRISYS 2024.

実用化に向けた課題

- 高温環境下での抵抗変化動作は実証済みだが、長時間動作時の信頼性およびデバイス間ばらつきの定量的評価は今後の課題である
- 高温条件下での繰り返し動作・保持特性に関するデータを蓄積し、実際の応用環境に適した動作条件の最適化を進める必要がある
- クロスバー構造を有するメモリスタの基本動作は実証済みだが、実用化に向けては、さらなる高密度集積化および大規模アレイ化に対応した設計・プロセス技術の確立が求められる
- 多値抵抗状態の制御精度および再現性を、大規模集積回路レベルで確保する技術の確立が必要である

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	<ul style="list-style-type: none"> ■ 金属ドーブ α-GaO_x 薄膜の材料設計およびデバイス構造設計を完了 ■ 酸素空孔分布制御による非フィラメント型抵抗変化機構を確立 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 研究成果の学会・論文発表
現在	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高温（～800K）環境下における抵抗変化動作を実証 ■ 多値抵抗状態および再現性あるスイッチング特性を確認 ■ クロスバー構造による集積動作のプロトタイプを実現 ■ 高放射線環境下における抵抗変化動作を検証中 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 研究成果の学会・論文発表 ■ 企業との技術対話・情報提供
～2年後 (短期)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 中規模クロスバー構造の作製 ■ 高温条件下での保持・繰り返し動作特性の体系的評価 ■ デバイス間ばらつきの定量化と動作条件の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ■ デモンストレーション実施 ■ JST等の実証型研究事業への応募
～5年後 (中期)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高温対応メモリスタの主要特性（信頼性・多値制御精度）の評価 ■ クロスバー構造の高密度化・大規模アレイ化設計の実現 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 評価基礎データの提供 ■ 企業向けサンプル提供・共同評価
～8年後 (長期)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高温環境下での性能向上および長期安定性の確立 ■ バイナリメモリ応用およびニューロモルフィック応用への適用指針を確立 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高温環境対応メモリ/AIデバイスとしての社会実装 ■ 試験サービス・実装検証フェーズへの展開

企業への期待

- **大規模クロスバー集積化や量産プロセス検討**に関する課題については、企業が有する**プロセス統合・設計最適化技術**との連携により解決可能と考えている
- 実用化に向け、**デバイス評価、回路設計、システム検証**の各段階で強みを持つ企業との**役割分担型の共同研究**を希望する
- **高温環境下での信頼性が要求される次世代メモリ、エッジAI、特殊環境向け電子機器**を検討する企業に対し、本技術の導入は有効である

企業への貢献、PRポイント

- 高温下でも**安定に動作する不揮発メモリおよび多値デバイス**の実現が可能であり、企業の**新規応用開拓**に貢献可能
- 企業ニーズに応じた**追加実験・評価**（**高温信頼性、集積動作、回路接続評価**等）を実施することで、実用化に必要な技術的裏付けを**共同で構築可能**
- 本格導入に際しては、デバイス動作原理、材料設計、プロセス条件、評価手法に関する**技術的知見を提供し、企業内での試作・実装への技術指導・技術支援が可能**

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : メモリスタおよびメモリスタアレイ
 - 出願番号 : 特願2025-130824
 - 出願人 : 大阪大学
 - 発明者 : 酒井 朗
-
- 発明の名称 : メモリスタ、それを備えた半導体素子およびメモリスタを備えたアレイシステム
 - 出願番号 : 特願2020-2148070
 - 出願人 : 大阪大学
 - 発明者 : 林 侑介、藤平哲也、酒井 朗

お問い合わせ先

大阪大学
共創機構 イノベーション戦略部門 知的財産室

<TEL> 06-6879-4861

<e-mail> tenjikai@uic.osaka-u.ac.jp