

2025年度

プロトン感応性酸化物を用いたニューロモルフィック素子への応用補助事業に関する

調査研究報告書

補助事業番号

2025M-388

補助事業名

2025年度プロトン感応性酸化物を用いたニューロモルフィック素子への応用補助事業

補助事業者名

大阪工業大学 工学部 電子情報システム工学科 ナノマテリアル研究室 小池 一步

JKA Social Action  
競輪とオートレースの補助事業

 **KEIRIN.JP**  
KEIRIN Official Website

公益財団法人 JKA  
補助事業完了の  
お知らせ

 **CYCLE**  
JKA Social Action  
競輪とオートレースの補助事業

## 目次

1. 研究の概要	1
2. 研究の目的と背景	1
3. 研究内容	1
4. 本研究が実社会にどう活かされるか—展望	7
5. 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ	7
6. 本研究にかかわる知財・発表論文等	8
7. 補助事業に係る成果物	9
8. 事業内容についての問い合わせ先	9

## 1 研究の概要

Society 5.0社会の進展に伴い、人工知能アルゴリズムを活用した社会サービスが急速に拡大している。一方で、データ流通量の増大により情報処理基盤の消費電力が急増しており、低消費電力で動作する新たな情報処理デバイスの開発が強く求められている。

本研究では、プロトン感応性を有する遷移金属酸化物である酸化モリブデン( $\text{MoO}_3$ )および酸化タングステン( $\text{WO}_3$ )の高品質薄膜に着目し、低電圧でのプロトン注入によって生じる電気抵抗率の可逆的変化を利用したニューロモルフィック素子の実現可能性を検討する。

具体的には、分子線エピタキシー法により作製した高品質薄膜を対象に、プロトン注入時の抵抗変化量、応答速度、保持特性を調査するとともに、プロトンゲート電界効果トランジスタ素子へ展開し、リザーバコンピューティングや脳型コンピューティングへの応用を目指す。

## 2 研究の目的と背景

近年、AI技術の普及によってデータセンターの電力消費は急速に増加しており、情報処理デバイスの省エネルギー化は喫緊の課題となっている。特に、1 V以下の超低電圧で動作し、かつ電気抵抗率を可逆的に制御できる材料・デバイスは、次世代の低消費電力演算技術として注目されている。

$\text{MoO}_3$ および $\text{WO}_3$ は、多様な結晶構造と物性を有する遷移金属酸化物半導体であり、プロトン注入により絶縁体的状態から金属的状态への相転移や、エレクトロクロミズムといった顕著な物性変化を示すことが知られている。申請者はこれまで、これらの薄膜を分子線エピタキシー法により結晶成長させ、プロトン注入による物性変化を調査してきた。

従来の関連研究では、多結晶薄膜やアモルファス薄膜を対象とした例が多かったが、単結晶性の高い高品質薄膜を用いることで、材料本来の物性を最大限に引き出し、動作機構の本質的理解や新規デバイス応用につながることを期待される。

本研究の目的は、 $\text{MoO}_3$ および $\text{WO}_3$ 高品質薄膜におけるプロトン注入応答を明らかにし、計算資源および消費電力を大幅に低減できるニューロモルフィック素子の実現可能性を示すことである。

## 3 研究内容

本研究では、以下の3項目に取り組んだ。

### (1) $\text{MoO}_3$ および $\text{WO}_3$ 薄膜の結晶成長と電気的特性評価

分子線エピタキシー法を用いて、 $\text{MoO}_3$ および $\text{WO}_3$ の高品質薄膜を作製する。得られた薄膜について、結晶構造、表面形態、電気的特性を評価し、デバイス応用に適した成膜条件および基礎物性を明らかにする。

図1と図2に本事業で使用した分子線エピタキシー装置の内部構成と写真とLSAT基板上に成膜した $\text{MoO}_3/\text{WO}_3$ 薄膜のX線回折パターンをそれぞれ示す。試料構造や成長条件を最適化し、デバイス加工するための薄膜を作製した。

- 超高真空中での高品質な薄膜作製
- 数nmの精密な膜厚制御
- 成長中のリアルタイム観察

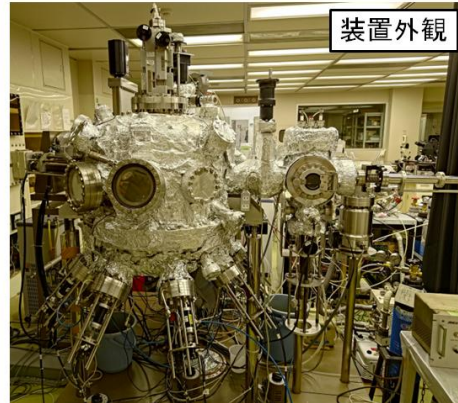
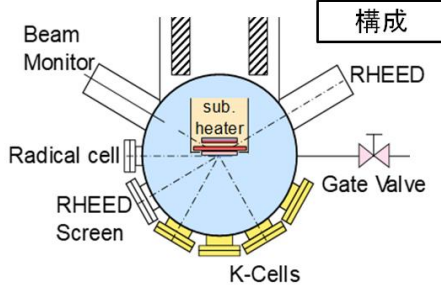


図1 本事業で使用した分子線エピタキシー装置の内部構成と写真

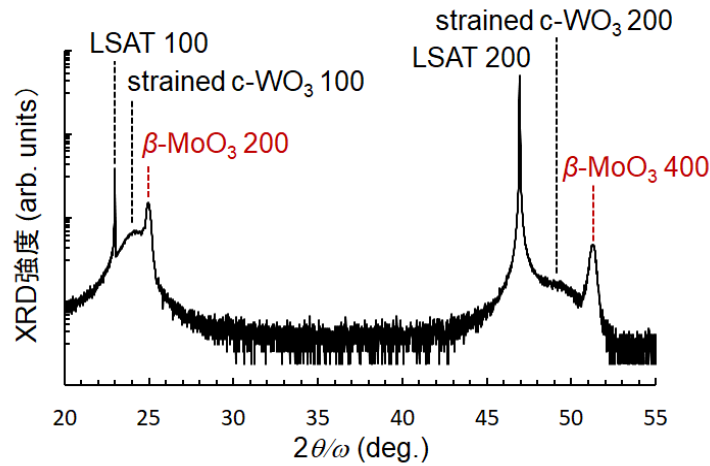
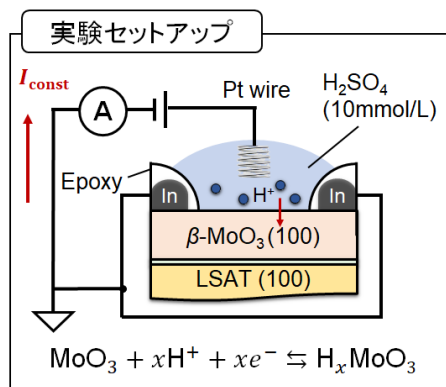


図2 LSAT基板上に成膜したMoO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>薄膜のX線回折パターン

## (2) プロトン注入による電気抵抗率の変化量と応答速度の調査

作製した薄膜に対して低電圧でプロトンを注入し、電気抵抗率の変化量、応答速度、保持特性を評価する。これにより、プロトン注入による可逆的な抵抗変化の制御性を明らかにし、ニューロモルフィック動作に必要な揮発性・履歴特性の有無を検証する。

図3、図4に硫酸水溶液を用いた測定セットアップとプロトン注入電荷密度に対する抵抗率の変化とNafionを固体電解質として用いたデバイスの測定セットアップとSET/RESET動作をそれぞれ示す。硫酸水溶液を用いたプロトンの挿入では、2.8 mC/cm<sup>2</sup>の電荷密度で約5桁の抵抗率変化が見られた。しかし、MoO<sub>3</sub>薄膜が硫酸水溶液に対してエッチング耐性が少ないことから、固体電解質であるNafionを採用した。ゲート電圧の印加によるプロトン挿入によって、チャンネルコンダクタンスが増大すること、ヒステリシス特性(メモリー保持特性)を有することが明らかになった。



鶴山 ほか, 材料研究会, 2023.7.29, 大阪公立大学  
 鶴山 ほか, 信学技報, ED2025-15(2025-06).  
 鶴山 ほか, 第72回応物, 2025.3.15, 東京理科大

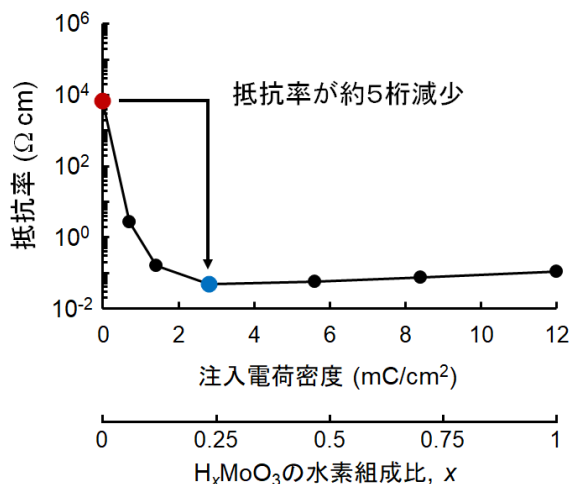
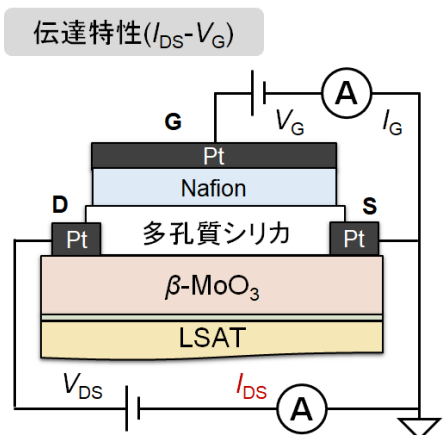


図3 硫酸水溶液を用いた測定セットアップとプロトン注入電荷密度に対する抵抗率の変化



- $I_{DS} - V_G$  曲線はヒステリシスを示した
- SET/RESET動作で,  $V_G = 0$  V (読み取り電圧) における  $I_{DS}$  に約3桁の差を与えた

鶴山 ほか, 材料研究会, 2025.11.29, 京都工芸繊維大学.

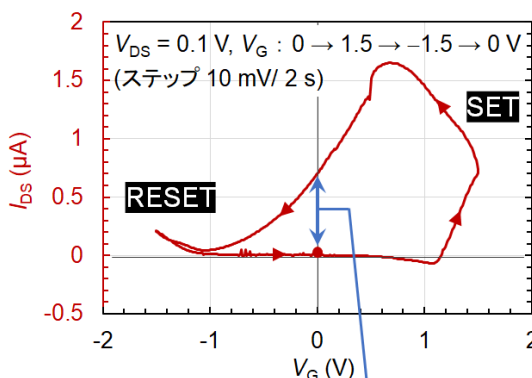
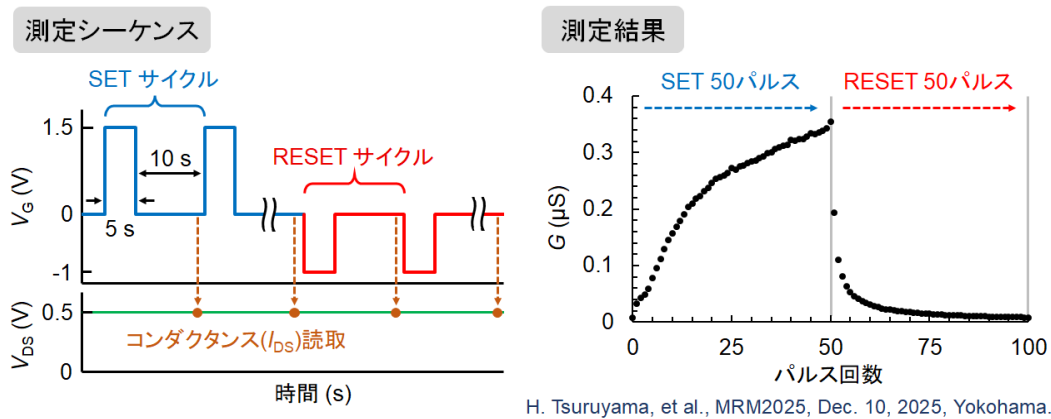


図4 Nafionを固体電解質として用いたデバイスの測定セットアップとSET/RESET動作

### (3) プロトンゲートFET素子の加工とニューロモルフィック動作の検証

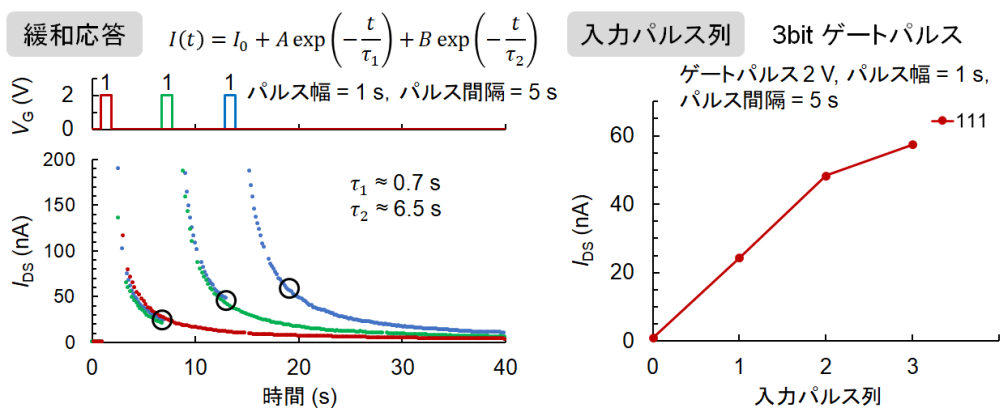
MoO<sub>3</sub>およびWO<sub>3</sub>薄膜をチャンネル材料とするプロトンゲートFET素子を試作し、入力信号に対する応答特性を評価する。さらに、抵抗変化の時間応答や履歴特性を活用し、リザーバコンピューティングや脳型コンピューティングへの応用可能性を実験的に検証する。

図5、図6にSET/RESETのパルス回数に対するチャンネルコンダクタンス変調とプロトンゲートFETの時間応答特性(短期記憶性)を示す。ゲートパルスによるSET動作を繰り返すことで、コンダクタンスが緩やかに増加することが分かった。一方、RESET動作では数サイクルでコンダクタンスが大きく減少することも明らかになった。シナプス素子への応用に向けて、より線形的な応答が必要であるため、今後の検討課題となった。続けて、3ビットのゲートパルスを与えた際のコンダクタンスの出力応答も調査し、短期記憶性を有することを明らかにした。



- パルスに応じた段階的なコンダクタンス変調ができた ➡ シナプス素子への応用

図5 SET/RESETのパルス回数に対するチャネルコンダクタンス変調



- 入力に応じて緩やかに減衰する応答が確認された ➡ 短期記憶性

図6 プロトンゲートFETの時間応答特性(短期記憶性)

以下に、事業内容に係る研究活動を時系列で示す。

**【2025年3月14~17日】** 修士1年の鶴山さんが第72回応用物理学会春季学術講演会(東京理科大学 野田キャンパス)で「β相 MoO<sub>3</sub> エピタキシャル薄膜への電気化学的なプロトン注入と構造および電気特性評価」のタイトルで発表しました。LSAT 基板上に MBE 成長した β 相 MoO<sub>3</sub> 薄膜に電極を形成し、硫酸水溶液を介して電気化学的にプロトンを注入したところ、Mo 価数が減少、可視~赤外光領域で透過率が大きく減少することを報告した。また、わずかな注入電荷密度で抵抗率が5桁程度減少することも報告した。

**【2025年5月13日】** 高純度化学研究所の河原正美氏(研究助言者)が来訪されました。MoO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub> 薄膜の結晶成長と物性評価の結果および Nafion を用いた2端子および3端子デバイス構造について説明しました。Nafion を用いたデバイス構造について助言いただきました。



【2025年6月3日】修士1年の上林さんが[2025年度応用物理学会関西支部第1回講演会\(産業技術総合研究所 関西センター\)](#)にて「SrTiO<sub>3</sub>基板のステップ表面処理と準安定β相 MoO<sub>3</sub>薄膜の分子線エピタキシャル成長」のタイトルで発表しました。LSAT基板の代わりにSTO基板を用いて、MoO<sub>3</sub>薄膜をMBE成長した結果を報告しました。STO基板表面にフッ酸とフッ化アンモニウムを混合したエッチャントを用いてステップ&テラス構造を形成したところ、その上に結晶性のよいMoO<sub>3</sub>薄膜がエピタキシャル成長することを報告し、聴講者から多くの質問をいただきました。

【2025年6月6日】修士2年の鶴山さんが[電子情報通信学会 電子デバイス研究会\(山形大学\)](#)で「β相 MoO<sub>3</sub>単結晶薄膜の分子線エピタキシャル成長と電気化学的なプロトン注入効果」のタイトルで発表しました。LSAT(100)基板上にβ相 MoO<sub>3</sub>(100)単結晶薄膜を成長し、電気化学的にプロトンを注入した際の構造や物性変化を調べた結果を報告しました。注入電荷密度 2.8 mC/cm<sup>2</sup> で cubic 相 HMoO<sub>3</sub> が生成され、抵抗率が約 5 桁減少したことを報告しました。5.6 mC/cm<sup>2</sup> 以降の注入で、近赤外光の透過率および抵抗率が緩やかに増加に転じたことを報告しました。このことについて、プロトン注入の進行に伴い結晶中に酸素空孔が導入され、キャリア密度が減少したためと考察しました。抵抗率が減少した素子に対して、抵抗率の温度依存性を調べたところ、半導体から金属へ相転移する兆候が見られたことも報告しました。このことについて、電子情報通信学会 信学技報 ED2025-15(2025)pp.14-17 に掲載されました。

【2025年8月26日】元リガクX線研究所の稲葉克彦氏(研究評価者)が来訪されました。研究の進捗状況を報告し、XRD測定による薄膜の構造解析について助言をいただきました。また、本学工学部電気電子システム工学科の小山政俊准教授(研究評価者)より、薄膜の電極形成と評価方法について助言をいただきました。



【2025年9月9日】修士1年の上林さんが[第86回応用物理学会秋季学術講演会\(名城大学\)](#)にて「ステップ&テラス処理 SrTiO<sub>3</sub>基板上への MoO<sub>3</sub>薄膜のMBE成長と構造評価」のタイトルで発表しました。フッ酸とフッ化アンモニウムを混合したエッチャントを用いてSTO基板表面にステップ&テラス構造を形成、その上に高品質なβ相 MoO<sub>3</sub>薄膜が形成されることを報告しました。XRD測定でφスキャンおよび逆格子マップ測定を行った結果についても報告し、関連分野の先生方から多くの質問と助言をいただきました。

【2025年10月15日】高純度化学研究所の河原正美氏(研究助言者)が来訪されました。本学工学部電気電子システム工学科の小山政俊准教授(研究評価者)にも同席いただき、9月の応用物理学会で発表した内容および現在作製しているNafionを電解質膜とするプロトンゲートFETについて報告しました。河原氏よりNafion膜とMoO<sub>3</sub>薄膜の界面へ挿入した多孔質シリカ膜のゾルゲル液の調整や成膜方法について貴重な意見をいただきました。また、小山氏より、MoO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>薄膜表面に形成したNafion膜がソース・ドレイン電極間の電流パスとなっていることに関して質問があり、今後の検討課題とした。

【2025年11月14日】 酸化物エピタキシャル薄膜の作製とプロトンゲートトランジスタの研究シーズが、[2025年度 大阪工業大学 研究シーズ集 2025](#)に公開されました。このシーズ集は、大阪工業大学教員による、200を超える研究を紹介するサイトで、イノベーションデイズ（展示会）の開催に合わせて内容が更新されております。

【2025年11月29日】 修士2年の鶴山さんが、[材料学会 半導体エレクトロニクス部門研究会](#)にて「単結晶  $\text{MoO}_3$  薄膜の MBE 成長と Nafion を電解質とするプロトンゲート FET への応用」のタイトルで発表し、学生優秀講演賞を受賞しました。MoO<sub>3</sub> 薄膜に多孔質シリカを介して Nafion 膜を形成した3端子デバイスを提案し、ゲートパルス印加による SET /RESET 動作について報告しました。半導体エレクトロニクス部門委員の先生方から多くの質問とコメントをいただき、今後の研究の参考になりました。

【2025年12月10日】 修士2年の鶴山さんが、[Materials Research Meeting 2025](#)にて「Molecular beam epitaxial growth of  $\beta$ -phase  $\text{MoO}_3$  single-crystalline thin films and the effects of electrochemical proton intercalation」のタイトルで発表しました。MRM 国際会議は、ハイレベルかつグローバルな議論の場として設立された学際的国際会議であり、2019年より隔年で開催されています。材料科学および関連分野の研究者が一堂に会し、革新的材料・プロセスの実用化に向けたアイデアを共有し、次世代材料研究の発展について議論する貴重な機会となりました。

【2025年12月15日】 修士2年の鶴山さんが、材料学会 半導体エレクトロニクス部門で[学生優秀講演賞](#)を受賞しました。



【2026年2月2日】 高純度化学研究所の河原正美氏（研究助言者）が来訪されました。本学工学部電気電子システム工学科の小山政俊准教授（研究評価者）にも同席いただき、研究の進捗を報告しました。ニューロモルフィック素子への応用に向けて試作したプロトンゲート FET 素子の最新状況について報告し、評価、助言いただきました。

【2026年3月17日】 修士1年の上林さんが [2026年第73回応用物理学会春季学術講演会（東京科学大学 大岡山キャンパス）](#)にて「 $\beta$ 相  $\text{MoO}_3$  単結晶薄膜の MBE 成長と Nafion 電解質を用いたプロトンゲート FET への応用」のタイトルで発表しました。MBE 法で成膜した  $\beta$  相  $\text{MoO}_3$  薄膜をチャネル層とし、固体電解質 Nafion/シリカ積層膜をゲート層とするプロトンゲート FET を作製しシナプス型素子への応用の可能性について説明しました。酸化物エレクトロニクス分野の研究者からメモリ保持特性や3ビット動作に関する質問をいただき、今後の研究方針について参考になりました。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、 $\text{MoO}_3$ および $\text{WO}_3$ 薄膜を用いたプロトンゲートFETにおいて、低電圧でのプロトン注入による抵抗変化とその時間応答を利用したニューロモルフィック動作の実現を目指している。もしこのような素子が実現すれば、従来の半導体デバイスよりもはるかに低い消費電力で情報処理を行える新しいデバイス技術として、実社会で幅広く活用される可能性がある。

近年、人工知能を活用した情報処理は急速に拡大しており、それに伴ってデータセンターや電子機器における電力消費の増大が大きな社会課題となっている。これに対し、本研究で対象とする素子は、1 V以下の低電圧で駆動し、しかも抵抗変化の時間応答を情報処理に利用できる可能性を有するため、超低消費電力型の演算デバイスとして期待される。特に、揮発性を活用するリザバーコンピューティングや脳型コンピューティングへの応用が実現すれば、複雑で膨大なデータをより少ないエネルギーで処理する技術基盤となりうる。

このような技術が社会実装されれば、人工知能を搭載した電子機器の省電力化が進み、医療、防災、製造、インフラ監視など、多様な分野での応用が期待される。たとえば、医療分野ではウェアラブル機器や診断支援機器の長時間駆動、防災分野では現場設置型センサーの省電力動作、製造分野ではエッジAIを用いた異常検知や自律制御の効率化などに貢献できると考えられる。さらに、クラウド側の情報処理負荷を低減できれば、データセンター全体の消費電力抑制にもつながる可能性がある。

また、本研究成果は単に新しいデバイスを生み出すだけでなく、低炭素社会の実現にも寄与すると期待される。情報処理に伴う電力消費を抑えることは、二酸化炭素排出量の削減にも直結するため、カーボンニュートラルの推進という観点からも意義が大きい。すなわち、本研究は、Society 5.0社会を支える人工知能技術の高度化と、それを持続可能に支える省エネルギー技術の両立に貢献するものであり、社会的ニーズの高い研究であるといえる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者は、2002年に大阪工業大学に着任して以来、一貫して酸化物半導体薄膜の成膜技術とセンシングデバイス応用に関する研究・教育に取り組んできた。着任後は、文部科学省の各種大型私学助成事業に継続的に参画し、2000～2005年度の「私立大学バイオベンチャー研究開発拠点」、2006～2010年度の「私立大学ハイテクリサーチセンター整備事業」、2012～2016年度の「私立大学戦略的研究基盤整備事業」、さらに2017～2019年度の「私立大学研究ブランディング事業（タイプA：社会展開型）」において、コアメンバーとして研究拠点形成と研究推進に中心的な役割を果たしてきた。

この間、酸化物半導体薄膜の結晶成長、構造・物性評価、ならびに各種センサー・電子デバイスへの展開を柱として研究を発展させ、多数の学術論文、著書、学会発表、特許公開に結実させてきた。これらの実績は、基礎材料研究から応用デバイス研究までを一貫して推進してきたことを示しており、教育面においても、学生に対して材料作製からデバイス応用までを俯瞰できる研究指導を継続してきた研究者であると位置づけられる。

今回の研究は、こうした長年の研究蓄積の上に立つものであり、これまで取り組んできた酸化物半導体薄膜の高品質化と機能性評価をさらに発展させ、プロトン注入による抵抗変化を利用したニューロモルフィック素子へと展開する挑戦的研究である。すなわち、本研究は、従来のセンシングデバイス応用を中心とした酸化物半導体研究を、次世代の低消費電力情報処理デバイスという新たな応用領域へ拡張するものであり、本事業者(小池)の研究歴の中でも、材料・デバイス研究の蓄積を背景として新しい社会実装分野を切り拓く発展段階に位置づけられる。

また、本研究では、 $\text{MoO}_3$ および $\text{WO}_3$ という遷移金属酸化物薄膜の結晶成長技術、電氣的・化学的応答の評価技術、デバイス作製技術といった、これまで培ってきた知見と技術基盤が中核をなしている。その意味で本研究は、過去の研究実績と連続性を有しつつも、Society 5.0時代に要請されるAI・脳型コンピューティング向け省電力デバイスという新たな社会的要請に応える研究として、大きな発展性を有している。

教育的観点からみても、本研究は、酸化物半導体材料の基礎物性、薄膜成長、デバイス加工、情報処理応用という複数分野を横断する内容を含んでおり、学生に対して学際的かつ先端的な研究教育の場を提供するものである。したがって、本研究は、本事業者(小池)のこれまでの教育・研究活動の延長線上にありながら、その到達点を次世代情報処理技術へと押し広げる重要な位置を占める研究であるといえる。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 学会発表

- (1) 鶴山 大翔, 宮本 武, 上林 優斗, 広藤 裕一, 廣芝 伸哉, 小池 一步, “ $\beta$ 相 $\text{MoO}_3$ エピタキシャル薄膜への電気化学的なプロトン注入と構造および電気特性評価”, 第72回 応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学 野田キャンパス, 2025年3月14~17日.
- (2) 上林 優斗, 鶴山 大翔, 山本 勢那, 広藤 裕一, 廣芝 伸哉, 小池 一步, “ $\text{SrTiO}_3$ 基板のステップ表面処理と準安定 $\beta$ 相 $\text{MoO}_3$ 薄膜の分子線エピタキシャル成長”, 応用物理学会関西支部 2025年度第1回講演会, 産業技術総合研究所 関西センター, P-3, 2025年6月3日.
- (3) 鶴山 大翔, 上林 優斗, 広藤 裕一, 廣芝 伸哉, 小池 一步, “ $\beta$ 相 $\text{MoO}_3$ 単結晶薄膜の分子線エピタキシャル成長と電気化学的なプロトン注入効果”, 電子情報通信学会 電子デバイス研究会, 山形大学 米沢キャンパス, 2025年6月6日.
- (4) 上林 優斗, 鶴山 大翔, 山本 勢那, 広藤 裕一, 廣芝 伸哉, 小池 一步, “ステップ&テラス処理 $\text{SrTiO}_3$ 基板上への $\text{MoO}_3$ 薄膜のMBE成長と構造評価”, 第86回 応用物理学会秋季学術講演会, 名城大学 天白キャンパス, 2025年9月7~10日.
- (5) 鶴山 大翔, 上林 優斗, 山本 勢那, 広藤 裕一, 廣芝 伸哉, 小池 一步, “単結晶 $\text{MoO}_3$ 薄膜のMBE成長とNafionを電解質とするプロトンゲートFETへの応用”, 材料学会 半導

体エレクトロニクス部門研究会，京都工芸繊維大学 60周年記念会館大セミナー室，  
2025年11月29日。

- (6) Hiroto Tsuruyama, Yuto Kanbayashi, Sena Yamamoto, Yuichi Hirofuji, Nobuya Hiroshiba, Kazuto Koike, “Molecular beam epitaxial growth of  $\beta$ -phase  $\text{MoO}_3$  single-crystalline thin films and the effects of electrochemical proton intercalation”, Materials Research Meeting 2025, Yokohama, December 8–13, 2025.
- (7) 上林 優斗, 鶴山 大翔, 山本 勢那, 広藤 裕一, 廣芝 伸哉, 小池 一步, “ $\beta$ 相  $\text{MoO}_3$ 単結晶薄膜のMBE成長とNafion電解質を用いたプロトンゲートFETへの応用”, 第73回 応用物理学会春季学術講演会, 東京科学大学 大岡山キャンパス, 2026年3月15~17日。

#### 論文発表

- (1) Hiroto Tsuruyama, Yuto Kanbayashi, Yuichi Hirofuji, Nobuya Hiroshiba, Kazuto Koike, “Molecular beam epitaxial growth of  $\beta$ -phase  $\text{MoO}_3$  single crystalline thin films and the effects of electrochemical proton intercalation”, IEICE Technical Report, IEICE Tech. Rep. 125-62 (2025) 14–17.
- (2) Hiroto Tsuruyama, Yuto Kanbayashi, Sena Yamamoto, Yuichi Hirofuji, Nobuya Hiroshiba, Kazuto Koike, “Fabrication and characterization of proton-gated field-effect transistors based on  $\beta$ -phase  $\text{MoO}_3$  epitaxial thin films”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, to be submitted.

#### 7 補助事業に係る成果物

##### (1)補助事業により作成したもの

活動報告サイト <https://www.oit.ac.jp/personal/koike/JKA.html>

実態調査報告書 <https://www.oit.ac.jp/personal/koike/JKA-report.pdf>

技術シーズ公開サイト <https://www.research.oit.ac.jp/oitid/seeds/seeds/seeds-17156/>

#### 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 大阪工業大学工学部(オオサカコウギョウダイガクコウガクブ)

住 所： 〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1

担 当 者： 小池 一步 (コイケ カズト)

担 当 部 署： 工学部電子情報システム工学科(コウガクブデンシジョウホウシステムコウガクカ)

E - m a i l: [kazuto.koike@oit.ac.jp](mailto:kazuto.koike@oit.ac.jp)

U R L: <https://www.oit.ac.jp/personal/koike/>