

一般財団法人日本産業科学研究所
令和2年度研究助成報告書

大阪大学 産業科学研究所
准教授 服部 梓

研究課題

「シナプス型柔軟応答性を持つ金属酸化物トランジスタの開発」

遷移金属酸化物は、電子相関により電子スピンの強く結合している強相関電子系であり、僅かな摂動(温度、磁場、キャリア濃度)で絶縁体状態は雪崩的に融解し、金属相、強磁性、高温超伝導へ相転移する(Mott 転移)。すなわち極めて僅かな外部エネルギーの助けによって自ら大きく変化し、大きなエネルギー変化を生じる物質である。この変化は劇的であり、抵抗変化が3-6桁にも及ぶ。この強相関電子相転移現象の電界制御実現により、巨大スイッチング、超高速動作が可能な次世代メモリ創製が期待されている。この可能性と相まって、界面電子状態を外場(電界、光、磁場、圧力)で制御する新機能デバイスに資する物性物理および薄膜デバイス研究が世界中で活発に行われている。これらの機能性材料群で、既存のCMOSと同様に位置・形状を3次元的に制御したナノサイズの規則構造が達成され、その優れた機能をエレクトロニクスとして制御できれば、次世代新奇超省電力ナノエレクトロニクス実現への大きなブレークスルーが期待できる。

さらに本物質系の重要かつ興味深い性質は、多電子系であるため10 nm以下のサイズのナノ構造体であっても 10^5 個以上の電子を含み、巨大な相転移動作を示すと予想されている。近年これら物質系において、導入された電子は半導体とは全く異なり均一分布せず、自己集合・相分離してナノサイズのドメインとして存在することが相次いで報告されており、この特性を利用することで柔軟な応答性が創出できると考えた、すなわち、機能が固定化した材料ではなく、意思を持つかのように特性が柔軟に変わる強相関金属酸化物を採用することで、「デバイスに脳の機能を付与する」という課題の実現に有効である。

そこで、強相関金属酸化物VO₂の50 nmサイズの立体ナノ構造体を作製し、単一電子相の一次相転移の抽出と、臨界点(転移点)分布、ナノ電子相サイズの関係性を明らかにし、ナノエレクトロニクス領域でのデバイス作製指針を得る実験を行った。

独自の原子層精度立体造形技術を、Mott 絶縁体のプロトタイプ材料で、金属室温近傍で絶縁体から金属へと急峻かつ巨大な抵抗変化を伴って転移(IMT)するVO₂へと適応し、人工制御ナノ構造体での物性研究へと展開させた。VO₂の転移過程ではナノ相分離現象が見られ、金属相と絶縁相が10-1000 nmサイズで共存するため、その大きさ以下のサイズのVO₂試料はナノ電子相の閉じ込め効果からバルクや薄膜にはない特性を示し、非常に大きな注目を集めている。図1にVO₂の細線構造(線幅: 600 nm、電極間距離: 20 nm)と、単一細線からの抵抗の温度依存性(*R-T*)曲線を示す。単一ナノ電子相の、昇温過程での52°C(降温過程での49°C)でステップ変化: すなわち絶縁体→金属(金属→絶縁体)の一次相転移がはっきりと観察されている。従来法では不可能な数十 nm サイズの極微ナノ細線構造において、物性の起源であるナノ電子相転移特性の直接評価と、電子相数制御による応答性の急峻化を実現した。また、ナノ電子相1個の理想的な一次相転移特性を基に、統計的MITモデルによってマクロサイズの試料が示すなだらかな抵抗変化を、矛盾なく記述できることを明らかにし、相転移点の分布特性を明らかにした。

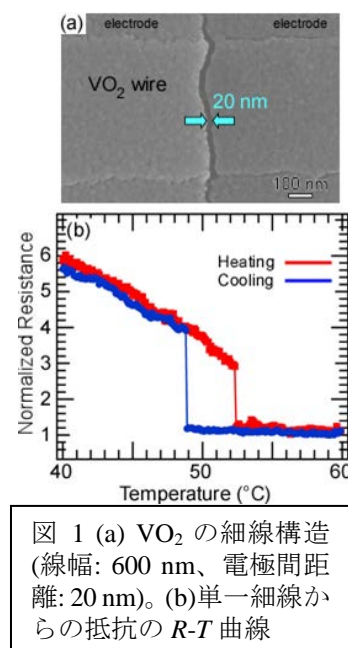


図1 (a) VO₂の細線構造(線幅: 600 nm、電極間距離: 20 nm)。(b)単一細線からの抵抗の*R-T*曲線

巨視的な相転移現象をナノ電子相の統計分布からボトムアップ式に直接記述する本成果は、VO₂の相転移現象の理解を進めるだけでなく、ナノエレクトロニクス領域でのデバイス作製指針に繋がると考えられる。このようにナノ構造体創生技術[2]を活用し、ナノ構造体特有の機能発現、またその学理の解明により、シナプス型柔軟応答性を持つ金属酸化物トランジスタの開発、実用デバイス化へと展開させていく。

業績

[1] “Investigation of Statistical Metal-Insulator Transition Properties of Electronic Domains in Spatially Confined VO₂ Nanostructure”

A. N. Hattori, A. I. Osaka, K. Hattori, Y. Naitoh, H. Shima, H. Akinaga, H. Tanaka, *Crystals* (2020) **10**, 631-1-14

[2] 「立体表面を活用したものづくりと物性研究 =表面科学とダイバーシティ&インクルージョン=」 服部 梓、表面と真空 **64** (2021) 126-133.