

# 強相関酸化物における光学特性の電界制御とデバイス応用

## Electric-Field Control of Optical Properties in Strongly-Correlated Oxides for Device Applications

H25助自56

代表研究者 中野 匡規 東京大学 大学院工学系研究科 量子相エレクトロニクス研究センター  
特任講師

Masaki Nakano

Lecturer, Quantum-Phase Electronics Center,  
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

The field-effect transistor (FET) provides electrical switching function of electric current through precise control of a number of charge carriers at a surface of solids by external voltage. The idea of utilizing very large capacitance of electric-double layer (EDL) at a solid/electrolyte interface as a gate dielectric of FET, namely EDL transistors (EDLTs), significantly increases a limit of the amount of surface charges controllable by electric-field effect up to as large as  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , leading to remarkable demonstrations such as electric-field induced superconductivity and ferromagnetism in band insulators. Strongly-correlated materials represented by Mott insulators, on the other hand, are also interesting to be investigated, because of their great potentials for gigantic and diverse responses due to a strong interplay between charge, spin, orbital, and lattice. We have examined electric-field effects on correlated oxides showing the first-order metal-insulator transitions to explore novel physical phenomena and electronic functions originating from strong correlation effects, and found that EDLTs based on an archetypal strongly correlated oxide,  $\text{VO}_2$ , enables electrical switching of bulk state of matter beyond the fundamental electrostatic screening length, opening up a new possibility of macroscopic phase control by local electrical excitation. We have recently revealed by *in-situ* optical spectroscopy measurements and *in-situ* x-ray diffraction measurements that this conceptually new transistor harnessing ‘bulk phase transition’ gives rise to novel functions, as demonstrated by remarkable changes in the infrared transmittance and the out-of-plane lattice parameter by more than 40% and 1%, respectively. These functions are not available with conventional field-effect devices based on band insulators, potentially beneficial for future low-energy-consumption electronics.

### 研究目的

固体・電解質溶液界面に形成される電気二重層 (Electric-double-layer: EDL) の蓄電効果を利用することで、 $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ もの膨大な量の電荷を固体表面に誘起することが可能である。EDLをゲート絶縁層として組み込んだトランジスタ (EDL transistor: EDLT) は新しい物性探

索・制御手法として注目されており、これまでにバンド絶縁体を対象として、絶縁体から超伝導への可逆的な相転移の実証などが行われてきた。一方、モット絶縁体に代表される強相関物質は電子同士の相関が強く、微小な外部刺激に対して巨大かつ多彩な応答を示すため、EDL法と組み合わせることによって革新的な相転移デバイスの実現が期待できる。本

研究では、特に室温近傍で数桁の抵抗変化を伴った金属-絶縁体転移を示すVO<sub>2</sub>に着目し、微小な外部電圧による巨大な抵抗変化、および一次相転移の性質を利用した新しい電子デバイスの実現を目指した。

## 概 要

キャパシタの蓄電効果を利用した電界効果トランジスタ (FET) は、電圧による電流のスイッチング機能を提供する基本素子であり、コンピューターや液晶ディスプレイ、携帯電話などの電子機器の制御には欠かせない要素技術の一つとして、現代の高度情報化社会をを支えている。従来の半導体エレクトロニクスでは、シリコンを基盤としたFETを微細化・高集積化することによる高性能化を目指してきたが、FETの微細化には限界があり、まったく新しい動作原理に基づく情報処理技術の開発研究が広範に行われている。Beyond CMOSと呼ばれるこの潮流は、国際半導体技術ロードマップにおいて次世代エレクトロニクスの柱の一つに位置付けられており、電子の持つ電荷とスピンの同時制御を目指すスピントロニクスや、電子同士が強く反発し合う結果として多彩な性質を示す強相関酸化物を利用した強相関エレクトロニクスなどが、従来の半導体テクノロジーを超える高機能化、低消費電力化を実現する切り札として期待されている。

筆者らは、強相関酸化物を伝導チャンネルとするFETを開発し、従来のシリコンを基軸とする半導体トランジスタ技術では実現が困難な高性能・高機能デバイスの実現を目指している。従来の半導体エレクトロニクスで用いられる物質のほとんどは、結晶の各格子点あたりに電子を含まない、いわゆるバンド絶縁体である。それに対して、一部の $d$ 電子系遷移金属酸化物の中には、結晶の各格子点あたりに電子が一

個存在して通常のバンド理論では金属になるような状況においても、電子間の強いクーロン相互作用によって絶縁体になるものがある。このようなモット絶縁体は、不純物置換や圧力印加などによるフィリング制御やバンド幅制御によって絶縁体から金属へ相転移を起こす(モット転移)<sup>[1]</sup>。モット転移の近傍は複数の電子相が競合した状態であり、微小な刺激を与えることによって超伝導や強磁性などのエキゾチックな物性を誘起することが可能である。高温超伝導体の発見以後、この強い電子間相互作用を特徴とする強相関酸化物を対象として膨大な研究が行われ、強相関電子が生み出す多彩な電子相と、それに起因した特異な諸性質が次々と明らかになってきた。その一方で、強相関酸化物の巨大物性をデバイス機能に結びつける研究も幅広く行われてきたが、応用上重要なFET構造での物性制御は成功例がほとんどなかった。その主な理由は、モット転移を誘起する前にキャパシタの絶縁破壊が起こってしまうからである。筆者らは、従来のFETの固体絶縁体層を電解質溶液で置き換えた電気二重層トランジスタ (EDLT) を利用することでこの壁を突破し、静的な電圧によってモット転移を自在に制御することに成功した。特に伝導チャンネルに代表的な強相関酸化物であるVO<sub>2</sub>を用いた場合、わずか1V程度の極めて小さな電圧で金属・絶縁体相転移を可逆的に制御可能であることを見出した<sup>[2]</sup>。

強相関酸化物における電界効果は、従来のバンド絶縁体における電界効果とは本質的に異なる可能性がある。一般に電界効果は表面に限定的な局所効果であり、伝導チャンネルは静電的な遮蔽効果によって物質表面数nmの領域に限定されている。その一方で、VO<sub>2</sub>を用いたトランジスタでは伝導チャンネルがバルク領域に広がっており、遮蔽長を遥かに超えた領域

の電子状態を電圧で制御可能であることがわかってきた<sup>[2]</sup>。これはトランジスタの用途を従来の局所的な電流スイッチングから巨視的な相制御へと拡張するものであり、従来のトランジスタの枠を超えた新しい相制御デバイスとして幅広い応用展開が期待される。本研究では、この強相関トランジスタに特徴的な“電場誘起バルク相転移”を利用した新機能の原理証明に取り組んだ。その結果、特にVO<sub>2</sub>トランジスタでは、従来の電流のみならず、光学特性や結晶構造も電圧で大きく制御可能であることが明らかになった<sup>[3,4]</sup>。これらは従来の半導体トランジスタ技術では実現不可能な新機能であり、強相関酸化物を主役とする新しいエレクトロニクスの幕開けを期待させるものである。

－以下割愛－