

強相関酸化物ナノエレクトロニクス構築に関する研究

Novel Nano-electronics based on Strongly Correlated Oxides

田中 秀和 (TANAKA HIDEKAZU)

大阪大学・産業科学研究所・教授



研究の概要

強い電子相関により、高温で強磁性、金属-絶縁体転移、超巨大磁気抵抗、高温超伝導など新奇な物性を示す遷移金属酸化物において、ヘテロ構造およびナノサイズ超構造を作製し、物性発現の源である非常に強い電子相関をバイアス電圧・光により制御し強相関相転移のスイッチングをエレクトロニクスとして実現する

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物性・結晶工学

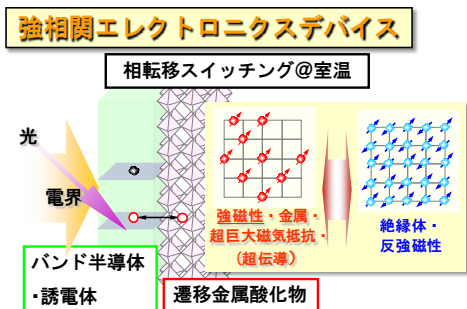
キーワード：新機能材料、強相関系、ヘテロ構造、ナノ構造、スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

遷移金属酸化物は強い電子相関により電子スピンの強結合している強相関電子系であり、非常に高温で強磁性、超巨大磁気抵抗、超伝導などを発現し、僅かな磁場、温度、キャリア濃度変化で大きく物性が変化します。この優れた、しかし扱い難い物質群を半導体デバイスのように制御できれば魅力的な新規エレクトロニクスが出現すると期待されます。

2. 研究の目的

異なる機能を持つ酸化物を組み合わせる「ヘテロ構造」、格段に小さな「ナノヘテロ構造」により、バイアス電圧・光によるキャリア制御を通じ物性発現の源である電子相関を制御します。それにより、強相関物性のスイッチングを実現する、『強相関酸化物ナノエレクトロニクス』の構築を目指します。



3. 研究の方法

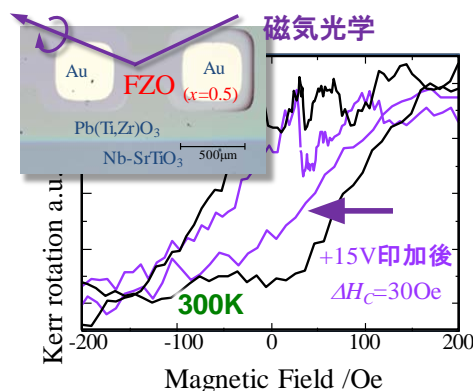
対象物質系には、最も強い電子相関を有し非常に高温まで強磁性を示す Fe 酸化物、室温

付近で非常に巨大な金属-絶縁体転移を示す V 酸化物など多彩な物質が存在します。これらに対し、

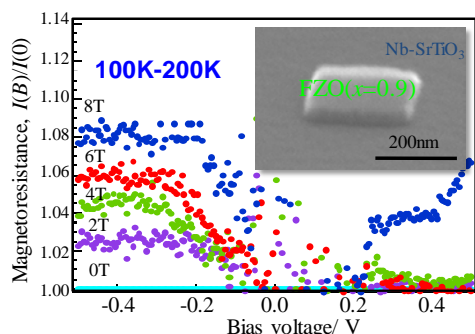
- (1) レーザ分子線エピタキシー法を用いた原子レベル制御界面を有する遷移金属酸化物ヘテロ構造デバイス (電界効果トランジスタ、ダイオード) 作製と強相関物性の電界・光制御。
 - (2) 高輝度放射光施設を用いた電子・スピン分光測定による動作メカニズム解明と学理構築
 - (3) 独自の極限ナノ構造形成技術を用いたナノスケールヘテロ構造構築によるバルクを超えた新原理超巨大外場応答の創出
- 以上の手法により目的にアプローチします。

4. これまでの成果

■ 高温強磁性 Fe 酸化物ヘテロ構造デバイス
● 強磁性電界効果トランジスタ: $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ 強誘電ゲート FET 構造を $\text{Fe}_{2.5}\text{Zn}_{0.5}\text{O}_4$ に展開し、当初目標に掲げた室温での FET 動作及び電界による保磁力変調を達成した。(下図)

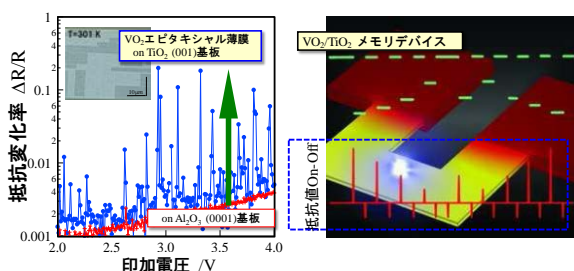


●**強磁性酸化ダイオード**：電界制御型素子として $\text{Fe}_{2.1}\text{Zn}_{0.9}\text{O}_4$ ナノドット/ $\text{Nb}:\text{SrTiO}_3$ 強磁性ダイオードを作製し、バイアス電界での磁気抵抗効果のコントロールに成功し、その原因が同物質の高いスピン分極率に起因することを初めて明らかにした。(下図)



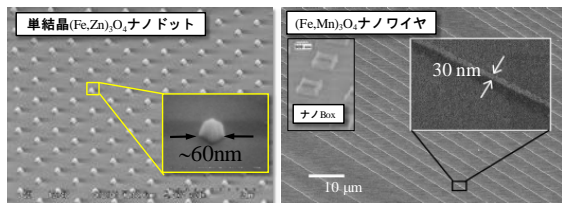
■**室温金属-絶縁体転移 VO_2 薄膜デバイス**

● **VO_2 歪み薄膜デバイス**: TiO_2 基板上に構築することにより、従来の薄膜材料と比較し、一桁低い電圧、100 倍の変化率を有する電界誘起絶縁体-金属相転移スイッチングを発見した(下図左)。加えてこの原因が、通常の100倍の大きさを有する金属相電子ドメインの発現によるものであることを発見した。
●**自立 TiO_2 基板上にエピタキシャル VO_2 薄膜デバイス構造を形成し、メモリ動作デモンストラーションに成功した。**(下図右)



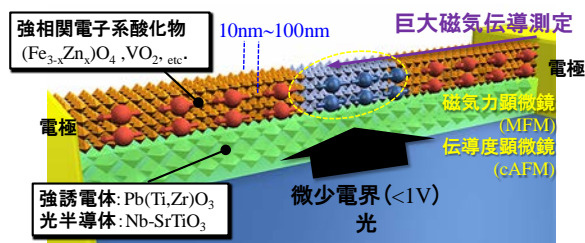
■**強相関酸化ナノデバイス構造作製**

●大面積に一括してナノ構造デバイスを作製できる **Mo** リフトオフナノインプリント法を新たに開発し、最小径 60nm のエピタキシャル $\text{Fe}_{2.5}\text{Zn}_{0.5}\text{O}_4$ ナノドット構造を形成することに成功した。(下図左)
●更なる発展として、パルスレーザ蒸着法(PLD)でテンプレート側面へ薄膜結晶を成長させることにより従来の限界を超えた分子層レベルでのナノ構造サイズ制御を可能とする、“3D ナノテンプレート PLD 法”を新たに考案し 10~20nm サイズの極小酸化ナノデバイスの構築に成功した。(下図右)



5. 今後の計画

●高温強磁性 Fe 酸化物ヘテロ構造デバイス
●室温金属-絶縁体転移 VO_2 薄膜デバイスにおいて、独自の酸化ナノ構造作成技術を用い、10nm-100nm サイズの極小ヘテロ構造デバイスを作製することにより、その外場応答率を更に 10~100 倍に向上、必要電界を 1/10 以下にする事を目指す。



6. これまでの発表論文等

- Adv. Materials.**, (2012) *in press*, “Multistate Memory Devices based on Free-standing VO_2/TiO_2 Microstructures Driven by Joule Self-heating”
- Appl. Phys. Lett.**, (2012), *in press*, “Metal-insulator transition with multiple micro-scale avalanches in VO_2 thin film on TiO_2 (001) substrates”
- Nano Letters**, 11(2011)343-347, “Enhancement of Spin Polarization in a Transition Metal Oxide Ferromagnetic Nanodot Diode”,
- Appl. Phys. Lett.**, 98 (2011) 102506, “Preparation of Ferroelectric Field Effect Transistor based on sustainable stolonally correlated $(\text{Fe,Zn})_3\text{O}_4$ oxide semiconductor and their electrical transport properties”
- Appl. Phys. Lett.**, 98 (2011) 133505, “Non-Destructive Estimation of Depletion Layer Profile in Nb-doped $\text{SrTiO}_3/(\text{La,Ba})\text{MnO}_3$ n-p⁺ Heterojunction Diode Structure by Hard X-ray Photoemission Spectroscopy”
- Phys. Rev. B**, 84 (2011), 085107, “Identifying valence band structure of transient phase in VO_2 thin film by hard X-ray photoemission”,
- Nanotechnology**, 22 (2011) 415301, “Position-, Size-, and Shape-controlled highly crystalline ZnO nanostructures”
- Nanotechnology** 22 (2011), 185306, “Extremely reduced hollow metal nanomasks for direct epitaxial growth of functional oxide nanostructures”
- Nano Letters**, 10(2010) 2772, “Giant Magnetoresistance Observed in $(\text{Fe,Mn})_3\text{O}_4$ Artificial Nanoconstricted Structures at Room Temperature”
- Appl. Phys. Exp.**, 3 (2010) 63201, “Electronic Structure of W-Doped VO_2 Thin Films with Giant Metal-Insulator Transition Investigated by Hard X-ray Core-Level Photoemission Spectroscopy”
- Nano Letters**, 9 (2009) 1962, “Controlled Fabrication of Epitaxial $(\text{Fe,Mn})_3\text{O}_4$ Artificial Nanowire Structures and their Electric and Magnetic Properties”