

表面に蓄積した電荷でモット絶縁体がバルクに金属化

[1] 要旨

モット絶縁体 Ca_2RuO_4 の室温かつ低電場の絶縁体 - 金属転移を用いた次世代デバイス「モットメモリ」の実現が期待されている。しかし、これまでの実験ではジュール発熱の影響を完全に排除した議論が困難であった。最近、 Ca_2RuO_4 単結晶表面に電気二重層トランジスタ (EDLT: Electric Double-Layer Transistor) 技術を用いて、電流を伴わない純粋な電場効果による金属化が実現された。この研究は電場誘起モット転移の新奇性を活かしたデバイス実現に寄与するだろう。

[2] 本文

4d 電子同士の強い相関効果によって金属性が抑制されたモット絶縁体 Ca_2RuO_4 は、スピン軌道結合と電子相関が競合する興味深い系であり、最新の固体物理学の教科書の内容をひとつに凝縮したかのような物質である。たとえば、圧力、温度・熱、電場・電流などの外場を加えることでモット型絶縁体 - 金属転移、負の熱膨張、軌道秩序、超伝導、遍歴強磁性などの新奇な現象が数々出現する。なかでも、わずか 40 V/cm という低い電場で誘起される絶縁体 - 金属転移は、冷却することなく室温で 4 桁もの電気抵抗変化を伴う。このため、 Ca_2RuO_4 は次世代の低電力スイッチング素子「モットメモリ」を実現させる有力候補物質として注目されている。しかし、これまでの電場印加の実験では、試料に直接形成した電極から電場を加えていたため、電場で金属化したと同時に試料に大きなバイアス電流が発生することが不可避であった。そのため、ジュール発熱の効果を完全に排除して金属化の非線形伝導性を議論することが困難であった。

最近、久留米工業大学と東北大学金属材料研究所のメンバーを中心とする研究グループは、酸素過不足のない化学量論的組成の Ca_2RuO_4 単結晶の表面に EDLT 構造を作製することで、バイアス電流を伴わない純粋な電場効果による金属化に成功した。観測された最大 97% もの抵抗減少効果は、ゲート電圧に対し良い可逆性と再現性を示すことから、表面へのキャリアドーピングに止まらず、バルク内部へと広がる構造変化を引き起こす。この成果は JPSJ の 2025 年 2 月号に掲載された。

この研究で使用された EDLT は、イオン液体や電解液を用いた電界効果トランジスタであり、従来の金属酸化膜半導体電界効果トランジスタと比べて 100 倍近くの高い密度のキャリアを物質表面に誘起できるのが特徴として知られる。本研究では、劈開した Ca_2RuO_4 単結晶に図 1(a) のような EDLT デバイスを制作し実験を行った。その結果、電子ドーピングに相当する正のゲート電圧 (+3V 以上) を加えることで、抵抗が減少することを観測した。また、ゲート電圧を +4V から 0V に戻すと減少した抵抗が 90% 以上回復する。この可逆性から、この抵抗減少は電気化学反応ではなく静電現象として理解すべきであることがわかる。

一方、イオンゲートによる Ca_2RuO_4 の金属化は、長期間にわたって進行するという独特の特徴を持ち、従来のEDLTにおける表面の静電的キャリアドーピングの枠組みでは説明が難しい。実際、金属化された層の厚さは約100 nmと見積もられ、これは表面ドーピングのみで期待される値を大きく超えている。 Ca_2RuO_4 では電子-格子相互作用が極めて強いため、金属化に対して構造が敏感に反応する。本研究で観測された極めて大きな電気抵抗の減少は、イオンゲートによる初期の表面金属化がトリガーとなり、構造変化を誘引し、さらに金属化がバルク内部へと連鎖的に進行する、いわゆるパーコレーション的な機構によって説明できるであろう。本研究の成果は、強相関電子系の理解を深めるだけでなく、非線形・非平衡性を考慮した物理現象の解明や、新たな電子デバイスの実現にも貢献することが期待される。

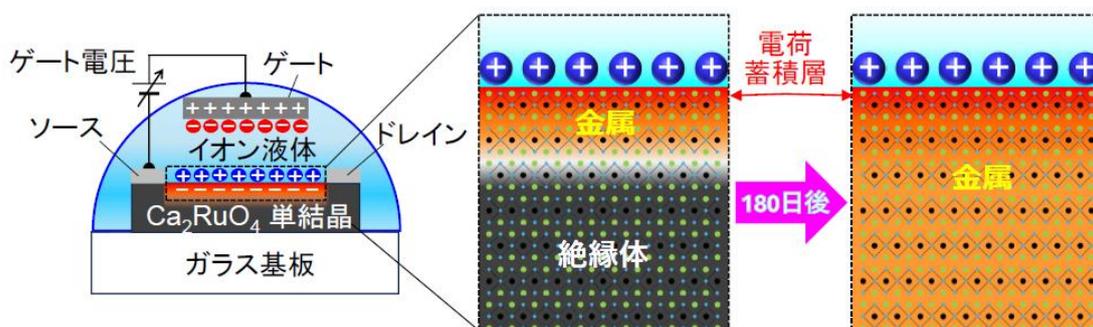


図1 左) Ca_2RuO_4 単結晶の表面に作製したEDLTの概略図と金属化イメージ。中央) イオンゲートによる初期の表面金属化が構造変化を誘引する様子。右) さらにエージング効果で金属化がバルク内部へと連鎖的に進行する様子。

原論文 (2025年1月23日公開済)

[Metallisation of the Mott Insulator \$\text{Ca}_2\text{RuO}_4\$ Using Electric Double-Layer Gating](#)

T. Sakami, H. Ogura, A. Ino, T. Ouchi, T. Nojima, and F. Nakamura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 023703 (2025).

<情報提供：中村 文彦 (久留米工業大学 教育創造工学科)
野島 勉 (東北大学 金属材料研究所) >