

## 電気化学的界面の超強電界を用いた電子物性制御 Control of Electronic Properties of Materials Using Ultrahigh Electric Field at Electrochemical Interfaces

岩佐 義宏 (IWASA YOSHIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



### 研究の概要

電気化学的界面に発生する超強電界を用いたトランジスタ（電気二重層トランジスタ）によって、多様な物質の電子状態を電界によって制御する技術を確認するとともに、化学的ドーピングでは実現できない物質の状態を電界によって形成することにより、電気化学、電子工学、物性物理学にまたがる新たな物質科学分野を構築する。

研究分野：理工系・数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：低温物性、超伝導材料・素子、表面・界面物性、電界効果トランジスタ

### 1. 研究開始当初の背景

物質の電子状態を制御する有効な手法として、電界効果トランジスタ（FET）による電界効果ドーピングが1960年代からすでに注目されていたが、従来型のFETでは大電荷密度を実現できないため、例えば絶縁体を超伝導に転換するなどの際立った現象は、FETでは不可能と考えられてきた。

研究代表者岩佐のグループでは、電気化学的界面には通常のFETでは実現できないような超高電界が発生していることに注目し、それをFETとして利用する電気二重層トランジスタ(EDLT)によって、電界誘起絶縁体-金属転移、電界誘起超伝導が実現できることを示してきた。有機半導体、カーボンナノチューブなどに対して、EDLTの基本技術を開拓した後、EDLTを酸化物半導体に展開し、ZnOの電界誘起絶縁体-金属転移、SrTiO<sub>3</sub>の電界誘起超伝導の実現に成功した。化学的ドーピングの助けなく純粋な電界効果によって、絶縁体を超伝導体にスイッチさせた世界初の例である。

### 2. 研究の目的

以上の成果をもとに、本研究が目的とするのは、電気化学的界面に発生する超強電界を用いたトランジスタ（電気二重層トランジスタ）によって、多様な物質の電子状態を電界によって制御する技術を確認するとともに、化学的ドーピングでは実現できない物質の状態を電界によって形成することにより、電気化学、電子工学、物性物理学にまたがる新たな物質科学分野を構築することである。

### 3. 研究の方法

本研究は以下の3つのテーマからなる。

#### (1) 電子伝導体探索

EDLTをさまざまな物質に適用するとともに、電子ビーム描画装置によるナノデバイス作製技術を完成する。超伝導をはじめとする電界誘起相転移現象を示す物質を探索する。

#### (2) イオン伝導体探索

EDLTにおいて本質的な役割を担うイオン伝導体、特にデバイス特性との相関を明らかにする。

#### (3) 物性解明

EDLTにおける超強電界、高密度二次元電子系の物性解明と新機能探索。

### 4. これまでの成果

上記の研究項目ごとに以下の研究成果が得られた。

#### (1) 電子伝導体の探索

##### 1. ZrNClの電界誘起超伝導

電子ビーム描画装置を用いてZrNClナノフレークを用いたEDLTを作製し、ゲート電圧を正に印加することにより $T_c = 15$  Kの電界超伝導が実現した。この成果により、電界誘起超伝導をさまざまな物質で実現できることが確実になった。

##### 2. KTaO<sub>3</sub>の超伝導の発見

KTaO<sub>3</sub>において、化学的キャリアドーピングでは実現不可能であった高濃度キャリア蓄積に成功し、電界誘起超伝導( $T_c = 50$  mK)を発見した。

##### 3. グラフェンにおける高濃度キャリア蓄積

EDLT による高濃度キャリア蓄積により、全固体デバイスでは観測されなかった、多層グラフェンのバンド構造に由来する特徴的な伝達特性が観測された。

#### 4. MoS<sub>2</sub>の電界誘起超伝導

層状物質MoS<sub>2</sub>の電界誘起超伝導を発見し、その詳細な電子相図の作成に成功した。得られた  $T_c \sim 10$  Kはバルクで観測されている  $T_c$  以上であり、遷移金属ダイカルコゲナイド  $MX_2$ のなかでも最高である。

#### 5. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>におけるn型金属相の発見

p型のYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>のEDLTにおいて、電気化学的反応により、初めて金属的なn型のYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>を実現した。

#### (2) イオン伝導体探索

##### 1. イオン液体を用いた ZnO-EDLT の動的特性の解明

EDLT の誘電応答を系統的に調べることで、電荷蓄積機構を明らかにした。

##### 2. イオン液体の正逆光電子分光と EDLT 特性の相関の発見

20 種類以上のイオン液体の仕事関数などの基本パラメータを決定するとともに、EDLT のしきい電圧がイオン液体の仕事関数と線形関係にあることを明らかにした。

#### (3) 物性解明

層状物質WS<sub>e2</sub>-EDLTにおける磁気伝導度の測定と第一原理計算から、電界と平行な電子スピンのゼーマン分極が発生し、それが外部電圧によって制御可能であることを明らかにした。

#### 5. 今後の計画

電界効果による新超伝導体の発見法として EDLT が有用であることが実証され、技術的にも電子ビーム描画装置を用いたナノスケール薄膜の EDLT 作製法が確立した。これらを受けて今後も新超伝導体の探索を精力的に推進する。

界面に発生する超強電界は界面へのキャリア蓄積だけではなく、界面二次元電子のスピンの状態を変調できることが明らかとなった。物質探索からスピン状態のミクロな理解への実験・理論的アプローチを行う。

最近、薄膜化や超強電界によって、バルクの相転移現象を大きく変調できることが明らかとなってきてきた。さまざまな相転移現象に適用し、新奇能の探索を行う。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1) Y. J. Zhang, J. T. Ye, Y. Matsuhashi, Y. Iwasa, Nano Letters, Ambipolar MoS<sub>2</sub> thin flake transistors, 12巻、1136-1140、2012年

2) J. T. Ye, M. F. Craciun, M. Koshino, S. Russo, S. Inoue, H. T. Yuan, H. Shimotani, A. F. Morpurgo, Y. Iwasa, Accessing the transport properties of graphene and its multilayers at high carrier density, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108巻、13002-13006、2011年

3) T. Nojima, H. Tada, S. Nakamura, N. Kobayashi, H. Shimotani, Y. Iwasa, Hole reduction and electron accumulation in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> thin films using an electrochemical technique: Evidence for an n-type metallic state, Physical Review B, 84巻、020502-1-4、2011年

4) H. T. Yuan, H. W. Liu, H. Shimotani, H. Guo, M. W. Chen, Q. K. Xue, Y. Iwasa, Liquid-Gated Ambipolar Transport in Ultrathin Films of a Topological Insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Nano Letters, 11巻、2601-2605、2011年

5) K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, M. Kawasaki, Discovery of superconductivity in KTaO<sub>3</sub> by electrostatic carrier doping, Nature Nanotechnology, 6巻、408-412、2011年

7) H. T. Yuan, M. Toh, K. Morimoto, W. Tan, F. Wei, H. Shimotani, C. Kloc, Y. Iwasa, Liquid-gated electric-double-layer transistor on layered metal dichalcogenide, SnS<sub>2</sub>, Applied Physics Letters, 98巻、012102-1-3、2011年

8) H. T. Yuan, H. Shimotani, J. T. Ye, S. Yoon, H. Aliah, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Electrostatic and Electrochemical Nature of Liquid-Gated Electric-Double-Layer Transistors Based on Oxide Semiconductors, Journal of the American Chemical Society, 132巻、18402-18407、2010年

9) J. T. Ye, S. Inoue, K. Kobayashi, Y. Kasahara, H. T. Yuan, H. Shimotani, Y. Iwasa, Liquid-gated interface superconductivity on an atomically flat film, Nature Materials, 9巻、125-128、2010年

ホームページ等

<http://iwasa.t.u-tokyo.ac.jp/>