

酸化物二次元界面の量子機能とデバイス応用

Quantum functionalities and device applications of two-dimensional electron system at oxide interfaces

課題番号：24226002

川崎 雅司 (KAWASAKI MASASHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

近年の薄膜作製技術の向上により、従来の半導体ヘテロ接合の常識を覆す物性や機能が酸化物の表面・界面で発現している。本研究課題では、①酸化亜鉛(ZnO)ヘテロ接合における新たな量子相開拓と、②強誘電体をトランジスタのチャンネルとし、分極不整合界面におけるキャリア蓄積量のスイッチングを動作原理とする新たな不揮発メモリ素子の開発を目指す。

研究分野：応用物性・結晶工学

キーワード：ヘテロ構造、酸化物エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

酸化物には、通常の半導体や金属には不可能な、あるいは遙かに凌駕する物性や機能が豊富にある。これらを電子技術に応用する酸化物エレクトロニクスは、四半世紀に及ぶ薄膜・界面技術の進展により、巨視的な量子効果を制御できるレベルに達している。超伝導・強磁性・強誘電性・非線形光学効果などの多様な物性・機能を活用した酸化物エレクトロニクスの発展に大きな波及効果を及ぼす先鋭的な量子効果の探求が望まれている。

2. 研究の目的

本研究課題では、これまでの基礎研究をさらに発展させ、超高移動度強相関電子系における新量子効果の探索、強誘電体をチャンネルとした新型トランジスタ、電界効果による新超伝導体の発見、を平行して推進する。特に、キャリア蓄積の方法として、自発的に結晶の対称性が破れて自発分極を持つ物質のヘテロ界面や、電気二重層による強電界を用い、元素置換不純物の影響のない環境下で新たな電子相を見出す。

3. 研究の方法

MgZnO/ZnO 界面に自発的に蓄積する電子系の移動度を向上すると、電子相間の強い理想的な低次元系が可能となり、この様な系で、ウイグナー結晶化やスピン偏極状態を実現し、その先にある未知の量子現象を探求する。

また、強誘電体自身の自発分極と電界効果によるキャリア蓄積の効果を重畳して、界面でのキャリア濃度を変調する手法を確立し、強誘電体をチャンネルとする新しいトランジスタの不揮発性動作を実現する。

4. これまでの成果

ZnOヘテロ界面の高品質化を行った。研究開始時に移動度は80万 cm^2/Vs に達しており、二次イオン質量分析法など高感度な化学分析手法を用いても不純物の検出が困難であった。しかしながら、検出限界以下の不純物の混入の可能性を考え、成膜チャンバーの加熱機構の改造を行った。結果として、2015年には低温の移動度を100万 cm^2/Vs まで向上させることに成功した。

このヘテロ構造を用いて、新たな量子相観測をめざし、ZnO二次元電子系の低温磁気輸送特性を調べた。

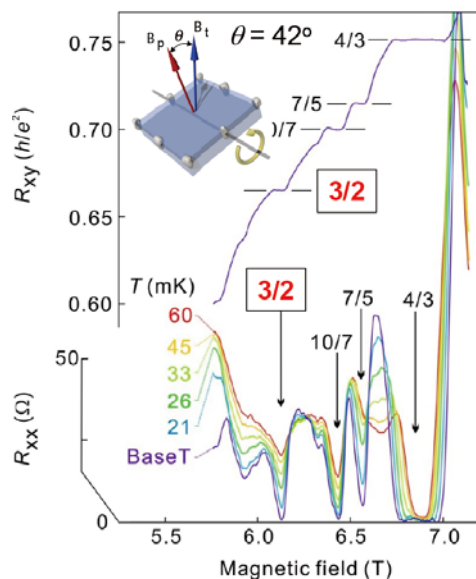


図1 低温における磁気輸送特性

清浄な界面を反映して、多数の整数および分数の指標 ν で量子ホール効果が観測された。特に、試料を磁場に対して傾けたときのみ、パウリの排他原理で禁じられている偶数分母の分数 $\nu=3/2$ において量子化が発現した (図 1)。この発見は、GaAs 系で発見された $\nu=5/2$ 以外では初めての観測となる。この成果により、数十年來 GaAs 系のみで行われてきた研究が他の物質系でも行うことができるようになり、物理の普遍性を確かめられる段階にきたことを示している[1]。さらに、量子干渉の起こりやすさを示す指標である量子散乱時間を調べたところ、移動度が 3,000 万 cm^2/Vs の最高品質 GaAs 系と同程度であることが解った。

強誘電体チャネルトランジスタについては、高品質 BaTiO₃ 薄膜の作製し、電気二重層トランジスタ (EDLT) を構築した。Ti を含む有機金属 (TTIP) と蒸留した純オゾンを用いる有機金属分子線エピタキシー法を確立した。その結果、化学量論組成の自己制御作用により、非常に高品質な BaTiO₃ 薄膜を GdScO₃ 基板上に堆積することに成功した[5]。この薄膜を用いて、イオン液体 (DEME-TFSI) をゲート絶縁体とする EDLT を作製し、BaTiO₃ 表面にキャリアの誘起を行った。ゲート電圧 (V_G) が約 3V からドレイン電流 (I_D) が流れ始める n 型チャネルのトランジスタ動作が確認された (図 2)。この成果は、強誘電体をチャネルとするトランジスタの初めての例である[3]。さらに詳細を調べるため、抵抗の温度依存性を測定し、BaTiO₃ 単結晶と比較を行った。BaTiO₃ 単結晶は 180K, 270K 付近に 2 つの構造相転移を持つため、降温・昇温サイクルを繰り返すとう割れてしまった。一方、エピタキシャル BaTiO₃ 薄膜はそのような問題は発生しなかった。BaTiO₃ 単結晶は 180K の構造相転移温度以下で急激に抵抗が高くなるのに対し、BaTiO₃ 薄膜はエピタキシャル応力のため 50K 付近まで金属的な温度依存性を示し、単結晶に比べ 2 桁程度低い値となった。

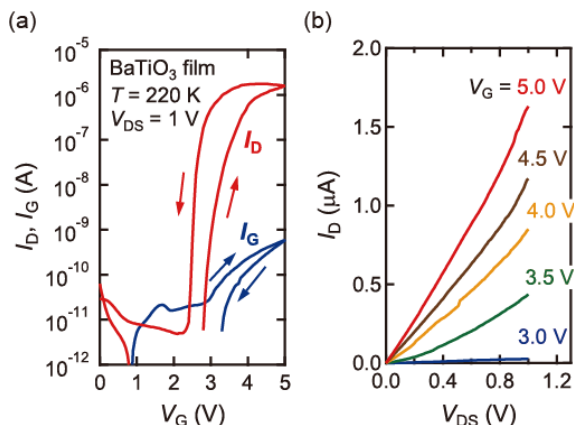


図 2 強誘電体チャネル電界効果型トランジスタの動作。(a) 伝達特性(b)出力特性

5. 今後の計画

酸化亜鉛系では $\nu=3/2$ 準位のスピン偏極を調べ、その機構を解明するとともにトポロジカル量子計算機への応用の可能性を探る。さらに量子散乱時間を伸ばし、新たな量子相を探る。

強誘電体チャネルトランジスタについては、下部電極を積層した二重ゲート構造を構築し、強誘電分極由来の電荷と EDL 由来の電荷を重畳した新しい強誘電積層トランジスタの実証を行う。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] J. Falson, D. Maryenko, B. Friess, D.Zhang, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H. Smet, M. Kawasaki "Even-denominator fractional quantum Hall physics in ZnO", *Nature Phys.*, doi:10.1038/nphys3259 (2015).
- [2] Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Challenges and opportunities of ZnO-related single crystalline heterostructures", *Appl. Phys. Rev.*, **1**, 011303-1-18 (2014).
- [3] M. Ito, Y. Matsubara, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, F. Kagawa, J. T. Ye, Y. Iwasa, K. Ueno, Y. Tokura, M. Kawasaki "Electric double layer transistors with ferroelectric BaTiO₃ channels", *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 222101-1-4 (2014).
- [4] K. Imasaka, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Spontaneous polarization driven Mg concentration profile reconstruction in MgZnO/ZnO heterostructures", *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 242112-1-5 (2014).
- [5] Y. Matsubara, K. S. Takahashi, Y. Tokura, M. Kawasaki "Single crystalline BaTiO₃ films grown by gas-source molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Express.*, **7**, 125502-1-3 (2014).
- [6] D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Polarization dependent Landau level crossing in a two-dimensional electron system in MgZnO/ZnO-heterostructure", *Phys. Rev. B.*, **90**, 245303-1-5 (2014).
- [7] T. Tambo, J. Falson, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Air-Gap gating of MgZnO/ZnO heterostructures", *J. Appl. Phys.*, **116**, 084310-1-5 (2014).

ホームページ等

<http://www.kwsk.t.u-tokyo.ac.jp/>
kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp