

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24226002

研究課題名(和文) 酸化物二次元界面の量子機能とデバイス応用

研究課題名(英文) Quantum functionalities and device applications of two-dimensional electron system at oxide interfaces

研究代表者

川崎 雅司 (Kawasaki, Masashi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：90211862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 167,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、酸化物の分極界面に蓄積される二次元電子を制御し、新たな量子伝導機能を開拓することを目的とした。酸化亜鉛の分極界面において少量の電子を蓄積することにより、100万 cm^2/Vs 超の電子移動度を達成し、 $\nu=3/2$ という新しい偶数分母分数量子ホール状態を観測することに成功した。本系の量子散乱時間は最高品質のヒ化ガリウム系二次元電子ガスを超えるほどに到達した。チタン酸化物強誘電体薄膜・イオン液体の界面において多量の電子を蓄積することにより、強誘電体をチャンネル材料とした新しいトランジスタ動作を実証した。

研究成果の概要(英文)：This research is aimed at controlling two-dimensional electrons accumulated at oxide polar interfaces and developing new quantum conduction functions. By accumulating a small amount of electrons at ZnO polar interface, We have achieved very high electron mobility over one million cm^2/Vs and observed new even-denominator fractional quantum Hall states of $\nu=3/2$. Quantum scattering time of this system is now as high as in the top-quality GaAs two-dimensional gas. By accumulating a large amount of electrons at interfaces between ferroelectric titanate films and ionic liquids, we have demonstrated novel transistor operation with ferroelectric channel materials.

研究分野：物性物理

キーワード：表面・界面物性 量子伝導 強誘電体 超伝導材料

1. 研究開始当初の背景

酸化物には、通常の半導体や金属を遙かに凌駕する物性や機能が豊富にある。これらを電子技術へと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、巨視的な量子輸送現象を制御できるレベルに達している。申請者らは、酸化物界面に二次元電子(2DEG)を蓄積する独自手法を用いて、電界誘起超伝導と量子ホール効果に関する基礎研究とその機能化研究において実績を重ねてきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、それらの基礎研究を一層発展させるとともに、強誘電体をチャンネルとするトランジスタを新たに構築し、自発分極や電界キャリア蓄積を用いた2次元電子系物性の解明と雛形機能デバイスの実証を目的としている。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ることで、元素置換不純物の影響のない環境下での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、未知の量子輸送現象を探索する。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することで、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たな界面輸送状態を実証する。

4. 研究成果

まず、ZnO ヘテロ界面の高品質化を行った。申請時には低温での移動度が 80 万 cm^2/Vs に達しており、高感度な化学分析手法を用いても不純物の検出は困難であった。しかしながら、検出限界以下の不純物混入の可能性を考え、成膜チャンバーの加熱機構を改造した。結果として、低温の移動度を 100 万 cm^2/Vs 超まで向上させることに成功した。ZnO ヘテロ界面の分子線エピタキシー成膜におけるこれまでの技術改善の過程を論文にまとめた[7]。

このヘテロ構造を用いて ZnO 二次元電子系の低温磁気輸送特性を調べると、多数の整数および分数の指標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)[12]。このような偶数分母をもつ分数を指標とする量子ホール状態の発見は、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に展開できるようになり、物理の普遍性を

確かめられる段階にきた。ZnO 二次元電子系の特徴は、ゼーマン分裂幅が大きく、試料回転によりこの状態を出現と消去を自在に制御できる点にある。

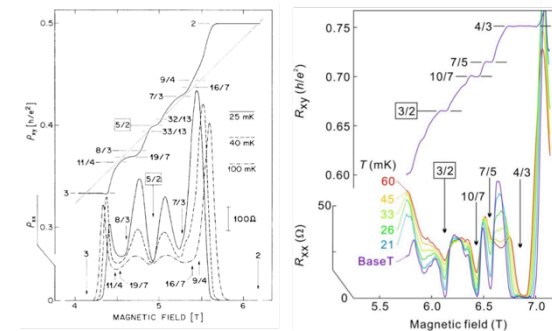


図1. ZnO系における偶数分母分数量子ホール状態の観測とGaAs系との比較。

この移動度の上昇に伴い、従来のようにフォトリソグラフィを施し、ホールバー形状のデバイス加工を行うと、伝導特性が劣化する現象が発生した。そこで、フォトリソグラフィやゲート絶縁膜を用いない、真空をゲート絶縁体とする Air gap トランジスタの開発を行った[33]。この技術により、偶数分母分数量子ホール効果を示す超高品質試料のキャリア濃度を連続的に変調できるようになった。

一方、移動度は電子の後方散乱のみに関わる散乱頻度(τ_{tr})を表すため、散乱の頻度そのものを表す量子散乱時間(τ_q)が結晶の清浄さを表すより正確な指標である。そこで、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酸化亜鉛ヘテロ界面について調べたところ、30ps と非常に長く、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[20]。この結果は、酸化物半導体の結晶成長技術を示す非常に革新的な成果である。また、量子散乱時間のさらなる向上を目指して様々な分極構造をもつヘテロ界面試料を作製・測定した結果、さらなる品質向上のためには、バックグラウンドの不純物と界面における乱れの低減が最も重要であることが明らかになった[4]。

上述の、 $\nu=3/2$ 偶数分母分数量子ホール効果には、スピンの状態が密接に関連していることが予想される。量子ホール状態間の磁場において、試料を回転させるとどのようにスピン状態が変化するか見ることが出来る。図2には試料を磁場に対して回転させたとき、縦抵抗(R_{xx})がどのように変化するかを示す。この抵抗は $\nu=13/2$ の整数量子ホール間の状態を各々の回転角に対応する面内の磁場に対してプロットしてある。図2(b)の挿入図に示されるように、最上位のランダウ準位のスピンの向きによって、 R_{xx} が変化しておりダウンスピンのときは低抵抗、アップスピンのときは高抵抗を示している。これは、アップスピンとダウンスピンの電子の散乱に非対称性があることを示している。通常の半導体で

は、アップとダウンのスピンの散乱頻度は同じであることから、このスピンの非対称性は、酸化亜鉛の強い電子相関によって引き起こされたといえる[32]。

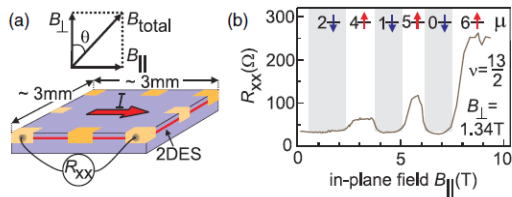


図 2. (a)磁場に対する試料の配置を示す図。(b) $\nu=13/2$ における、縦抵抗(R_{xx})の面内磁場に対する依存性。

さらに、スピンに依存する伝導特性を抽出するため、低磁場のホール抵抗に注目した。図3にはZnO 二次元電子系のホール抵抗から高磁場の線形な正常ホール項を差し引いた値を異常ホール抵抗として磁場に対してプロットした。90K 付近からホール抵抗に非線形性が見られ、25K で最大となり、さらに低温では再び小さくなる振る舞いが観測された。通常このような非線形なホール効果は、異常ホール効果と呼ばれ、磁性半導体で観測される。しかしながら、本研究で用いた酸化亜鉛には磁性元素を含めていない。この異常ホール効果の温度依存性を詳しく調べると、欠陥による自発的な磁性が起源となっていることが明らかとなった[2]。この現象は、図2と同様に電子相関によって自発的な磁化が引き起こされていると考えられ、酸化亜鉛の電子の相関が強いことに起因していると考えられる。図3の結果は他の半導体では見られない酸化亜鉛に特異的な現象であるため、プレスリリースを行ったところ、非常に注目を集めた。

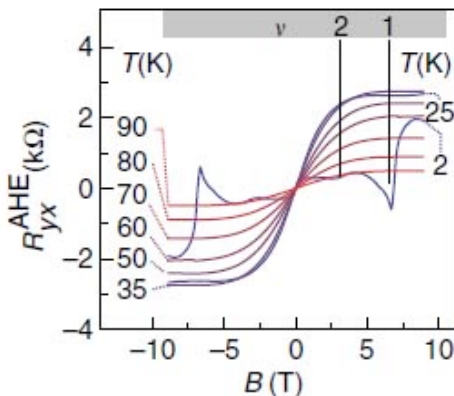


図 3. ZnO 二次元電子系の異常ホール抵抗 (R_{yx}^{AHE}) の様々な温度における磁場依存性。

強誘電体チャンネルトランジスタについては、強誘電体の分極を用いて、強誘電体自身に伝導キャリアを蓄積し、分極の反転によってキャリアの生成・消去を制御することを目的としている。良質な強誘電体薄膜の成膜を行い、表面にキャリアが蓄積可能であることを確認する必要がある。そのため、高品質 BaTiO₃ 薄膜を作製し、電気二重層トランジス

タ(EDLT)を構築した。当初は化学量論組成のズレや不純物の混入などが問題となり高品質薄膜の作製が困難であったが、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 薄膜を作製することに成功した[27]。この技術は、後述の量子ホール効果を示す SrTiO₃ 薄膜の作製にも用いられている。ピエゾ応答顕微鏡(PFM)を用いて BaTiO₃ 薄膜が室温で強誘電体となっていることを確認し、PFM のチップに電圧を印加することで、分極の反転を確認した。

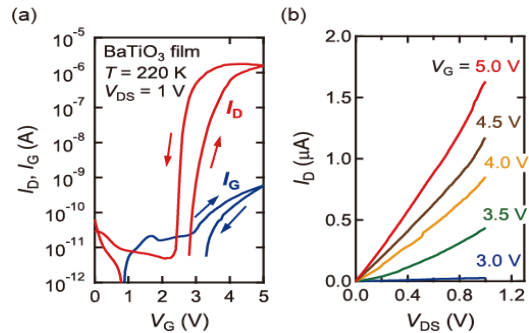


図 4. 強誘電体 BaTiO₃ 薄膜をチャンネルとした電界効果トランジスタの動作。

この BaTiO₃ 薄膜を用いて、イオン液体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 型チャンネルのトランジスタ動作が確認された (図4)。これは、強誘電体をチャンネルとするトランジスタの初めての実証である[25]。

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 単結晶は室温以下で2つの構造相転移を起こすため、温度サイクルにより試料が割れてしまう。一方、エピタキシャル BaTiO₃ 薄膜についてはそのような問題は発生しない。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桁程度低い抵抗値となった。また、キャリア濃度は、 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 程度であり、およそ $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の体積密度となる。これは約 1% のドーピング量に相当し、電界効果を用いたキャリアドーピング量としては非常に高濃度が達成されていることが確認された。

構造相転移による絶縁化が完全に抑えられる PbTiO₃ 薄膜についてもトランジスタの動作に成功した。基板歪みに依存した伝導状態の違いも確認されており、今後分極状態の制御による伝導状態の変化を実証する。Ba を La で一部置換した化学ドーピングでは、強誘電金属状態の実現にも成功した[1]。

有機金属分子線エピタキシー法の開発により、ZnO ヘテロ界面について、SrTiO₃ 薄膜についても、高移動度かつ低キャリア濃度の

試料を作製できるようになった。La をドーブした二次元伝導層をもつデルタドーブ構造をバックゲートにより制御すると、低温において移動度が約 $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に到達し、量子ホール効果の観測に成功した (図 5) [5]。これは、電子相関の強い $3d$ 軌道の示す輸送現象としては驚異的であり、今後軌道やスピン等の自由度が関与した新たな量子輸送現象の開拓が期待される。

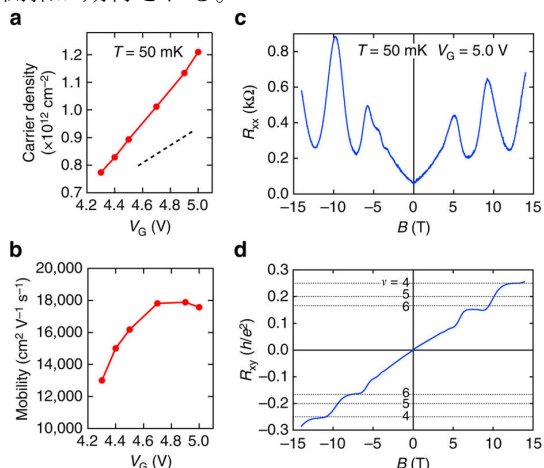


図 5. デルタドーブ SrTiO₃ 薄膜のキャリア濃度・移動度と量子ホール効果の観測。

界面分極が生み出す機能としては、当初の伝導機能に加えて、新たに光機能として、LaFeO₃/SrTiO₃ ヘテロ界面が終端面に応じて光電流の方向を変える振る舞いを発見した (図 6) [6]。これは、界面構造や超格子構造のデザインによる分極方位の制御と、シフトカレントと呼ばれる空間反転対称性の破れた構造において生じる光電流の研究応用への道を新たに拓いた。

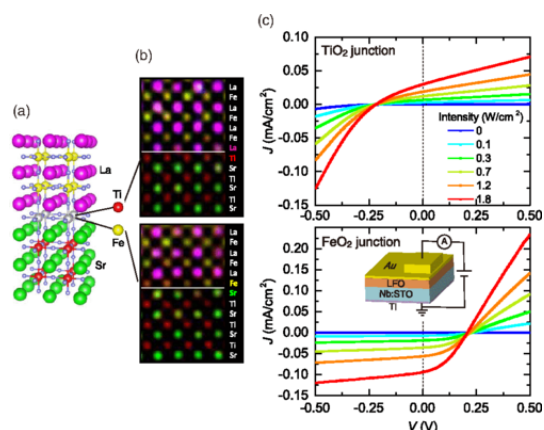


図 6. 界面分極の異なる LaFeO₃/SrTiO₃ ヘテロ構造における光起電力効果。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 125 件)

[1] K. S. Takahashi, Y. Matsubara, M. S. Bahramy, N. Ogawa, D. Hashizume, Y. Tokura,

M. Kawasaki "Polar metal phase stabilized in strained La-doped BaTiO₃ films" *Scientific Reports* (2017) 査読有, 掲載決定

[2] D. Maryenko, A.S. Mishchenko, M.S. Bahramy, A. Ernst, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, N. Nagaosa, M. Kawasaki "Observation of anomalous Hall effect in a non-magnetic two-dimensional electron system" *Nature Communications* **8**, 14777 (2017) 査読有, 10.1038/ncomms14777

[3] Q. Shi, M. A. Zudov, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, K. von Klitzing, J. Smet "Hall field-induced resistance oscillations in MgZnO/ZnO heterostructures" *Phys. Rev. B* **95**, 041411-1-4 (2017) 査読有, 10.1103/PhysRevB.95.041411

[4] A. Vishnuradhan, Y. Kozuka, M. Uchida, J. Falson, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Alloy disorder modulated electron transport at Mg_xZn_{1-x}O/ZnO heterointerface" *AIP Advances* **7**, 015029 (2017) 査読有, 10.1063/1.4974462

[5] Y. Matsubara, K.S. Takahashi, M.S. Bahramy, Y. Kozuka, D. Maryenko, J. Falson, A. Tsukazaki, Y. Tokura, M. Kawasaki "Observation of the quantum Hall effect in δ -doped SrTiO₃" *Nature Communications* **7**, 11631-11637 (2016) 査読有, 10.1038/ncomms11631

[6] M. Nakamura, F. Kagawa, T. Tanigaki, H. S. Park, T. Matsuda, D. Shindo, Y. Tokura, M. Kawasaki "Spontaneous polarization and bulk photovoltaic effect driven by polar discontinuity in LaFeO₃/SrTiO₃ heterojunctions" *Phys. Rev. Lett.* **116**, 156801-1-5 (2016) 査読有, 10.1103/PhysRevLett.116.156801

[7] J. Falson, Y. Kozuka, M. Uchida, J. H. Smet, T. Arima, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "MgZnO/ZnO heterostructures with electron mobility exceeding $1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ " *Scientific Reports* **6**, 26598 (2016) 査読有, 10.1038/srep26598

[8] D.K. Archer, A. Shchepetilnikov, Y. Nefyodov, J. Falson, Dmitriev, Y. Kozuka, D. Maryenko, A. Tsukazaki, S. Dorozhkin, I. Kukushkin, M. Kawasaki, J. Smet "Observation of microwave induced resistance oscillations in MgZnO/ZnO heterostructures" *Phys. Rev. B* **93**, 041410-1-5 (2016) 査読有, 10.1103/PhysRevB.93.041410

[9] T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, W. Sano, A. Tsukazaki, T. Arima, M. Kawasaki "All-in-all-out magnetic domain wall conduction in a pyrochlore iridate heterointerface" *Phys. Rev. B* **93**, 064419-1-6 (2016) 査読有, 10.1103/PhysRevB.93.064419

[10] T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, W. Sano, A. Tsukazaki, T. Arima, M. Kawasaki "All-in-all-out magnetic domain size in pyrochlore iridate thin films as probed by local magnetotransport" *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 022402-1-5 (2016) 査読有, 10.1063/1.4939742

- [11] M. Uchida, M. Kawasaki "Topological Oxide Electronics" *J. Phys. D-Appl. Phys.* **49**, 433001 (2016) 査読有, 10.1088/0022-3727/49/43/433001
- [12] 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.* **11**, 347-351 (2015) 査読有, 10.1038/nphys3259
- [13] D. Maryenko, J. Falson, M. S. Bahramy, I. A. Dmitriev, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Spin-selective electron quantum transport in nonmagnetic MgZnO/ZnO heterostructures" *Phys. Rev. Lett.* **115**, 197601-1-5 (2015) 査読有, 10.1103/PhysRevLett.115.197601
- [14] T. C. Fujita, Y. Kozuka, M. Uchida, A. Tsukazaki, T. Arima, M. Kawasaki "Odd-parity magnetoresistance in pyrochlore iridate thin films with broken time-reversal symmetry" *Scientific Reports* **5**, 9711-9716 (2015) 査読有, 10.1038/srep09711
- [15] V. Kozlov, A. Van'kov, S. Gubarev, I. Kukushkin, V. Solovyev, J. Falson, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, J. H. Smet "Microwave magnetoplasma resonances of two-dimensional electrons in MgZnO/ZnO heterojunctions" *Phys. Rev. B* **91**, 085304-1-6 (2015) 査読有, 10.1103/PhysRevB.91.085304
- [16] Y. Ohuchi, Y. Kozuka, M. Uchida, K. Ueno, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Topological Hall effect in thin films of the Heisenberg ferromagnet EuO" *Phys. Rev. B* **91**, 245115-1-5 (2015) 査読有, 10.1103/PhysRevB.91.245115
- [17] D. Karcher, A. Shchepetilnikov, Y. Nefyodov, J. Falson, I. Dmitriev, Y. Kozuka, D. Maryenko, A. Tsukazaki, S. Dorozhkin, I. Kukushkin, M. Kawasaki, J. Smet "Observation of microwave induced resistance oscillations in MgZnO/ZnO heterostructures" *Phys. Rev. B* **93**, 041410-1-5 (2015) 査読有, 10.1103/PhysRevB.91.041410
- [18] M. Nakamura, Y. Krockenberger, J. Fujioka, M. Kawasaki, Y. Tokura "Perovskite LaRhO₃ as a p-type active layer in oxide photovoltaics" *Appl. Phys. Lett.* **106**, 072103-1-5 (2015) 査読有, 10.1063/1.4909512
- [19] V. Solovyev, A. Van'kov, I. Kukushkin, J. Falson, D. Zhang, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H. Smet, M. Kawasaki "Optical probing of MgZnO/ZnO heterointerface confinement potential energy levels" *Appl. Phys. Lett.* **106**, 082102-1-4 (2015) 査読有, 10.1063/1.4913313
- [20] J. Falson, Y. Kozuka, J. H. Smet, T. Arima, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Electron scattering times in ZnO based polar heterostructures" *Appl. Phys. Lett.* **107**, 082102-1-5 (2015) 査読有, 10.1063/1.4929381
- [21] E. Majima, Y. Kozuka, M. Uchida, M. Nakamura, M. Kawasaki "Band alignment and photovoltaic effect of epitaxial α -PbO thin films" *Appl. Phys. Express* **8**, 074001-1-4 (2015) 査読有, 10.7567/APEX.8.074001
- [22] M. Uchida, J. Falson, Y. Segawa, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Calibration and control of in-plane Mg doping distribution in Mg_xZn_{1-x}O/ZnO heterostructures grown by molecular beam epitaxy" *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 028004-1-3 (2015) 査読有, 10.7567/JJAP.54.028004
- [23] Z. Wang, M. Saito, C. Chen, Y. Matsubara, K. Ueno, M. Kawasaki, Y. Ikuhara "Full determination of individual reconstructed atomic columns in intermixed heterojunctions" *Nano Lett.* **14**, 6584-6589 (2014) 査読有, 10.1021/nl503212j
- [24] Z. Sheng, M. Nakamura, W. Koshibae, T. Makino, Y. Tokura, M. Kawasaki "Magneto-tunable photocurrent in manganite based heterojunctions" *Nature Communications* **5**, 4584 (2014) 査読有, 10.1038/ncomms5584
- [25] 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) 査読有, 10.1063/1.4881059
- [26] 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) 査読有, 10.1063/1.4884383
- [27] 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) 査読有, 10.7567/APEX.7.125502
- [28] K. Ueno, T. Nojima, S. Yonezawa, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Y. Maeno "Effective thickness of two-dimensional superconductivity in a tunable triangular quantum well of SrTiO₃" *Phys. Rev. B* **89**, 020508-1-5 (2014) 査読有, 10.1103/PhysRevB.89.020508
- [30] M. Brasse, S. M. Sauther, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, Ch. Heyn, M. A. Wilde, M. Kawasaki, D. Grundler "Enhanced quantum oscillatory magnetization and nonequilibrium currents in an interacting two-dimensional electron system in MgZnO/ZnO with repulsive scatterers" *Phys. Rev. B* **89**, 075307-1-5 (2014) 査読有, 10.1103/PhysRevB.89.075307
- [31] Y. Ohuchi, Y. Kozuka, N. Rezaei, M. S. Bahramy, R. Arita, K. Ueno, A. Tsukazaki, M. Kawasaki "Photo-induced sign inversion of the anomalous Hall effect in EuO thin films" *Phys. Rev. B* **89**, 121114-1-5 (2014) 査読有, 10.1103/PhysRevB.89.121114

- [32] 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) 査読有, 10.1103/PhysRevB.90.245303
- [33] 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) 査読有, 10.1063/1.4894155
- [34] K. Ueno, H. Shimotani, H. Yuan, J. T. Ye, M. Kawasaki, Y. Iwasa "Field-Induced Superconductivity in Electric Double Layer Transistors" *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 032001-1-6 (2014) 査読有, 10.7566/JPSJ.83.032001
- [35] T. Makino, Y. Segawa, A. Tsukazaki, H. Saito, S. Takeyama, S. Akasaka, K. Nakahara, M. Kawasaki "Magneto-photoluminescence of charged excitons from $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ heterojunctions" *Phys. Rev. B*, **87**, 085312-1-7 (2013) 査読有, 10.1103/PhysRevB.87.085312
- [36] Y. Kozuka, S. Teraoka, J. Falson, A. Oiwa, A. Tsukazaki, S. Tarucha, M. Kawasaki "Rashba spin-orbit interaction in a $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ two-dimensional electron gas studied by electrically detected electron spin resonance" *Phys. Rev. B* **87**, 205411-1-5 (2013) 査読有, 10.1103/PhysRevB.87.205411
- [37] A. Tsukazaki, A. Ohtomo, M. Kawasaki "Surface and interface engineering of ZnO based heterostructures fabricated by pulsed-laser deposition" *J. Phys. D-Appl. Phys.* **47**, 034003-1-19 (2013) 査読有, 10.1088/0022-3727/47/3/034003
- [38] V. E. Kozlov, A. B. Van'kov, S. I. Gubarev, I. V. Kukushkin, J. Falson, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, J. H. Smet "Observation of plasma and magnetoplasma resonances of two-dimensional electrons in a single MgZnO/ZnO heterojunction" *JETP Lett.* **98**, 223-226 (2013) 査読有, 10.1134/S0021364013170074

[学会発表] (計 253 件)

- [1] M. Kawasaki "High mobility oxide semiconductors hosting unusual quantum-, anomalous- and topological-Hall effects" ISCSI-VII/ISTDM2016 (基調講演) (国際学会) 名古屋大学 (愛知県名古屋市) 2016年6月7日~2016年6月11日
- [2] M. Kawasaki "Unconventional Quantum Hall Effect in New Materials" Quantum Nanostructures and Electron-Nuclear Spin Interactions (基調講演) (国際学会) 東北大学 (宮城県仙台市) 2015年10月19日~2015年10月23日
- [3] M. Kawasaki "Quantum transport at oxide interfaces" 32nd International Conference on the Physics of

Semiconductors ICPS 2014 (基調講演) (国際学会)

2014年8月11日~2014年8月15日
テキサス (アメリカ)

[4] M. Kawasaki "Quantum transport of two dimensional electron system at the oxide interfaces"

Strongly Correlated Electron Systems SCES2014 (基調講演) (国際学会)

2014年7月7日~2014年7月11日
グルノーブル (フランス)

[図書] (計 1 件)

M. Kawasaki 他

Quantum Hall Effects: Recent Theoretical and Experimental Developments

World Scientific Pub Co Inc.

2013, 891

[その他]

ホームページ等

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

kawasaki@ap.t.u-tokyo.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川崎 雅司 (KAWASAKI, Masashi)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 90211862

(3) 連携研究者

小塚 裕介 (KOZUKA, Yusuke)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号: 70580372