

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2016

課題番号：15H05425

研究課題名(和文)メソスコピック伝導を用いた酸化亜鉛量子ホール状態の究明

研究課題名(英文)ZnO quantum Hall states revealed by mesoscopic conduction

研究代表者

打田 正輝(Uchida, Masaki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：50721726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,300,000円

研究成果の概要(和文)：酸化亜鉛系二次元電子ガスについて、電子移動度のさらなる向上を目指して分子線エピタキシー成長の改良を進め、メソスコピック伝導の手法を用いた極低温量子輸送測定を行った。アンチドット構造における整合性抵抗振動の周期変化から、偶数分母分数量子ホール状態においてスピン偏極した複合粒子の形成を示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have improved molecular beam epitaxy growth of zinc-oxide two-dimensional electron gas for further enhancement of its mobility, and performed ultralow-temperature quantum transport measurements adopting mesoscopic conduction methods. Results of oscillation period change observed in various anti-dot structures suggest formation of the spin-polarized composite particles in the even-denominator fractional quantum Hall state.

研究分野：物性物理学

キーワード：表面・界面 量子伝導 量子ホール効果 二次元電子ガス 高移動度 酸化亜鉛 酸化物薄膜

## 1. 研究開始当初の背景

デバイスの構造を電子の平均自由行程ほど小さくすると、空間的な境界条件を反映した伝導現象が強く現れる。このような振る舞いはメソスコピック伝導と呼ばれ、ヒ化ガリウム系半導体界面を中心に盛んに研究が行われてきた。これまで、メソスコピック系のコンセプトやテクニックは、酸化物材料の研究においてほとんど用いられてこなかった。しかしながら、酸化物ヘテロ構造の原子スケール成長技術は目覚ましい進展を続けており、その多彩な電子相の幾つかは、現在の微細加工技術による実験を行うのに十分な電子移動度をもつことが明らかになってきた。

研究室では、酸化亜鉛系ヘテロ界面の高品質化に長年にわたって取り組み、整数量子ホール効果・分数量子ホール効果の観測に代表されるように、その電子移動度を着実に向上させてきた。その平均自由行程は、複雑なメソスコピック構造を用いた実験が十分可能なレベルに達している。特に近年、これまでヒ化ガリウム系でのみ観測されていた偶数分母の分数量子ホール効果に対して、酸化亜鉛系でも同様の分数量子ホール効果を発見することに成功した。偶数分母の分数量子ホール状態は、複合フェルミオン描像で説明できる奇数分母の状態とは異なり、非可換統計に従う準粒子をもつ基底状態が実現しうる系として、熱心な検討が続けられている。このような背景のもと、研究を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究では、酸化亜鉛ヘテロ界面のさらなる高移動度化を進め、主にメソスコピック伝導の手法を用いることで、偶数分母分数量子ホール状態の解明を進めることを目的としている。

## 3. 研究の方法

メソスコピック伝導特性の正確な検出のためには、高移動度試料の安定した供給が必要である。移動度の値は、電子の平均自由行程、並びに必要な微細加工のスケールを決めるため、装置改良を含め成膜・加工行程の洗練にたえず並行して取り組む。特に、分子線エピタキシー装置について、高温での酸化に耐えられる基板ホルダー及びマニピュレータを導入することで、移動度の劇的な向上を目指す。

アンチドット構造と呼ばれる、周期的にポテンシャル障壁を導入した格子構造を作製し、磁場掃引に対する伝導特性を測定する。加工損傷をより抑えるために、ネガ型レジストの塗布によって周期的ポテンシャルを導入する。高移動度酸化亜鉛ヘテロ界面試料を用いて、ドットのサイズ・間隔を最適化した

アンチドット構造を作製し、半古典的な円運動に対応した磁場での整合性抵抗振動を検証する。さらに、偶数分母分数量子ホール状態について同様に精密な測定を行い、零磁場付近に現れる通常の整合性磁気抵抗振動と周期を比較する。完全スピン偏極による2倍の周期変調が観測されれば、Pfaffian状態を支持する結果となる。

## 4. 研究成果

酸化亜鉛二次元電子ガスの作製については、 $1,000,000\text{cm}^2/\text{Vs}$  を超える電子移動度をもつ界面試料を安定的に作製することに成功した。分子線エピタキシー成膜技術におけるこれまでの改良の過程の詳細を論文にまとめた。また、酸化亜鉛ヘテロ界面の分極差によって実現される量子散乱時間は、30ps と非常に長く、ヒ化ガリウム系二次元電子ガスにおける10ps程度の値を超えるほどまでに到達していることが明らかになった。こ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しその極低温量子輸送測定を行った。量子散乱時間と輸送散乱時間の変化を系統的に比較することにより、酸化亜鉛ヘテロ界面の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。

既に観測に成功していた $\nu=3/2$  という新しい偶数分母分数量子ホール状態については、様々なポテンシャル変調をもつアンチドット構造を作製し、整合性抵抗振動の変化を調べた。偶数分母分数量子ホール状態における変化の観測から、スピン偏極した複合粒子の形成を示唆する結果が得られた。エアギャップトランジスタ構造やアンドレーエフ反射・ジョセフソン効果を示す超伝導接合等の作製について基盤技術の確立が進んでおり、今後、偶数分母分数量子ホール状態の更なる解明を進める。

## 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 9件)

[1] A. Vishnuradhan, Y. Kozuka, M. Uchida, J. Falson, A. Tsukazaki, and M. Kawasaki  
“Alloy disorder modulated electron transport at  $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$  heterointerface”  
AIP Advances 7, 015029 (2017) 査読有  
10.1063/1.4974462

[2] M. Uchida and M. Kawasaki  
“Topological Oxide Electronics” in “The 2016 Oxide Electronic Materials and Oxide Interfaces Roadmap”  
Journal of Physics D: Applied Physics 49,

- 433001 (2016) 査読有  
10.1088/0022-3727/49/43/433001
- [3] S. Nishihaya, M. Uchida, Y. Kozuka, Y. Iwasa, and M. Kawasaki  
“Evolution of Insulator-Metal Phase Transitions in Epitaxial Tungsten Oxide Films during Electrolyte-Gating”  
ACS Applied Materials and Interfaces 8, 22330 (2016) 査読有  
10.1021/acsami.6b06593
- [4] J. Falson, Y. Kozuka, M. Uchida, J. H. Smet, T. Arima, A. Tsukazaki, and M. Kawasaki  
“MgZnO/ZnO heterostructures with electron mobility exceeding  $1 \times 10^6$  cm<sup>2</sup>/Vs”  
Scientific Reports 6, 26598 (2016) 査読有  
10.1038/srep26598
- [5] T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, W. Sano, A. Tsukazaki, T. Arima, and M. Kawasaki  
“All-in-all-out magnetic domain wall conduction in a pyrochlore iridate heterointerface”  
Physical Review B 93, 64119 (2016) 査読有  
10.1103/PhysRevB.93.064419
- [6] M. Uchida, K. Ohba, Y. Ohuchi, Y. Kozuka, and M. Kawasaki  
“Epitaxially Stabilized Oxide Composed of Twisted Triangular-Lattice Layers”  
Chemistry of Materials 28, 1165 (2016) 査読有  
10.1021/acs.chemmater.5b04702
- [7] M. Ito, M. Uchida, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, and M. Kawasaki  
“Effective carrier doping and metallization in La<sub>x</sub>Sr<sub>2-x-y</sub>Ba<sub>y</sub>IrO<sub>4-δ</sub> thin films”  
Physical Review B 93, 45139 (2016) 査読有  
10.1103/PhysRevB.93.045139
- [8] T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, S. Ogawa, A. Tsukazaki, T. Arima, and M. Kawasaki  
“All-in-all-out magnetic domain size in pyrochlore iridate thin films as probed by local magnetotransport”  
Applied Physics Letters 108, 22402 (2016) 査読有  
10.1063/1.4939742
- [9] M. Uchida, W. Sano, K. S. Takahashi, T. Koretsune, Y. Kozuka, R. Arita, Y. Tokura, and M. Kawasaki  
“Field-direction control of the type of charge carriers in nonsymmorphic IrO<sub>2</sub>”  
Physical Review B 91, 241119 (2016) 査読有  
10.1103/PhysRevB.91.241119
- [学会発表](計 8件)
- [1] A. Vishnu Radhan, 小塚裕介, 打田正輝, J. Falson, 塚崎敦, 川崎雅司

- “Alloy Disorder Modulated Electron Transport at Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O/ZnO Heterointerface”  
第64回応用物理学会春季学術講演会  
(17a419-2)  
2017年03月17日 ~ 2017年03月17日  
パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
- [2] T. C. Fujita, M. Uchida, Y. Kozuka, W. Sano, A. Tsukazaki, T. Arima, and M. Kawasaki  
“Metallic Domain Wall at All-in-all-out Pyrochlore Iridate Heterointerface”  
23rd International Workshop on Oxide Electronics (国際学会)  
2016年10月14日 ~ 2016年10月14日  
南京(中国)
- [3] 小塚裕介, 阪口敦史, Aswin Vishnu Radhan, Joseph Falson, Denis Maryenko, 打田正輝, 塚崎敦, 川崎雅司  
「Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O/ZnOヘテロ構造を用いた二次元電子系/超伝導接合」  
日本物理学会2016年秋季大会(13aAB-8)  
2016年09月13日 ~ 2016年09月13日  
金沢大学(石川県金沢市)
- [4] 藤田貴啓, 打田正輝, 小塚裕介, 佐野航, 小川翔平, 塚崎敦, 有馬孝尚, 川崎雅司  
「パイロクロア型イリジウム酸化物ヘテロ界面における磁気ドメイン壁伝導」  
日本物理学会第71回年次大会(21pBN-16)  
2016年03月21日 ~ 2016年03月21日  
東北学院大学(宮城県仙台市)
- [5] 大羽健太, 打田正輝, 大内祐貴, 小塚裕介, 川崎雅司  
「ツイストした三角格子層からなる新層状酸化物薄膜の作製」  
第63回応用物理学会春季学術講演会(20pH111-4)  
2016年03月20日 ~ 2016年03月20日  
東京工業大学(東京都目黒区)
- [6] M. Uchida  
“Epitaxially stabilized oxide film composed of twisted triangular-lattice layers”  
Collaborative Conference on Crystal Growth 2015 (招待講演)(国際学会)  
2015年12月16日 ~ 2015年12月16日  
香港(中国)
- [7] 打田正輝, 佐野航, 高橋圭, 是常隆, 小塚裕介, 有田亮太郎, 十倉好紀, 川崎雅司  
「ノンシンモルフィック半金属IrO<sub>2</sub>におけるキャリアタイプの磁場方位制御」  
日本物理学会2015年秋季大会(18aDC-6)  
2015年09月18日 ~ 2015年09月18日  
関西大学(大阪府吹田市)
- [8] 藤田貴啓, 小川翔平, 打田正輝, 小塚裕介, 川崎雅司  
「パイロクロア型Ir酸化物薄膜の磁気ドメイ

ン形成における格子歪の効果」  
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会(14p2H-  
3)  
2015年09月14日～2015年09月14日  
名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

打田 正輝 (UCHIDA, Masaki)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号：50721726

### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：