

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610098

研究課題名(和文)パイロクロア型イリジウム酸化物界面におけるトポロジカル伝導

研究課題名(英文)Topological conduction in pyrochlore iridate interface

研究代表者

打田 正輝(Uchida, Masaki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50721726

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ワイル半金属と呼ばれる新しいトポロジカル相の候補物質であるパイロクロア型イリジウム酸化物 $R2Ir2O7$ について、単結晶薄膜・ヘテロ界面の作製を行い、時間反転対称性の破れた二種類の磁気ドメイン(all-in-all-out・all-out-all-in秩序構造)とその界面における伝導現象の研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：Pyrochlore oxides possessing all-in-all-out spin ordering have attracted burgeoning interest as a new topological candidate material called Weyl semimetal. In this research, we have tailored pyrochlore iridate single-crystalline films and heterostructures, and then investigated a nontrivial metallic surface state appearing at all-in-all-out/all-out-all-in single magnetic domain wall formed at the heterointerface.

研究分野：物性物理学

キーワード：ワイル半金属 イリジウム酸化物 表面・界面 パイロクロア格子 時間反転対称性 磁気ドメイン
酸化物薄膜 磁気伝導

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル絶縁体は、ディラック電子として表現される表面状態をもつ量子状態であり、強いスピン軌道相互作用を持つカルコゲナイド半導体等においてその存在が確認されている。一方、ワイル半金属と呼ばれる、新しい表面状態をもつトポロジカル相が注目を集め始めている。その代表的候補物質として、強いスピン軌道相互作用と電子相関を併せ持つパイロクロア型イリジウム酸化物が挙げられ、数多くの理論的研究がなされている。その表面状態の伝導特性を詳しく調べるためには、単一磁気秩序構造界面を利用する必要であると考えられる。

研究室では、パイロクロア型イリジウム酸化物薄膜の作製を進めており、all-in-all-out / all-out-all-in 磁気秩序構造の冷却磁場による制御にも成功していた。これにより、単一磁気秩序構造界面を利用した、パイロクロア型イリジウム酸化物における表面伝導特性の実験が可能となった。このような背景のもと、研究を開始した。

2. 研究の目的

パイロクロア型イリジウム酸化物薄膜におけるスピン秩序構造の制御手法を利用して、そのスピン秩序構造界面（磁気ドメイン壁）における伝導特性を体系的に調べ上げる。これにより、ワイル半金属におけるトポロジカルな伝導特性とその電子状態の解明を目指した。

3. 研究の方法

フェルミアーク状態と呼ばれる新しい表面状態をもつワイル半金属相においては、その表面状態の有力な検出手法として、スピン秩序構造の界面（磁気ドメイン壁）の利用が考えられる。実験的にも、パイロクロア型イリジウム酸化物多結晶において、磁気ドメイン壁上のトポロジカルな伝導を示唆する巨大な異常磁気抵抗効果が報告されている。本研究では、ワイル半金属の表面伝導特性を体系的に調べるために、薄膜ヘテロ界面の利用を新たに提案する。パイロクロア型イリジウム酸化物薄膜における磁気秩序の選択的制御手法を応用し、単一磁気ドメイン壁においてその伝導特性を定量的に解明する。

例えば、薄膜ヘテロ界面における単一磁気ドメイン壁の実現は、下記の手法により可能である。パイロクロア型イリジウム酸化物 ($R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$) においては、一般に二種類の磁気秩序(all-In-all-Out / all-Out-all-In)の縮退が残る。 $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ において、基板からの歪みと磁場を同時にかけたまま冷却することで、一方の磁気構造を選択的に形成することができる。どちらの磁気構造が安定となるかは、冷却磁場 H_C の方位と歪みの向きによって決ま

る。 YSZ 基板の場合、 $\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の場合は圧縮歪み、 $\text{Y}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ の場合は引張り歪みとなるため、同一方位の冷却磁場 H_C について逆の磁気構造が形成される。すなわち、 $\text{Y}_2\text{Ir}_2\text{O}_7/\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 界面では all-in-all-out / all-out-all-in の磁気ドメイン壁が実現される。また、挿引磁場 H_S に対して磁気構造が切り替わる $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7 \cdot \text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 等と組み合わせた $\text{Tb}_2\text{Ir}_2\text{O}_7/\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7 \cdot \text{Nd}_2\text{Ir}_2\text{O}_7/\text{Eu}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ においても、all-in-all-out / all-out-all-in の磁気ドメイン壁が実現できると期待される。これらのドメイン壁は、ワイル半金属に起因した表面状態が予測されている界面そのものである。

4. 研究成果

ワイル半金属と呼ばれる新しいトポロジカル相の候補物質であるパイロクロア型イリジウム酸化物について、単結晶薄膜・ヘテロ界面の作製を行い、時間反転対称性の破れた二種類の磁気ドメイン(all-in-all-out・all-out-all-in 秩序構造)とその界面における伝導現象の研究を進めた。

具体的な実績として、系統的な絶縁体金属転移を示す一連のパイロクロア型イリジウム酸化物($R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$, $R=\text{Pr}$, Nd , Eu , Gd , Tb , Dy , Y)単結晶エピタキシャル薄膜の作製に成功し、磁気モーメントやエピタキシャル応力の違いを踏まえた冷却・挿引磁場による磁気ドメイン構造の制御手法の体系化に成功した。また、二種類の磁気ドメインの磁気応答の違いを利用して、パイロクロア型イリジウム酸化物薄膜における磁気ドメインサイズの決定を行った。さらに、挿引磁場に対して応答の異なる二種のパイロクロア型イリジウム酸化物からなるヘテロ接合を作製し、図1に示すように、all-in-all-out/all-out-all-in 磁気ドメイン壁の形成に伴う界面伝導の観測を行った。これにより、単一磁気ドメイン壁における伝導状態の温度依存性の評価や異常ホール効果の検出に成功した。

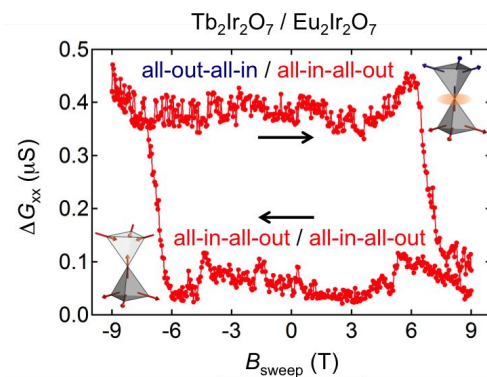


図1 単一磁気ドメイン壁における界面伝導。

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 7 件)

[1] 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 (2015) 査読有
10.1038/srep09711

[2] Y. Ohuchi, Y. Kozuka, M. Uchida, K. Ueno, A. Tsukazaki, and M. Kawasaki
“Topological Hall effect in thin films of the Heisenberg ferromagnet EuO”
Physical Review B 91, 245115 (2015) 査読有
10.1103/PhysRevB.91.245115

[3] 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 IrO₂”
Physical Review B 91, 241119 (2016) 査読有

[4] 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

[5] M. Ito, M. Uchida, Y. Kozuka, K. S. Takahashi, and M. Kawasaki
“Effective carrier doping and metallization in La_xSr_{2-x-y}Ba_yIrO_{4-δ} thin films”
Physical Review B 93, 45139 (2016) 査読有
10.1103/PhysRevB.93.045139

[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] 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

〔学会発表〕(計 8 件)

[1] 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)

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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 IrO₂ 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)

[5] 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)

[6] 小川翔平, 藤田貴啓, 打田正輝, 小塚裕介, 塚崎敦, 有馬孝尚, 川崎雅司
「パイロクロア型 Ir 酸化物薄膜の磁気ドメイン制御と局所輸送特性」
第 62 回応用物理学会春季学術講演会(11p-D10-2)
2015年03月11日 ~ 2015年03月11日
東海大学(神奈川県平塚市)

[7] 藤田貴啓, 佐野航, 打田正輝, 小塚裕介, 塚崎敦, 有馬孝尚, 川崎雅司
「パイロクロア型 Ir 酸化物の磁気ドメイン境界における磁気輸送現象」
第 62 回応用物理学会春季学術講演会(11p-D10-1) (招待講演)
2015年03月11日 ~ 2015年03月11日
東海大学(神奈川県平塚市)

[8] 藤田貴啓, 佐野航, 打田正輝, 小塚裕介, 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接合における磁気ドメイン境界の制御と界面伝導の観測」
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会(19p-

A10-7)
2014年09月19日～2014年09月19日
北海道大学(北海道札幌市)

〔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：