

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：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707016

研究課題名(和文)鏡面对称性と強い電子相関がもたらす新奇なトポロジカル量子現象の分光イメージング

研究課題名(英文)Imaging unconventional topological insulators

研究代表者

岡田 佳憲 (Okada, Yoshinori)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教

研究者番号：00707656

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 22,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、単純な金属でも単純な絶縁体でもない、特殊な金属状態を結晶表面に有するトポロジカル絶縁体(TI)が注目されており、基礎・応用の両観点から世界中で盛んに研究されている。本研究では、トポロジカル結晶絶縁体(TCI)と呼ばれる新型のTIであるPb_{1-x}Sn_xSeに着目し、走査トンネル顕微鏡を用いた計測で電子状態を原子レベルで明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Topological insulator (TI) is a new class of quantum material, which cannot be simply classified neither metal, insulator, nor superconductor. TIs have been acquiring considerable attention in broad fields ranging from material science, condensed matter physics, high energy physics, and mathematics, after the theoretical prediction of its existence. Beyond previously known topological insulators, a new class of topological insulator called topological crystalline insulators (TCIs) provide exciting platform for exploring extraordinarily tunability of topologically protected Dirac electron. In this study, using spectroscopic scanning tunneling microscope, we clarified characteristic electronic states of TCI at the atomic scale.

研究分野：物性物理

キーワード：トポロジカル絶縁体 走査トンネル顕微鏡 トンネル分光

1. 研究開始当初の背景

(1) トポロジカル絶縁体

近年、単純な金属でも単純な絶縁体でもない、トポロジカル結晶絶縁体(TI)と呼ばれる物質群が大きな注目を集めている。3次元のバルク結晶である TI の表面には、波数(k)とエネルギー(E)の分散関係が線形となる、いわゆる2次元 Dirac 電子系が存在し、基礎・応用の両観点からグラフェンを越える可能性を有する物質として世界中で盛んに研究されている。

(2) トポロジカル結晶絶縁体

トポロジカル絶縁体(TI)には、トポロジカル性が時間反転対称性に起因する従来型(Z_2 -TI)と、結晶対称性に起因する新型(トポロジカル結晶絶縁体: TCI)の2種類に分けることができる。後者の TCI は、比較的新しい物質群であり、結晶の対称性の変化によって Dirac バンドが変調されることが予想される。TCI の電子状態を原子レベルで理解することが重要な課題である。

2. 研究の目的

走査トンネル顕微鏡(STM)を用いた原子レベルでの表面観察と、STMを用いた高分解能トンネル分光実験を駆使し、TCIにおけるDiracバンドの制御指針となる基盤を原子レベルで構築することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) $Pb_{1-x}Sn_xSe$

本研究では TCI の一つである $Pb_{1-x}Sn_xSe$ に着眼する。この物質に着眼することで、様々なドーピング量 x で、結晶歪みとバンド構造の関係を系統的に調べることが出来る。

(2) STMを用いた計測

STM観察により、結晶表面に存在する歪みをサブオングストロームの分解能で調べることが出来る。さらに、Dirac電子が形成する定在波のパターン解析、ならびに磁場中のトンネルスペクトルに出現するランダウレベルの解析を行うことで、バンド構造を直接的に調べることが出来る。よって、結晶構造の変化とバンド構造の変調の相関を詳細に調べることができ、Diracバンドの制御指針を原子レベルで構築することができる。

4. 研究成果

(1) 結晶歪み

図1左上は結晶表面に存在する歪みをSTMで直接的に可視化した結果である。結晶表面で重要となる鏡面は2種類あり(図1右上における赤の実線と青の破線)、この一方のみの鏡面对称性が破れた特殊な状況が実現していることがわかった。

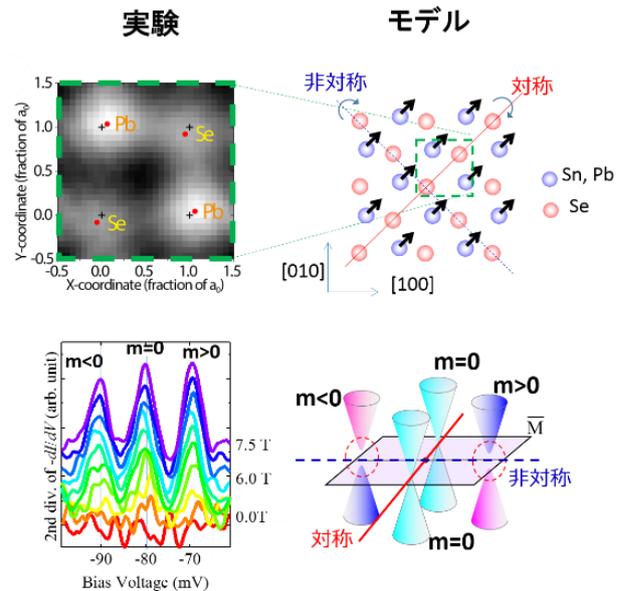


図1 走査トンネル顕微鏡(STM)による結晶歪みの可視化。(左上) STMで観測される原子像。(右上) 結晶歪みのモデル。図中の矢印は歪みの方向と大きさを示す。(左下) 3個の $n=0$ に対応するランダウレベルと、(右下) バンド構造のモデル。

(2) バンド構造

上記のような特殊な結晶歪みが存在する帰結として、4個のDirac錘のうち2個のみにエネルギーギャップが出現することがわかった(図1下)。結晶表面で鏡対象性が破れる様相によって4個のDirac錘は様々にエネルギーギャップを持ちうることを示している。TCIならではの性質を原子レベルで実験的に示せたことは大きな成果である。

(3) バンド構造のドーピング依存性

図2はトンネルスペクトルの磁場・ドーピング依存性である。この結果を詳細に解析し、バンド構造のドーピング依存性を調べた。図3はギャップの大きさ、ならびに結晶歪みの大きさをドーピング量の変化と共にプロット

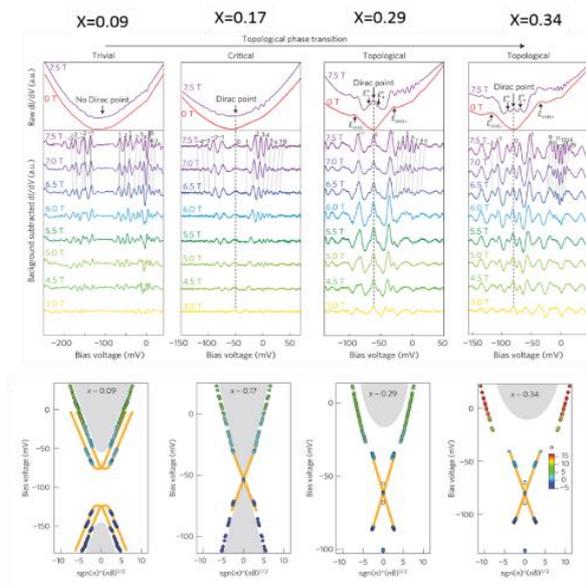


図2 走査トンネル顕微鏡 (STM) を用いた磁場中のトンネル分光によるトポロジカル結晶絶縁体 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ のバンド構造のドーピング x 依存性。(上) STM を用い磁場中のトンネル分光。磁場を印加することでランダウ量子化準位が形成される。(中) ランダウ量子化準位を解析することで得られるバンド構造。(下) バンド構造の模式図。

したものである。結晶歪みの大きさはドーピング x によらず存在するが、Dirac ギャップの大きさは x の減少と共に小さくなっていることがわかった。

(3) Dirac ギャップ形成メカニズム

結晶歪みと Dirac ギャップの因果関係を理解するため、理論的な考察も推し進めた。その結果、表面 Dirac 電子が有する波動関数の広がり効果が、Dirac ギャップの大きさを支配する主要な因子であることをつきとめた(図3)。つまり、表面 Dirac 電子が有する波動関数の広がりが大きく(小さく)なるほど、結晶表面に局在する結晶歪みの効果は弱められ(強められ)、Dirac ギャップの大きさは小さく(大きく)なることを考慮することで、ギャップのドーピング依存性を理解することが出来る。

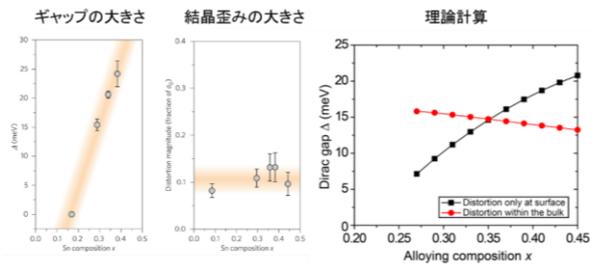


図3 ギャップの大きさを決める因子。(左) ギャップの大きさ Δ のドーピング x 依存性。(中) 歪みの大きさの x 依存性。(右) Δ と x の関係を理論的に解析した結果。歪みが結晶表面のみに存在する場合(黒四角)と、結晶内部にまで広がっている場合(赤丸)。

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6件)

(1)

Y. Okada, T. R. Chang, G. Chang, R. Shimizu, H. T. Jeng, S. Shiraki, A. Bansil, H. Lin, T. Hitosugi, Quasiparticle interference on cubic perovskite oxide surfaces (査読有)

arXiv:1604.07334

(2)

Y. Okada, Y. Ando, R. Shimizu, E. Minamitani, S. Shiraki, S. Watanabe, and T. Hitosugi Scanning tunneling spectroscopy of superconductivity on surfaces of $\text{LiTi}_2\text{O}_4(111)$ thin films (査読有)

Nature Communications (accepted)

(3)

I. Zeljkovic, K. L. Scipioni, D. Walkup, **Y. Okada**, Wenwen Zhou, R. Sankar, G. Chang, Y. J. Wang, H. Lin, A. Bansil, F. Chou, Z. Wang and V. Madhavan

Nanoscale determination of the mass enhancement factor in the lightly doped bulk insulator lead selenide (査読有)

Nature Communication **6**, 6559-6563 (2015)

doi:10.1038/ncomms7559

(4)
I. Zeljkovic*, **Y. Okada***, C. Y. Huang, R. Sankar,
D. Walkup, W. Zhou, M. Serbyn, F. Chou, W. F.
Tsai, H. Lin, A. Bansil, L. Fu, M. Z. Hasan, V.
Madhavan

(*equal contribution)

Dirac mass generation from crystal symmetry
breaking on the surfaces of topological crystalline
insulators

(査読有)

Nature Materials **14**, 318–324 (2015)
doi:10.1038/nmat4215

(5)

I. Zeljkovic*, **Y. Okada***, C. Y. Huang, R. Sankar,
D. Walkup, W. Zhou, M. Serbyn, F. Chou, W. F.
Tsai, H. Lin, A. Bansil, L. Fu, M. Z. Hasan, V.
Madhavan

(*equal contribution)

Mapping the unconventional orbital texture in
topological crystalline insulators

(査読有)

Nature Physics **10**, 572-577 (2014)
doi:10.1038/nphys3012

(6)

C. Dhital, T. Hogan, W. Zhou, X. Chen, Z. Ren, M.
Pokharel, **Y. Okada**, M. Heine, W. Tian, Z.
Yamani, C. Opeil, J. S. Helton, J. W. Lynn, Z.
Wang, V. Madhavan, S. D. Wilson

Electronic phase separation in the doped spin-
orbit driven Mott phase of $\text{Sr}_3(\text{Ir}_{1-x}\text{Ru}_x)_2\text{O}_7$

(査読有)

Nature Communications **5**, 3377 (2014)
doi:10.1038/ncomms4377

[学会発表] (計 14 件)

(1)

学会名: Special symposium for American
Vacuum Society (AVS) Taiwan Chapter focusing
on 2D materials and topological insulators
(Jan., 25-27, 2016, National Sun Yat-sen
University, Kaohsiung, Taiwan)

タイトル: Visualization of quasiparticle
interference on cubic perovskite oxide surface

(招待講演) **Y. Okada**

(2)

学会名: American Physical Society
(March 14–18, 2016; Baltimore, Maryland)

タイトル: Strong Zeeman effects in the Landau

level spectrum of $(\text{In}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Se}_3$

D. Walkup, W. Zhou, I. Zeljkovic, **Y. Okada**, Z.
Ren, K. Scipioni, S. Wilson, V. Madhavan

(3)

学会名: 21st International Conference on
Electronic Properties of Two-Dimensional
Systems

(Jul. 26–31, 2015; Sendai, Japan)

タイトル: Scanning Tunneling Spectroscopy
Investigations of Surface States in Topological
Crystalline Insulators

(招待講演) **Y. Okada**

(4)

学会名: ICMAT2015 - the 8th Biennial
International Conference on Materials for
Advanced Technologies [Symposium, "Functional
Spin-Orbit Coupling Materials"]

(28 June to 3 July, 2015 in Singapore)

タイトル: Visualization of Quasiparticle
Interference on the Surface of SrVO_3 Film

(招待講演) **Y. Okada**

(5)

学会名: SPIE Photonics West OPTO

(Feb. 7 – 12, 2015, The Moscone Center, CA, US)

“Direct visualization of atomic and electronic
structure on perovskite oxide film surface”

(招待講演) **Y. Okada**

(6)

学会名: American Physical Society (March 2–6,
2015; San Antonio, Texas)

タイトル: Nanoscale Determination of the Mass
Enhancement Factor in Lightly-Doped Bulk
Insulator PbSe

K. Scipioni, I. Zeljkovic, D. Walkup, **Y. Okada**,
W. Zhou, R. Sankar, G. Chang, Y. J. Wang, H. Lin,
A. Bansil, F. Chou, Z. Wang, V. Madhavan

(7)

学会名: American Physical Society

(March 2–6, 2015; San Antonio, Texas)

タイトル: Scanning tunneling spectroscopy
investigation of the topological phase transition in
 $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$

D. Walkup, W. Zhou, I. Zeljkovic, **Y. Okada**, Z.
Ren, K. Scipioni, S. Wilson, V. Madhavan

(8)

学会名: American Physical Society

(March 2–6, 2015; San Antonio, Texas)

タイトル: Visualization of quasiparticle

interference on the surface of SrVO₃ film

Y. Okada, T. R. Chang, R. Shimizu, G. Chang, H. T. Jeng, S. Shiraki, H. Lin, T. Hitosugi

(9)

学会名: E-MRS 2014 FALL MEETING
(Sep. 15-19, 2014; at Warsaw University of Technology, Poland)

タイトル: STM probing of topological states
(招待講演) Y. Okada

(10)

学会名: 日本物理学会 2015 年春季
早稲田大学 (東京都)
タイトル: 走査トンネル顕微鏡を用いた SrVO₃ 薄膜の電子状態研究(III)
岡田佳憲, T. R. Chang, 清水亮太, G. Chang, H. T. Jeng, 白木将, H. Lin, 一杉太郎

(11)

学会名: American Physical Society (March 2-6, 2015; San Antonio, Texas)

タイトル: Visualization of quasiparticle interference on the surface of SrVO₃ film

Yoshinori Okada, T. R. Chang, R. Shimizu, G. Chang, H. T. Jeng, S. Shiraki, H. Lin, T. Hitosugi

(12)

学会名: SPIE Photonics West OPTO 2015
(Feb. 7-12, 2015, in California, US)

タイトル: Direct visualization of atomic and electronic structure on perovskite oxide film surface

Yoshinori Okada

(13)

学会名: 日本物理学会 2014 年秋期
中部大学(春日井市・愛知県)

タイトル: 走査トンネル顕微鏡を用いた SrVO₃ 薄膜の電子状態研究(II)
岡田佳憲, T. R. Chang, 清水亮太, G. Chang, H. T. Jeng, 白木将, H. Lin, 一杉太郎

(14)

学会名: 日本物理学会 2014 年春季
東海大学(湘南・神奈川)
タイトル: 走査トンネル顕微鏡を用いた SrVO₃ 薄膜の電子状態研究(I)
岡田佳憲, 清水亮太, 白木将, 一杉太郎

[その他] (計 2 件)

(1)

第6回真空・表面科学若手研究会、講師
(Dec. 4, 2015; NIMS, Japan)

タイトル: 原子スケール表面電子状態イメージングによる新奇電子材料の研究

岡田 佳憲

(2)

第60回 物性若手夏の学校、分科会講師
(Aug. 27, 2015; Gifu, Japan)

タイトル: 走査トンネル顕微鏡による遷移金属酸化物薄膜の電子状態イメージング

岡田佳憲

6. 研究組織

(1)

研究代表者
岡田 佳憲 (Yoshinori Okada)
東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教
研究者番号: 00707656