

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01857

研究課題名（和文）トポロジカル結晶絶縁体におけるトポロジカル状態の外場による変調とデバイス応用

研究課題名（英文）External modulation and application of topological states in topological crystal insulators

研究代表者

黒田 眞司 (KURODA, Shinji)

筑波大学・数理工学系・教授

研究者番号：40221949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はトポロジカル結晶絶縁体であるSnTeおよび混晶の(Pb,Sn)Teにおいて、トポロジカル表面状態に起因する特異な物性を調べ、特に鏡映対称性を破る摂動が表面状態にどのような影響を及ぼすか明らかにすることを目的として研究を行った。分子線エピタキシーにより作製したSnTe、(Pb,Sn)Te薄膜に対し時間分解角度光電子分光測定により非占有状態を調べ、ディラック錘の全体像およびバルク価電子帯のラッシュバ分裂を観察した。また、SnTeと強磁性体との接合構造に対して偏極中性子反射率測定により深さ方向の磁化の分布を調べ、トポロジカル表面状態により界面に磁化が誘起されることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル結晶絶縁体においては、結晶の鏡映対称性によりトポロジカル表面状態が保護されており、鏡映対称性を破る摂動が表面状態にどのような影響を与えるかは興味ある課題である。本研究では、トポロジカル結晶絶縁体の代表物質であるSnTeおよび混晶の(Pb,Sn)Teにおいて非占有側の表面状態の観察および強磁性体との接合界面での磁化誘起の検出という成果を得ており、格子歪および磁化の発現という摂動が表面状態に与える影響を明らかにしたという点で意義ある成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we intend to reveal the peculiar physical properties arising from the topological surface states in SnTe and mixed crystals (Pb,Sn)Te, typical materials of topological crystalline insulators, with an emphasis on how external perturbations which break the mirror reflection symmetry of the crystals. We have investigated the unoccupied electronic states by performing time-resolved angle-resolved photoemission spectroscopy measurement on SnTe and (Pb,Sn)Te thin films grown by molecular beam epitaxy and have observed the whole structure of Dirac cones and the Rashba splitting of bulk valence-band. In addition, we have investigated the depth profile of magnetization in heterostructures of SnTe and a ferromagnet by measuring spin-polarized neutron reflectance, revealing magnetization induced at the interface via the topological surface states.

研究分野：固体物性

キーワード：トポロジカル絶縁体

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル結晶絶縁体(TCI)はトポロジカル絶縁体(TI)の新規の物質群であり、通常の TI(いわゆる Z_2 -TI)と異なり、時間反転対称性ではなく結晶の鏡映対称性によってトポロジカル表面状態(TSS)が保護される。SnTe は TCI の典型的な物質として 2012 年に理論的に提唱され[1]、岩塩(RS)型構造における(110)面に関する鏡映対称性に起因し、結晶の(100), (111), (110)面に複数の表面状態のバンド(いわゆるディラック錘)が現れる(図 1)。実験的にも、角度分解光電子分光(ARPES)測定により表面のディラック錘の観察が報告されており[2,3]、トポロジカル絶縁体としての性質が確認されている。

しかしながら、SnTe の実際の結晶は、高密度の Sn 欠損の生成により p 型に縮退し、バルクにおいても金属的な伝導を示す。このため、通常の ARPES 測定では表面のディラック錘のうちフェルミ準位以下に位置する一部のみしか観測されておらず、例えばディラック点の位置は、観察された一部のバンド分散の形状を外挿することによる推測に留まっている[2]。また TCI においては表面状態の保護が結晶の鏡映対称性に因ることから、格子歪や電場など鏡映対称性を破る外的摂動を加えることにより表面状態のディラック錘にギャップが開くと予測されるが[4]、実験的には確認されていない。

本研究課題では、TCI である SnTe および関連混晶の(Pb,Sn)Te に対し、表面状態の全体像およびそれに起因する特異な物性を明らかにすることを目的として研究を行った。

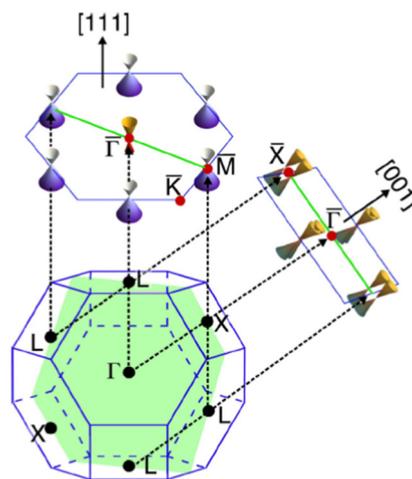


図 1: SnTe の 3 次元および(111), (001)面の表面ブリルアンゾーン。複数のディラック錘からなるマルチバレー構造を成す。

2. 研究の目的

本研究課題は、上で述べた背景に基づき、TCI である SnTe および関連混晶の(Pb,Sn)Te を対象として、表面状態の全体像およびそれに起因する物性を実験的に明らかにすることを目的として研究を行った。特に鏡映対称性を破る摂動に着目し、表面状態に及ぼす影響を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

SnTe および混晶の(Pb,Sn)Te の薄膜は分子線エピタキシー(MBE)法により作製した。SnTe, Pb, Te を分子線源として用い、GaAs 基板上に CdTe の厚い緩衝層を積層したいわゆるテンプレート上に SnTe, (Pb,Sn)Te の薄膜を積層した[5]。

成長した薄膜試料に対し、レーザー励起の角度分解光電子分光(ARPES)測定を行った。ポンプ光によりキャリアを励起し、プローブ光照射で放出される光電子を観察し、非占有側の電子状態ならびに励起されたキャリアの緩和過程を調べた[6]。また、磁化の発現がトポロジカル表面状態を与える影響を明らかにするため、SnTe 薄膜の表面に強磁性体である Fe ないし EuS を積層して接合構造を作製し、接合界面に誘起される磁化の検出を試みた[7,8]。接合構造試料に対し、接合面に平行な磁場の印加下で偏極中性子反射測定を行い、深さ方向の磁化のプロファイルを調べた。

4. 研究成果

(1) 時間分解 ARPES 測定

CdTe テンプレート上に成長した SnTe および(Pb,Sn)Te 薄膜に対して、ポンプ・プローブ光照射による時間分解 ARPES 測定を行い、非占有側の電子状態ならびにキャリアのダイナミクスを調べた[6]。SnTe(111)面に対して、ポンプ光による励起後の各遅延時間 t における時間分解 ARPES 像を図 2 に示す。 $t = 0$ でキャリアがフェルミ準位より上($E > E_F$)の非占有状態に励起され、緩和する様子が見られている。 $E - E_F \leq 0.3\text{eV}$ にバルクの価電子帯の上部、 $E - E_F \geq 0.6\text{eV}$ に伝導帯が現れている。さらに各遅延時間 t の ARPES 像を重ね合わせた時間積分像(図 3)を見ると、バルクバンドのギャップに対応する $E - E_F = 0.3 \sim 0.6\text{eV}$ の範囲に V 字型の分散が現れている。これが表面状態のディラック錘と同定され、バンド分散の交点であるディラック点はバルクの価電子帯の頂上付近に位置している。この結果は、通常の ARPES 測定に基づく従来の報告[3]とは異なる結果であり、レーザー励起 ARPES 測定を用いた非占有状態の観察により初めて明らかにされたものである。

さらに、バルクの価電子帯にもラッシュバ効果によると思われる大きな分裂が観測されている。

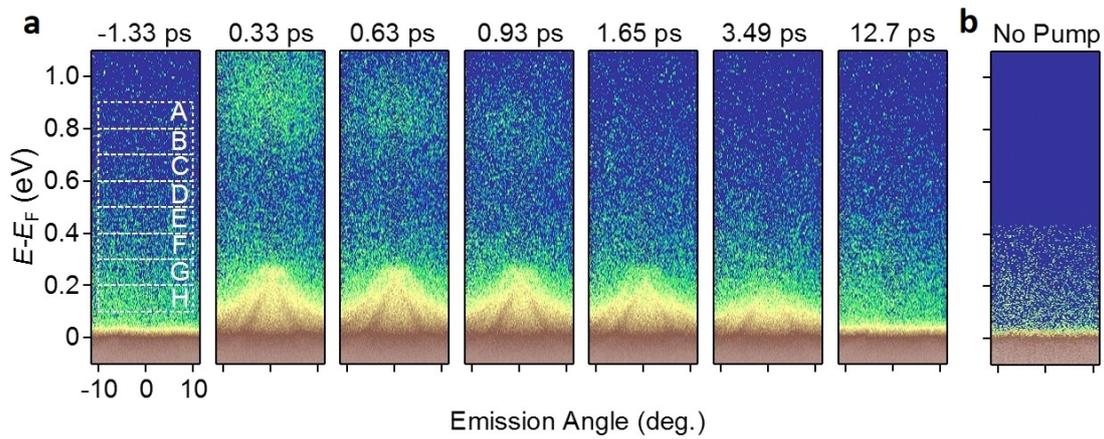


図 2: SnTe(111)面の $\bar{\Gamma}$ 点付近の時間分解 ARPES 像。(a) $t = 0$ でポンプ光による励起後の各遅延時間 $t = -1.33 - 12.7$ ps におけるスナップショットを示す。(b) ポンプ光照射なしの場合の ARPES 像。

このおける分裂幅より導かれるラシュバパラメーターは $\alpha \sim 3.6 \text{ eV}\cdot\text{\AA}$ と大きな値となり、巨大ラシュバ分裂で知られる α -GeTe[9]や BiTe[10]に匹敵する。この巨大なラシュバ分裂の起源に関し、SnTe 薄膜の格子歪[11]、バンドベンディング[12]、表面での原子変位[13]などの可能性を考察した。

(2) 磁性体との接合界面における磁化誘起

SnTe における磁化の発現が表面状態に及ぼす影響を調べることを目的として、強磁性体との近接効果によりトポロジカル表面に誘起される磁化[14]の研究を行った。SnTe 上に強磁性体として Fe ないし EuS を積層した接合構造を作製し、偏極中性子反射(PNR)測定により深さ方向の磁化分布を評価し、界面に誘起される磁化の検出を試みた。Fe/SnTe および EuS/SnTe 接合構造に対する PNR 測定の結果、図 4 に示すように SnTe と磁性層との界面付近に磁化が誘起され、磁化が誘起される範囲は界面から SnTe 層内部へ深さ数 3nm 程度にまで及んでいることが見出された[7,8]。このような界面における磁化の誘起は、トポロジカル表面状態のディラック電子が磁性層の磁気モーメント間の相互作用を媒介する近接効果[15]によるものと考えられる。さらに EuS/SnTe の磁化測定では、接合面に垂直方向の磁場印加のもとでは、図 5 の磁化の温度依存性に示すように、EuS の強磁性転移温度($T_c = 17\text{K}$)より遥かに高温の 250K 付近での磁化の立ち上がりが観測され、近接効果による磁化の誘起が室温付近まで存在することが明らかとなった[8]。

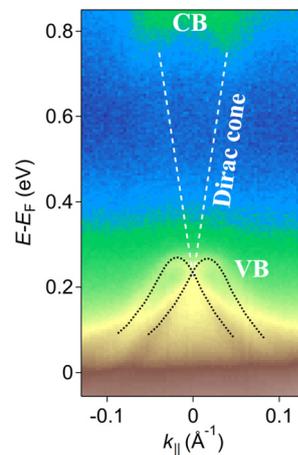


図 3: レーザー励起 ARPES で観測された SnTe(111)面の非占有側のバンド状態。表面のディラック錘およびバルク価電子帯のラシュバ分裂が観測された。

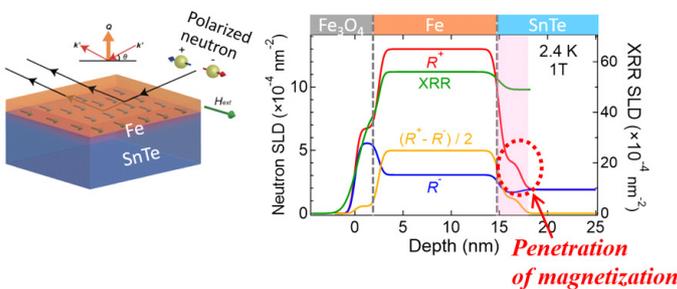


図 4: Fe/SnTe に対する PNR 測定の模式図(左)と深さ方向の磁化プロファイル(右)。Fe/SnTe 界面から SnTe 内部への磁化の侵入が観測された。

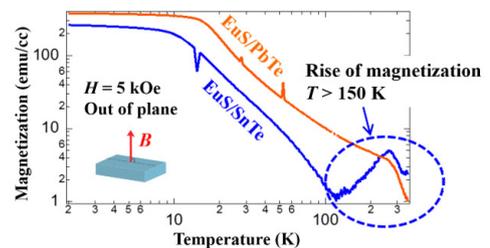


図 5: EuS/SnTe, EuS/PbTe 試料の磁化の温度依存性。EuS/SnTe でのみ EuS の $T_c = 17\text{K}$ より遥かに高温で磁化の立ち上がりが見られている。

【参考文献】

- [1] T. H. Hsieh, H. Lin, J. Liu, W. Duan, A. Bansil, and L. Fu, Nat. Commun. **3**, 982 (2012).
- [2] Y. Tanaka, Z. Ren, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, K. Segawa, and Y. Ando, Nat. Phys.

- 8**, 800 (2012).
- [3] Y. Tanaka, T. Shoman, K. Nakayama, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, M. Novak, K. Segawa, and Y. Ando, *Phys. Rev. B* **88**, 235126 (2013).
 - [4] C. -Y. Huang *et al.*, *Phys. Rev. B* **93**, 205304 (2016).
 - [5] R. Ishikawa, T. Yamaguchi, Y. Ohtaki, R. Akiyama, and S. Kuroda, *J. Cryst. Growth* **453**, 124 (2016).
 - [6] H. Ito, Y. Otaki, Y. Tomohiro, Y. Ishida, R. Akiyama, A. Kimura, S. Shin, and S. Kuroda, *Phys. Rev. Research* **2**, 043120 (2020).
 - [7] R. Akiyama, R. Ishikawa, K. Akutsu, R. Nakanishi, Y. Tomohiro, K. Watanabe, K. Iida, M. Mitome, S. Hasegawa, and S. Kuroda, arXiv1910.10540v2.
 - [8] R. Akiyama *et al.*, *in preparation*.
 - [9] J. Krempaský *et al.*, *Phys. Rev. B* **94**, 205111 (2016).
 - [10] K. Ishizaka *et al.*, *Nat. Mater.* **10**, 521 (2011).
 - [11] E. Plekhanov, P. Barone, D. Di Sante, and S. Picozzi, *Phys. Rev. B* **90**, 161108(R) (2014).
 - [12] V. V. Volobuev *et al.*, *Adv. Mater.* **29**, 1604185 (2017).
 - [13] M. Nagano, A. Kodama, T. Shishidou, and T. Oguchi, *J. Phys.: Condens. Matter* **21**, 064239 (2009).
 - [14] F. Katmis *et al.*, *Nature* **533**, 513 (2016).
 - [15] J. Kim, K.-W. Kim, H. Wang, J. Sinova, and R. Wu, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 027201 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ito Hiroshi, Otaki Yusuke, Tomohiro Yuta, Ishida Yukiaki, Akiyama Ryota, Kimura Akio, Shin Shik, Kuroda Shinji	4. 巻 2
2. 論文標題 Observation of unoccupied states of SnTe(111) using pump-probe ARPES measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 43120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043120	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hirahara T., Otrokov M. M., Sasaki T. T., Sumida K., Tomohiro Y., Kusaka S., Okuyama Y., Ichinokura S., Kobayashi M., Takeda Y., Amemiya K., Shirasawa T., Ideta S., Miyamoto K., Tanaka K., Kuroda S., Okuda T., Hono K., Ereemeev S. V., Chulkov E. V.	4. 巻 11
2. 論文標題 Fabrication of a novel magnetic topological heterostructure and temperature evolution of its massive Dirac cone	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4821
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-18645-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Saha Indrajit, Tomohiro Yuta, Kanazawa Ken, Nitani Hiroaki, Kuroda Shinji	4. 巻 49
2. 論文標題 Structural and Magnetic Properties of Nitrogen Acceptor Co-doped (Zn,Fe)Te Thin Films Grown in Zn-Rich Condition by Molecular Beam Epitaxy (MBE)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 5739 ~ 5749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11664-020-08311-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuma Okuyama, Ryo Ishikawa, Shinji Kuroda, Toru Hirahara	4. 巻 114
2. 論文標題 Role of hybridization and magnetic effects in massive Dirac cones: Magnetic topological heterostructures with controlled film thickness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 51602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5083059	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Indrajit Saha, Takuma Nakamura, Ken Kanazawa, Hiroaki Nitani, Masanori Mitome, Shinji Kuroda	4. 巻 511
2. 論文標題 Effect of nitrogen acceptor co-doping on the structural and magnetic properties of (Zn,Fe) Te	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 42-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2019.01.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 嶋野 武、友弘 雄太、渡邊 拓斗、渡邊 和己、秋山 了太、阿久津 和宏、飯田 一樹、長谷川 修司、黒田 眞司
2. 発表標題 トポロジカル結晶絶縁体SnTeと磁性絶縁体EuSのヘテロ接合における界面誘起磁化
3. 学会等名 第25回半導体スピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山了太, 渡邊和己, 嶋野武, 友弘雄太, 渡邊拓斗, 石川諒, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司
2. 発表標題 EuS/SnTeヘテロ接合における近接高温強磁性トポロジカル結晶絶縁体界面状態
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Indrajit Saha, Yuta Tomohiro, Ken Kanazawa, Hiroaki Nitani, Shinji Kuroda
2. 発表標題 Structural and magnetic properties of nitrogen co-doped II-VI diluted magnetic semiconductor (Zn,Fe)Te thin films grown under Zn-rich condition by MBE
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Tomohiro, T. Shimano, R. Ishikawa, R. Nakanishi, K. Watanabe, K. Akutsu, K. Iida, M. Mitome, R. Akiyama, S. Hasegawa, S. Kuroda
2. 発表標題 Interfacial Magnetism Induced on the Surface of Topological Crystalline Insulator SnTe due to the Proximity Effect
3. 学会等名 第24回半導体スピン工学の基礎と応用
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Indrajit Saha, Yuta Tomohiro, Ken Kanazawa, Hiroaki Nitani, Shinji Kuroda
2. 発表標題 Structural and magnetic properties of nitrogen co-doped II-VI diluted magnetic semiconductor (Zn,Fe)Te thin films grown under Zn-rich condition by MBE
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 友弘雄太, 嶋野武, 秋山了太, 仁谷浩明, 黒田眞司
2. 発表標題 MBEにより成長した磁性トポロジカル結晶絶縁体(Sn,Mn)Te薄膜の構造解析と磁化特性
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋野武, 友弘雄太, 秋山了太, 黒田眞司
2. 発表標題 ゼロギャップ組成(Pn,Sn)TeへのMn添加磁性混晶の薄膜成長と磁化特性
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	渡邊和己, 友弘雄太, 嶋野武, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司
2. 発表標題	偏極中性子反射率法を用いたEuS/SnTeおよびEuS/PbTeヘテロ界面における磁化の測定
3. 学会等名	日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	平原徹, 日下翔太郎, 深澤拓郎, 一ノ倉聖, 小林正起, 竹田幸治, 佐々木泰祐, 宝野和博, 白澤徹郎, 友弘雄太, 黒田眞司
2. 発表標題	磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造Mn,Te/Bi ₂ Te ₃ における磁性と構造
3. 学会等名	日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Ryota Akiyama
2. 発表標題	Structural and magnetic effects on surface states in topological (crystalline) insulators
3. 学会等名	International Workshop on New Trends in Topological Insulators (NTTI) & Variety and Universality of Bulk Edge Correspondence in Topological Phases (BEC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Hiroshi Ito, Yuta Tomohiro, Takeru Shimano, Yukiaki Ishida, Ryota Akiyama, Akio Kimura, Shigi Shin, Shinji Kuroda
2. 発表標題	Surface Photovoltaic effect on the (111) surface of a topological crystalline insulator (Pb,Sn)Te
3. 学会等名	International Workshop on New Trends in Topological Insulators (NTTI) & Variety and Universality of Bulk Edge Correspondence in Topological Phases (BEC) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Takeru Shimano, Yuta Tomohiro, Ryo Ishikawa, Ryouta Akiyama, Yukiharu, Takeda, Yuji Saitoh, Akio Kimura, Shinji Kuroda
2. 発表標題	Magnetic Properties of IV-VI diluted magnetic semiconductor (Sn,Mn)Te thin films grown by MBE
3. 学会等名	International Workshop on New Trends in Topological Insulators (NTTI) & Variety and Universality of Bulk Edge Correspondence in Topological Phases (BEC) (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	伊藤寛史, 大滝祐輔, 友弘雄太, 石田行章, 秋山了太, 木村昭夫, 辛埴, 黒田眞司
2. 発表標題	トポロジカル結晶絶縁体 (Pb,Sn)Te (111)薄膜のレーザー励起ARPES測定による非占有状態の観測と超高速キャリアダイナミクス
3. 学会等名	日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	伊藤寛史, 大滝祐輔, 友弘雄太, 石田行章, 秋山了太, 木村昭夫, 辛埴, 黒田眞司
2. 発表標題	トポロジカル結晶絶縁体SnTe薄膜の表面バンド分散と超高速キャリアダイナミクス
3. 学会等名	第23回半導体スピン工学の基礎と応用
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	伊藤寛史, 大滝祐輔, 石田行章, 秋山了太, 木村昭夫, 辛埴, 黒田眞司
2. 発表標題	トポロジカル結晶絶縁体SnTe薄膜の表面バンド分散と超高速キャリアダイナミクス
3. 学会等名	日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 渡邊和己, 石川諒, 秋山了太, 阿久津和宏, 飯田一樹, 黒田眞司, 長谷川修司
2. 発表標題 偏極中性子反射率法を用いたFe/SnTeヘテロ構造界面における強磁性近接効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今中康貴, D. Kindole, 竹端寛治, 大滝祐輔, 伊藤寛史, 秋山了太, 黒田眞司
2. 発表標題 IV-VI族半導体PbSnTeのテラヘルツサイクロトロン共鳴
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山裕磨, 石川諒, 黒田眞司, 平原徹
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造における強磁性とサイズ効果の協奏・競合
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Ishikawa, Hiroshi Ito, Yuta Tomohiro, Ryota Akiyama, Shinji Kuroda, Hiroaki Nitani, Masanori Mitome
2. 発表標題 TEM observation of IV-VI diluted magnetic semiconductor (Sn.Mn)Te grown by MBE
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Ito, Y. Otaki, Y. Tomohiro, Y. Ishida, R. Akiyama, A. Kimura, S. Shin, S. Kuroda
2. 発表標題 Observation of the unoccupied state of SnTe by laser-excited angle resolved photoemission spectroscopy
3. 学会等名 New Trends in Topological Insulators 2018 (NTTI2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Ishikawa, H. Itoh, Y. Tomohiro, R. Akiyama, H. Nitani, and S. Kuroda
2. 発表標題 Structural and magnetic properties of IV-VI diluted magnetic semiconductor (Sn,Mn)Te grown by MBE
3. 学会等名 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solid (PASPS10) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Saha, T. Nakamura, K. Kanazawa, H. Nitani, and S. Kuroda
2. 発表標題 Effect of nitrogen co-doping on the magnetic and structural properties of (Zn,Fe)Te
3. 学会等名 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木村 昭夫 (KIMURA Akio) (00272534)	広島大学・先進理工系科学研究科・教授 (15401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	秋山 了太 (AKIYAMA Ryota) (40633962)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関