

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03484

研究課題名(和文) スピン分解光電子分光の基礎理論の構築に向けた光電子スピン干渉の研究

研究課題名(英文) Photoelectron spin interference studied for the basic theory of spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy

研究代表者

矢治 光一郎 (YAJI, Koichiro)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端材料解析研究拠点・グループリーダー

研究者番号：50447447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：スピン角度分解光電子分光(SARPES)はトポロジカル電子状態などの強くスピン軌道結合した電子状態の解明に広く利用されている。しかしながらSARPESで観測しているのは光電子のスピンであり、始状態のスピン構造との対応は自明でない。本研究では様々な条件で光励起された光電子のスピン構造を三次元SARPESで観測し、光電子のスピン構造から始状態のスピン構造を得るために重要な光電子のスピン干渉効果について調べた。そして鏡映対称性の元において光電子のスピン構造から始状態のスピン構造を得るための基礎理論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル物質などの強いスピン軌道相互作用が重要な電子スピン物性分野の登場により、スピン角度分解光電子分光は電子状態測定手法として広く使われるようになった。しかしながら、そのデータ解釈の方法については曖昧にされたままであった。本研究では、同手法の基礎学理を構築し、電子スピン物性に関する物理を大きく進展させることに貢献した。また本研究で得られた成果は、光励起過程における位相の自由度も利用してスピンを制御できるという新たな概念となり、例えばスピン偏極電子源の開発に応用できる。

研究成果の概要(英文)：Spin- and angle-resolved photoemission spectroscopy (SARPES) is a powerful technique to investigate strongly spin-orbit coupled electronic states. However, the correspondence between the spin structure in the initial state and that in the photoexcited state is not obvious since SARPES provides the information of photoelectrons that can be changed with the matrix element effect of photoemission. In the present study, we have elucidated the spin interference in the photoemission process with mirror symmetry. We have developed a basic theory to obtain the spin information in the initial state from the spin structure of photoelectrons observed with SARPES.

研究分野：光物性

キーワード：スピン軌道結合 スピン干渉 スピン角度分解光電子分光

1. 研究開始当初の背景

近年、強いスピン軌道相互作用によりスピン偏極した電子状態に関する研究が盛んに行われている。トポロジカル絶縁体やラシュバ型スピン分裂をもつ表面におけるスピン偏極電子状態はその代表例として挙げられる。スピン角度分解光電子分光 (SARPES) 法はこのようなスピン偏極した電子バンドを直接観測するための有力な実験手法である。しかしながら、SARPES を含む光電子分光法では、始状態、終状態、および光のベクトルポテンシャルからなる光学遷移行列要素を観測しているため、光電子のスピン構造がそのまま固体中のスピン構造に対応するかどうかは自明ではない。

近年、我々は真空紫外レーザーを励起光とした世界最高性能を誇る高分解能三次元 SARPES 装置を開発し[1]、様々な物質のスピン偏極表面電子状態のスピン構造の研究を行っている。その中で、SARPES で観測された光電子のスピン構造から始状態のスピン構造を得る方法が確立されていないことに気づいた。そこで我々は、SARPES の実験結果を解釈するための基礎理論を構築するための研究を行なっている。強くスピン軌道結合した表面電子状態は軌道の対称性によって結合するスピンの向きが異なる。特に鏡映対称性のもとでは、表面電子状態の波動関数の鏡映面に対称な成分と非対称な成分に分けられ、そのスピンは鏡映面垂直方向になるが、その向きは互いに反対になる。そして、系の固有関数はこれらの線形結合であらわされる[2]。ここで、このようなスピン軌道結合した電子状態からの光学遷移を考える。双極子遷移選択則から、*p* 偏光では対称軌道を、*s* 偏光では非対称軌道を励起する。よって、*p* 偏光および *s* 偏光を用いた SARPES においてでは観測されるスピンの向きが必ず反転する[図 1 (a), (b)]。一方、鏡映対称性が破られると光電子のスピンベクトルは始状態とは異なる方向に回転することもわかっている[3]。例えば、励起光の直線偏光の電場ベクトルを鏡映面に対して傾けると、励起光は *p* 偏光成分と *s* 偏光成分の両方を持つため、対称軌道と結合したアップスピン電子と非対称軌道と結合したダウンスピン電子を同時に励起できる。この同時励起されたアップスピン電子とダウンスピン電子の光励起過程における量子力学的な干渉が光電子のスピンベクトル回転の起源であることも実証した[2, 3]。

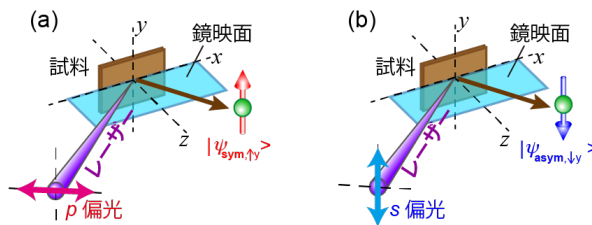


図 1. SARPES 測定の幾何学配置と(a) *p* 偏光および(b) *s* 偏光による軌道選択励起

2. 研究開始当初の目的

強くスピン軌道結合した表面電子状態を光励起すると、光励起過程のスピン干渉により光電子のスピンベクトルは始状態とは異なる方向へ回転する。この光電子のスピン干渉が SARPES の解釈を難しくしている要因である。したがって、光電子のスピン干渉効果を解明すれば光電子のスピン構造から始状態のスピン構造を知ることができる。そこで本研究では、「光励起過程におけるスピン干渉効果を解明し、光電子のスピン構造から始状態のスピン構造を得るための基礎理論を構築する」ことを目的とする。

3. 研究の方法

先行研究では、強くスピン軌道結合した表面電子状態を持つ典型的な物質として、Bi₂Se₃ と Bi 単結晶を試料とし、鏡映対称性のもとで直線偏光を励起光とした際のスピン干渉について解明を行なった。本研究では、いくつかの試料において励起光の入射角、エネルギーおよび偏光を変えてた際に光電子のスピンベクトルがどのように回転するかを高分解能三次元 SARPES を用いて精密に調べ、光電子のスピン干渉効果について定式化する。

実験は東京大学物性研究所で開発された高分解能 3 次元スピン角度分解光電子分光装置を用いて行われた。励起光には 6.994 eV の真空紫外レーザーを用いた。光学遷移の幾何学配置として、結晶鏡映面は光の入射面と平行になっており、鏡映面内に放出された光電子を観測している。

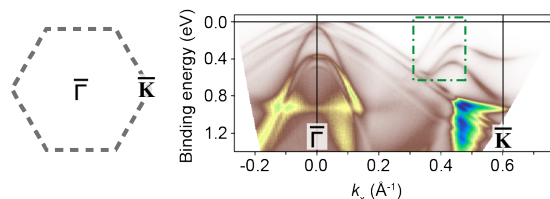


図 2. Pb/Ge(111)-βの表面ブリュアンゾーンとΓK方向における laser-ARPES。

4. 研究成果

(1)ゲルマニウム基板上の鉛単原子層のスピ ン軌道結合電子状態

Ge(111)基板状に Pb を単原子層成長させた表面[Pb/Ge(111)-β]では、その強いスピン軌道相互作用により、スピン縮退が解けた表面電子状態があることが知られている。本研究では、レーザー励起による軌道選択 SARPES を用い、表面電子状態のスピン軌道結合について調べた。

図2にΓK 鏡映上における laser-ARPES の結果を示す。Γ点近傍には Ge(111)基板由来の電子状態が観測されている。波数 0.4 \AA^{-1} 付近に観測されている金属的バンドは、Pb 由来の表面電子状態である。これらのバンド形状は過去の報告[4]と一致する。Laser-SARPES は、この Pb 由来金属バンドに注目し、図2に示す太点線内の範囲において行われた。その結果、電子バンドがスピン偏極していることが観測され、その向きは入射光の *p* 偏光と *s* 偏光とで反対向きになった。よって、Pb/Ge(111)-β の表面電子状態は、トポロジカル物質と同様に、それぞれ反対向きのスピンと結合した対称軌道成分と反対称軌道成分の線形結合で書けることがわかった。

このように直線偏光を用いた SARPES では軌道選択的なスピン構造が得られる。ここで、*p* 偏光で観測される対称軌道のスピン偏極度と *s* 偏光で観測される非対称軌道のスピン偏極度の平均をとることで全スピン偏極度を得ることができると予想される。実際、ビスマスと銀の表面合金[Ag₂Bi/Ag(111)]ではこのような方法で全スピン偏極度に関する情報を得ることに成功した[5]。

図3(a)は光の入射角 30 度、(b)は光の入射角 10 度における SARPES の結果である。いずれも、*p* 偏光と *s* 偏光で観測されるスピンの向きは反転している。そしてそれぞれスピン偏極度の平均をとることにより得られた全スピン偏極度は、光の入射角が 30 度の場合にはスピン縮退が解けたバンドのペアで反転している。これは通常のスピン軌道相互作用で予想される結果と一致し、始状態の情報を反映しているといえる。一方、光の入射角が 10 度場合は、スピン縮退が解けたバンドのペアでスピンの向きが同じという結果が得られた。

図3(b)の結果は光学遷移過程の影響を大きく受けた結果だと考えられる。もし *p* 偏光と *s* 偏光で光イオン化断面積が同じであると仮定できれば、これらの平均をとることにより全スピン偏極度についての情報を得ることができるはずである。しかしながら、光が試料に対して斜入射の場合は *p* 偏光の試料表面への射影成分が入射角によって変化するので、*p* 偏光励起と *s* 偏光励起の結果を定量的に取り扱う場合は、光イオン化断面積について考慮する必要があることがわかった。

(2)円偏光励起における光電子スピン

次に円偏光励起の場合を考える。円偏光における光の電場ベクトルは $E = E_p \pm iE_s$ で与えられる。ここで、 E_p は *p* 偏光の電場ベクトル、 E_s は *s* 偏光の電場ベクトルである。*p* 偏光成分では対称軌道と結合したアップスピン電子を励起し、*s* 偏光成分で非対称軌道と結合したダウンスピン電子を励起する。そして、こ

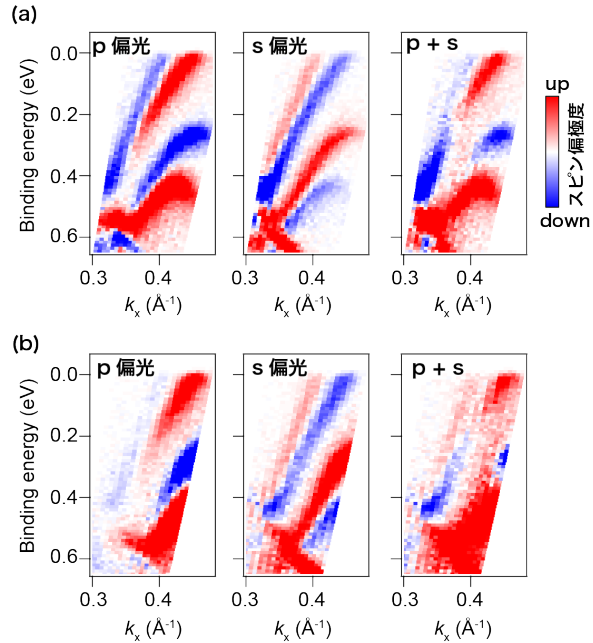


図3. 図2中の太点線四角内において測定された laser-SARPES。(a)光の入射角 30 度および(b)光の入射角 10 度で測定。(左パネル)*p* 偏光励起、(中パネル)*s* 偏光励起で観測されたスピン偏極度。(右パネル)*p* 偏光励起と *s* 偏光励起で得られたスピン偏極度を平均することで得られた全スピン偏極度。

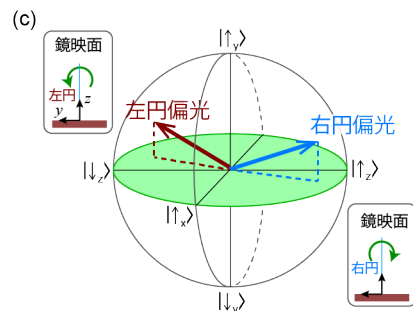
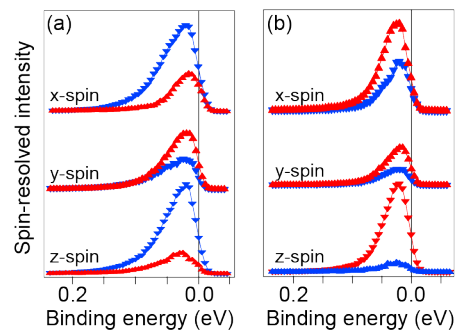


図4. (a)左円偏光および(b)右円偏光による三次元 laser-SARPES。(c) ブロッチ球を用いた光電子スピンの概略図。

これらの過程が同時に起こるため光励起過程においてアップスピン電子とダウンスピン電子が干渉し、光電子のスピンは始状態とは異なる方向を向くはずである。さらに E_p と E_s には位相差 i が付くので、右円偏光および左円偏光励起における光電子スピンは、その干渉成分が 180 度反転すると予想される。

この考察を実験で確かめる。試料には $\text{Bi}_2\text{Se}_3(111)$ 単結晶を用いた。光励起の幾何学的配置は図 1 と同じで、入射光として $h\nu = 6.994 \text{ eV}$ の左円偏光および右円偏光を用いた。 $\text{Bi}_2\text{Se}_3(111)$ の ΓM 鏡映面上のスピ軌道結合したトポロジカル表面状態から放出された光電子について三次元スピン分解測定を行なった。

まず、この表面状態においても、他のスピ軌道結合した電子状態と同様に、 p 偏光 (s 偏光) 励起で観測される光電子のスピンは $+y$ ($-y$) 方向に 100% スピン偏極し、 x スピン成分と z スピン成分は観測されない。一方、円偏光励起の場合は、 y スピン成分は減少し、始状態にはないはずの x スピン成分と z スピン成分が表れている [図 4 (a),(b)]。観測されたスピン偏極度の x, y, z 成分を合成してスピンベクトルとしてブロッホ球上に描いてみる [図 4 (c)]。その結果、右円偏光励起および左円偏光励起で観測される P_y 成分は同程度であるが、 x スピン成分と z スピン成分は x - z 平面上で 180 度反転していることが確かめられた。よって、上記の予想は実験結果を定性的によく説明できると結論付けた。

(3) 今後の展開

本研究では、直線偏光や円偏光を用いて鏡映対称性のもとでスピ軌道結合した電子状態から放出された光電子のスピ構造について調べた。鏡映対称性を利用することにより、対称な波動関数と非対称な波動関数の二準位スピン系に落とし込むことができるので、系をシンプルにすることができた。一方、鏡映対称性の議論が使えない場合に光電子のスピ構造から始状態のスピ構造をどのように導くかを解明することは今後の課題である。

鏡映対称性を利用することは有用であるが課題も残されている。我々の図 4 (a),(b) のデータをよく見ると、右円偏光励起と左円偏光励起で y 方向のスピ偏極度が完全には一致していない。今のところこの原因はよくわかっていない。光と電子の相互作用ハミルトニアンは、双極子遷移の項の他にもスピ軌道相互作用の項も含まれる。このスピ軌道相互作用の項まで考慮に入れば、この不一致を説明できるかもしれない。

本研究では励起光として低エネルギーのレーザーを使用している。本研究の範囲内では、終状態を自由電子的として取り扱ってもうまく説明ができています。一方、終状態を平面波として取り扱えない場合はもっと複雑になる。実際、SARPES で観測されるスピ偏極度に入射光のエネルギー依存性があるという報告もあり、今後の発展的研究が期待される。

(参考文献)

1. K. Yaji *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053111 (2016).
2. K. Yaji *et al.*, Nature Commun. **8**, 14588 (2017).
3. K. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **94**, 165162 (2016)
4. K. Yaji *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 235317 (2012).
5. R. Noguchi *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 041111(R) (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kitazawa Tatsuya, Yaji Koichiro, Shimozawa Kosuke, Kondo Hiroshi, Yamanaka Takayoshi, Yaguchi Hiroshi, Ishida Yukiaki, Kuroda Kenta, Harasawa Ayumi, Iwahashi Takashi, Ouchi Yukio, Komori Fumio, Shin Shik, Kanai Kaname	4. 巻 7
2. 論文標題 Topological Surface State of Bi ₂ Se ₃ Modified by Adsorption of Organic Donor Molecule Tetrathianaphthacene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2000524 ~ 2000524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202000524	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 Shikin A. M., Estyunin D. A., Klimovskikh I. I., Filnov S. O., Schwier E. F., Kumar S., Miyamoto K., Okuda T., Kimura A., Kuroda K., Yaji K., Shin S., Takeda Y., Saitoh Y., Aliev Z. S., Mamedov N. T., Amiraslanov I. R., Babanly M. B., Otrokov M. M., Ereemeev S. V., Chulkov E. V.	4. 巻 10
2. 論文標題 Nature of the Dirac gap modulation and surface magnetic interaction in axion antiferromagnetic topological insulator MnBi ₂ Te ₄	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13226-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-70089-9	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 -
1. 著者名 Kobayashi Takahiro, Nakata Yoshitaka, Yaji Koichiro, Shishidou Tatsuya, Agterberg Daniel, Yoshizawa Shunsuke, Komori Fumio, Shin Shik, Weinert Michael, Uchihashi Takashi, Sakamoto Kazuyuki	4. 巻 125
2. 論文標題 Orbital Angular Momentum Induced Spin Polarization of 2D Metallic Bands	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 176401-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.176401	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 Mizushima Hirotaka, Koike Harunobu, Kuroda Kenta, Yaji Koichiro, Harasawa Ayumi, Ishida Yukiaki, Nakayama Mitsuhiro, Mase Kazuhiko, Mukai Kozo, Kitazawa Tatsuya, Kondo Takeshi, Yoshinobu Jun, Shin Shik, Kanai Kaname	4. 巻 535
2. 論文標題 Structure and electronic structure of van der Waals interfaces at a Au(1 1 1) surface covered with a well-ordered molecular layer of n-alkanes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 147673 ~ 147673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2020.147673	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 R. Noguchi, M. Kobayashi, Z. Jiang, K. Kuroda, T. Takahashi, Z. Xu, D. Lee, M. Hirayama, M. Ochi, T. Shirasawa, P. Zhang, C. Lin, C. Bareille, S. Sakuragi, H. Tanaka, S. Kunisada, K. Kurokawa, K. Yaji, A. Harasawa, V. Kandyba, A. Giampietri, A. Barinov, T. K. Kim, C. Cacho, M. Hashimoto, D. Lu, S. Shin, R. Arita et al.	4. 巻 20
2. 論文標題 Evidence for a higher-order topological insulator in a three-dimensional material built from van der Waals stacking of bismuth-halide chains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 473 ~ 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-020-00871-7	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 P. Zhang, R. Noguchi, K. Kuroda, C. Lin, K. Kawaguchi, K. Yaji, A. Harasawa, Mikk Lippmaa, S. Nie, H. Weng, V. Kandyba, A. Giampietri, A. Barinov, Qiang Li, G.D. Gu, S. Shin, and T. Kondo	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation and control of the weak topological insulator state in ZrTe5	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 406-1-406-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20564-8	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 Yoshizawa Shunsuke, Kobayashi Takahiro, Nakata Yoshitaka, Yaji Koichiro, Yokota Kenta, Komori Fumio, Shin Shik, Sakamoto Kazuyuki, Uchihashi Takashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Atomic-layer Rashba-type superconductor protected by dynamic spin-momentum locking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1462-1-1462-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-21642-1	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 D. Pinek, T. Ito, M. Ikemoto, K. Yaji, M. Nakatake, S. Shin, T. Ouisse	4. 巻 100
2. 論文標題 Unified description of the electronic structure of M2AC nanolamellar carbides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.075144	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 該当する

1. 著者名 T. Nakamura, Y. Ohtsubo, N. Tokumasu, P. Le Fevre, F. Bertran, S. Ideta, K. Tanaka, K. Kuroda, K. Yaji, A. Harasawa, S. Shin, F. Komori, S. Kimura	4. 巻 3
2. 論文標題 Fermi level tuning of one-dimensional giant Rashba system on a semiconductor substrate: Bi/GaSb(110)-(2×1)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 126001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.126001	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 該当する

1. 著者名 J. Krempasky, M. Fanciulli, L. Nicolai, J. Minar, H. Volfova, O. Caha, V. V. Volobuev, J. Sanchez-Barriga, K. Kuroda, K. Yaji, S. Shin, F. Komori, G. Springholz and J. H. Dil	4. 巻 2
2. 論文標題 Fully spin polarised bulk states in ferroelectric GeTe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013107	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 該当する

1. 著者名 Koichiro Yaji, Anton Visikovskiy, Takushi Imori, Kenta Kuroda, Singo Hayashi, Takashi Kajiwara, Satoru Tanaka, Fumio Komori and Shik Shin	4. 巻 122
2. 論文標題 Coexistence of two types of spin splitting originating from different symmetries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 126403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.126403	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 Lin Chun, Ochi Masayuki, Noguchi Ryo, Kuroda Kenta, Sakoda Masahito, Nomura Atsushi, Tsubota Masakatsu, Zhang Peng, Bareille Cedric, Kurokawa Kifu, Arai Yosuke, Kawaguchi Kaishu, Tanaka Hiroaki, Yaji Koichiro, Harasawa Ayumi, Hashimoto Makoto, Lu Donghui, Shin Shik, Arita Ryotaro, Tanda Satoshi, Kondo Takeshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Visualization of the strain-induced topological phase transition in a quasi-one-dimensional superconductor TaSe3	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-021-01004-4	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 Noguchi Ryo, Takahashi T., Kuroda K., Ochi M., Shirasawa T., Sakano M., Bareille C., Nakayama M., Watson M. D., Yaji K., Harasawa A., Iwasawa H., Dudin P., Kim T. K., Hoesch M., Kandyba V., Giampietri A., Barinov A., Shin S., Arita R., Sasagawa T., Kondo Takeshi	4. 巻 566
2. 論文標題 A weak topological insulator state in quasi-one-dimensional bismuth iodide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 518 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-019-0927-7	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 Nakamura Takuto, Ohtsubo Yoshiyuki, Tokumasu Naoki, Le Fevre Patrick, Bertran Fran?ois, Ideta Shin-ichiro, Tanaka Kiyohisa, Kuroda Kenta, Yaji Koichiro, Harasawa Ayumi, Shin Shik, Komori Fumio, Kimura Shin-ichi	4. 巻 3
2. 論文標題 Giant Rashba system on a semiconductor substrate with tunable Fermi level: Bi/GaSb(110)-(2×1)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 126001-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.126001	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 Zhang Peng, Wang Zhijun, Wu Xianxin, Yaji Koichiro, Ishida Yukiaki, Kohama Yoshimitsu, Dai Guangyang, Sun Yue, Bareille Cedric, Kuroda Kenta, Kondo Takeshi, Okazaki Kozo, Kindo Koichi, Wang Xiancheng, Jin Changqing, Hu Jiangping, Thomale Ronny, Sumida Kazuki, Wu Shilong, Miyamoto Koji, Okuda Taichi, Ding Hong, et.al.	4. 巻 15
2. 論文標題 Multiple topological states in iron-based superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 41 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-018-0280-z	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12件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Koichiro Yaji, Anton Visikovskiy, Takushi Iimori, Kenta Kuroda, Shingo Hayashi, Takashi. Kajiwara, Satoru Tanaka, Fumio. Komori, Shik Shin
2. 発表標題 Coexistence of Zeeman- and Rashba-type spin-split bands for a Sn atomic layer on SiC(0001)
3. 学会等名 The 17th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Yaji, Anton Visikovskiy, Takushi Iimori, Kenta Kuroda, Shingo Hayashi, Takashi. Kajiwara, Satoru Tanaka, Fumio. Komori, Shik Shin
2. 発表標題 Spin-polarized surface states of a Sn atomic layer at graphene/SiC(0001) interface
3. 学会等名 21st International Vacuum Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢治光一郎
2. 発表標題 スピン分解光電子分光 3.0
3. 学会等名 日本放射光学会第11回若手研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢治光一郎, Anton Visikovskiy, 飯盛拓嗣, 林真吾, 梶原隆司, 黒田健太, 田中悟, 小森文夫, 辛埴
2. 発表標題 グラフェン/SiC(0001)界面のSn単原子層における異なる型のスピン分裂バンドの共存
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Yaji
2. 発表標題 Spin-resolved photoemission spectroscopy of spin-orbit coupled surface states
3. 学会等名 19th International Conference on Solid Films and Surfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢治光一郎, Anton Visikovskiy, 飯盛拓嗣, 林真吾, 梶原隆司, 黒田健太, 田中悟, 小森文夫, 辛埴
2. 発表標題 グラフェン/Sn/SiC(0001)のスピンの偏極バンドと対称性
3. 学会等名 表面真空学術講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢治光一郎, 黒田健太, 小森文夫, 辛埴
2. 発表標題 偏光励起SARPESで観測するスピン軌道結合電子状態
3. 学会等名 第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yaji, A. Visikovskiy, T. Iimori, K. Kuroda, S. Hayashi, T. Kajiwara, S. Tanaka, F. Komori, S. Shin
2. 発表標題 Spin-polarized band structure of a Sn atomic layer at graphene/SiC(0001) interface
3. 学会等名 European conference on surface science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yaji, K. Kuroda, F. Komori, Shik Shi
2. 発表標題 Spin polarization of photoelectron emitted from spin-orbit coupled surface states investigated by laser-SARPES
3. 学会等名 International conference on electron spectroscopy and structure (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yaji, A. Visikovskiy, T. Imori, K. Kuroda, S. Hayashi, T. Kajiwara, S. Tanaka, F. Komori, S. Shin
2. 発表標題 Spin-polarized surface states of a Sn atomic layer at graphene/SiC(0001) interface, Internatioanl vacuum congress
3. 学会等名 Internatioanl vacuum congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢治光一郎
2. 発表標題 偏光励起SARPESで解き明かすスピン軌道結合電子状態
3. 学会等名 ワークショップ「超伝導物質、トポロジカル物質」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢治光一郎
2. 発表標題 スピン角度分解光電子分光による電子状態計測 ~物質研究から材料研究へ~
3. 学会等名 日本表面真空学会2021年度関東支部講演大会(招待講演)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------