

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20H01834
研究課題名（和文）顕微レーザー角度分解光電子分光による複合原子層における非自明なバンド構造の研究

研究課題名（英文）Nontrivial band structure in composite atomic layers studied by micro-focused laser angle-resolved photoelectron spectroscopy

研究代表者
坂野 昌人（Sakano, Masato）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：70806629
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では微小（ $\sim 0.01\text{mm}$ ）な試料でも測定可能な顕微レーザー角度分解光電子分光装置を開発し、テープを用いた剥離と転写技術を用いて作製するシート状の2次元物質の複合積層体における電子構造を直接観測する手法を確立した。それらを用いて遷移金属ダイカルコゲナイドの数原子層物質およびツイスト積層体においてバルク結晶では発現しない特異な電子構造を直接観測し、その起源を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2次元物質を力学的に積層することによって創られるファンデルワールス積層体では、構成要素である2次元物質が単独では発現しない物性が創発され得るため、未開拓物性の宝庫として基礎・応用の両面の観点から研究されている。しかし、複雑な結晶構造を有するファンデルワールス積層体では正確な電子構造の計算予測が難しく、それが研究進展のボトルネックとなっていた。本研究で開発した顕微レーザー角度分解光電子分光装置と、角度分解光電子分光測定を可能にするファンデルワールス積層体の試料作製方法を用いることによって、ファンデルワールス積層体の電子構造の直接観測が可能となり、物性研究が飛躍的に進められることになった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a micro-focused laser angle-resolved photoemission spectroscopy system that enables to measure of small ($\sim 0.01\text{ mm}$) samples and a sample fabrication procedure for direct observation of electronic structures in van der Waals heterostructures prepared by a mechanical exfoliation and dry-transfer technique. Using these techniques, we have observed novel electronic structures in transition metal dichalcogenide few-layer materials and twist-stacked materials, which do not appear in bulk crystals, and reveal their origins.

研究分野：固体物理

キーワード：角度分解光電子分光 原子層フレーク試料 ファンデルワールス積層体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2004年に報告されたテープを用いた機械的剥離によるグラフェンの作製技術の確立を皮切りに、2次元物質における電子状態の研究が盛んに行われるようになった。2010年代には原子層フレーク試料同士を積層する技術が発展し、2次元物質の複合積層体(ファンデルワールス積層体)の物性研究が盛んに行われるようになった。ファンデルワールス積層体では、構成要素である2次元物質では単独では発現し得ない物性が創発され得ることから、未開拓物性の宝庫として基礎・応用の両面から精力的に研究されている。その代表例として、2018年に報告されたおよそ1.1度だけひねって積層したツイスト2層グラフェンにおける超伝導状態の発現が挙げられる。この超伝導の発現には、およそ1.1度というツイスト角においてのみ特異な平坦バンド構造が形成されることが鍵となっている。このように、既知の2次元物質を組み合わせで作製されたファンデルワールス積層体では、非自明なバンド構造が新奇な量子現象を引き起こす。ファンデルワールス積層体の作製においては、積層する2次元物質の種類や積層する際のツイスト角度といった多岐にわたる自由度が存在しており、無限の組合せが考えられる。従来研究の多くは、原子層フレークからデバイス構造を作製し、電気伝導特性および光学特性と第一原理バンド計算の結果を比較することで進められてきた。これは、ファンデルワールス積層体が微小(~0.01 mm)な原子層フレークから構成されているおり、適応できる実験手法に限りがあるためである。従来の研究手法は比較的単純な電子構造を有しているツイスト2層グラフェンなどには有効ではあったものの、複雑構造を有する異種原子層の積層体や複雑なツイスト積層体などにおいては非周期的な結晶構造が複雑になればなるほど第一原理的な計算予測は困難になってしまい、それらが物性研究の進展におけるボトルネックとなっているという課題があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、角度分解光電子分光法を用いてファンデルワールス積層体の非自明なバンド構造を直接観測し、新奇量子現象を開拓することを目的とした。角度分解光電子分光は、物質のバンド構造を直接観測することのできる強力な実験手法である。研究開始当初、微小なファンデルワールス積層体に対して角度分解光電子分光測定を行うことのできる、顕微光源を有する海外放射光施設は存在していたが、無限の自由度がありつつも試料作製が困難である：物理的な議論ができる高品質な角度分解光電子分光像が得られるかは測定してみないとわからない、ファンデルワールス積層体のバンド構造の研究を行うためには、海外へ試料を運搬する必要がなくマシタイムの制約がない実験室単位での実験を行うことが、効率的な新奇量子現象の発見に必要であると考えた。そこで具体的なテーマとして(1)顕微レーザー角度分解光電子分光装置の開発、(2)複雑なファンデルワールス積層体に適用可能な角度分解光電子分光測定用の試料作製手法の開発、(3)2-5層 WTe₂の層数依存した電子構造の研究、(4)180度ツイスト2層 ReSe₂における空間反転対称性の破れの研究、を行った。

3. 研究の方法

本研究では、チタンサファイヤレーザー(772 nm、コヒレント社製)の第四次高調波である深紫外レーザー光(193 nm)を、測定を行う超高真空槽の外に設置された集光レンズセット(NTTアドバンステクノロジー社製)によって集光して、角度分解光電子分光測定を行うシステムを構築した。角度分解光電子分光測定用のファンデルワールス積層体の試料作製手法の開発は、東大生産研町田研究室の複合原子層作製システムを利用して行った。複合原子層作製システムは画像認識や機械学習および自律ロボットを用いて、窒素雰囲気下で原子層フレークを自在に積層することが可能であり、水分子の吸着や酸化による原子層フレーク試料の劣化を防ぐことが可能である。また、研究を進めるなかで(海外放射光施設と比較して、試料の輸送に際して融通が利く国内放射光施設である)高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーBL28において、顕微化(<0.015 mm)した放射光光源を用いた顕微角度分解光電子分光測定システムが整備された。高エネルギーな放射光光源と高分解能なレーザー光源を相補的に用いることによって、あらゆるファンデルワールス積層体の電子状態を観測できる環境が構築された。

4. 研究成果

(1)顕微レーザー角度分解光電子分光装置の開発

光学素子の新調および調整を行うとともに、装置の除振や実験室空調の新調による環境整備に取り組むことで、角度分解光電子分光測定を行う超高真空槽内の試料測定位置においてレーザー光を実測値(レーザープロファイルをガウス関数でフィッティングした際の全値半幅)で0.011 mmに集光(これをおよそ45度で試料に入射)することができた。図1(a)には、後述する試料作製方法を用いて作製されたツイスト2層+2層 WTe₂試料の光学顕微鏡写真が示されている。白線の長さが0.01 mmに対応しており、ツイスト積層体の試料サイズは0.005 mm四方未満である。そのような微小試料にもかかわらず図1(b)に示すような明瞭な角度

分解光電子分光像が得られることが明らかとなった。

(2)複雑なファンデルワールス積層体に適用可能な角度分解光電子分光測定用の試料作製手法の開発

ファンデルワールス積層体に対して角度分解光電子分光測定を行うためには、光電子放出に伴う帯電の抑止と測定の表面敏感性といった2つの困難を乗り越える必要がある。本研究では、吸着力の異なる有機ポリマーを用いてファンデルワールス積層体の上下を一度反転させる手順を含めた試料作製工程を開発した(図2)。それを用いて、測定ターゲットとなる原子層フレークはグラファイト基板を通して金電極に電気的に接続しており、最表面が単層グラフェンによって被覆された構造を作製した。比較的厚いグラファイト基板(~50 nm厚)は、光電子放出に伴う帯電を抑止するとともにツイスト積層体を作製する際や、階段形状になっている原子層フレーク試料から所望の層数の部分のみを選択的に積層する際に有用となる。最表面のグラフェンは、大気中の水や酸素によって測定ターゲットとなる試料が劣化するのを防ぐとともに、表面敏感な角度分解光電子分光法であってもバンド構造の直接観測を可能にしている。

開発した試料作製手法を用いて、後述する成果の他にも、1-6層 MoTe₂、ツイスト2層 WTe₂、ツイスト2層 WSe₂のバンド構造の研究を進めている。さらに、培われた試料作製技術を基にして、透過型電子顕微鏡を用いた測定やX線回折実験を行うことのできる試料の作製に成功した。これによってファンデルワールス積層体における結晶構造の評価という新たな研究展開が生まれた。

(3)2-5層 WTe₂の層数依存した電子構造の研究

開発した顕微レーザー角度分解光電子分光装置と試料作製手法を用いて、2-5層 WTe₂のバンド構造の直接観測を行った。それぞれの試料において明瞭な角度分解光電子分光像を得ることができた(図3)。フェルミ準位近傍の電子構造に着目すると、2層から3層にかけて、フェルミ準位を横切るバンド分散が形成されている様子が明らかとなった。これは輸送特性の結果から示されていた、2層から3層にかけての絶縁体半金属転移を分光測定によって捉えたものであると考えられる。さらに、偶数層数においてバンドが大きく分裂する様子が観測された。これは、スピン軌道相互作用と結晶構造における空間反転対称性の破れによってバンド分散におけるスピンの縮退が解けて、スピン分裂したバンド分散が形成されていることを示している。WTe₂は1T型の単層構造が、隣接層が180度ひねられるように積層されるという特異な結晶構造を有しており、それが結晶構造の非対称性における層数の偶奇効果を生み出すことが対称性の考察から明らかとなった。本研究によって、数層試料では積層の仕方によって単層ともバルクとも異なる電子構造が実現し、特異な物性が発現し得ることが明らかとなった。

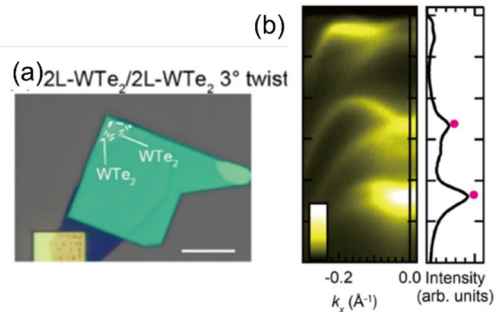


図1(a)ツイスト2層+2層 WTe₂試料の光学顕微鏡写真。白線は0.01 mmを示しており試料サイズは0.005 mm四方未満である。(b)得られた角度分解光電子分光像。

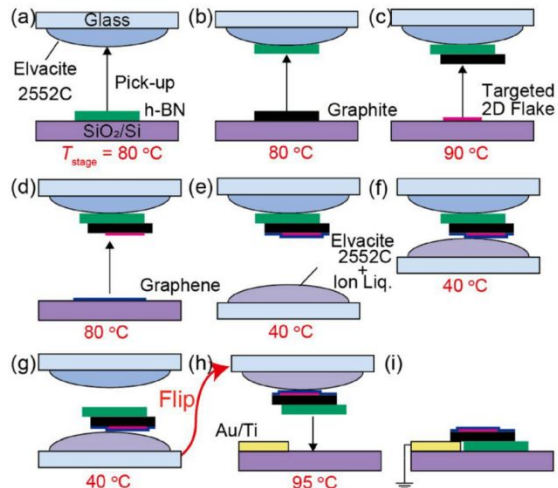


図2 ファンデルワールス積層体の試料作製手順(a)-(i)。吸着力の異なるポリマーを用いて、ファンデルワールス積層体の上下をひっくり返す手順(f)-(h)を含めることによって、グラファイトによる導通の確保と、単層グラフェンによる測定ターゲットの保護を両立させている。

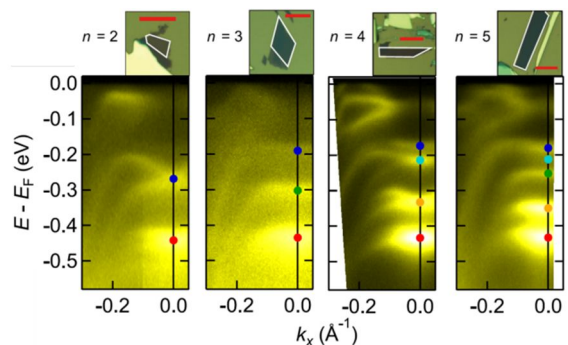


図3 2-5層 WTe₂の角度分解光電子分光像(下段)と測定に用いた2-5層 WTe₂フレーク試料(白枠線)の光学顕微鏡写真。赤線は0.01 mmに対応。

(4)180度ツイスト2層 ReSe₂における空間反転対称性の破れの研究

2-5層 WTe₂の電子構造の研究から着想を得て、層数に依らずに空間反転対称な1T型結晶構造を有するReSe₂の単層試料を180度ひねって積層することによって、人工的に空間反転対称性が破られた構造を作製可能であると考えた(図4)。そこで単層、2層、180度ツイスト2層 ReSe₂を作製し、第二次高調波発生実験と顕微角度分解光電子分光実験を行った。180度ツイスト2層 ReSe₂においてのみ第二次高調波が明瞭に観測され、空間反転対称性が破れた構造になっていることが確認された。顕微角度分解光電子分光では、単層、2層、180度ツイスト2層 ReSe₂試料からそれぞれ明瞭なバンド構造が観測された。180度ツイスト2層 ReSe₂試料からは、構成要素である単層 ReSe₂とは異なるバンド構造が観測され、層間の相互作用によって新たな電子状態が形成されていることが明らかとなった。本研究では、積層の仕方によって結晶の対称性を制御することによって、スピン物性や強誘電性などの量子現象が発現し得る天然には存在しない結晶構造を有する新物質を創出可能であることが示された。

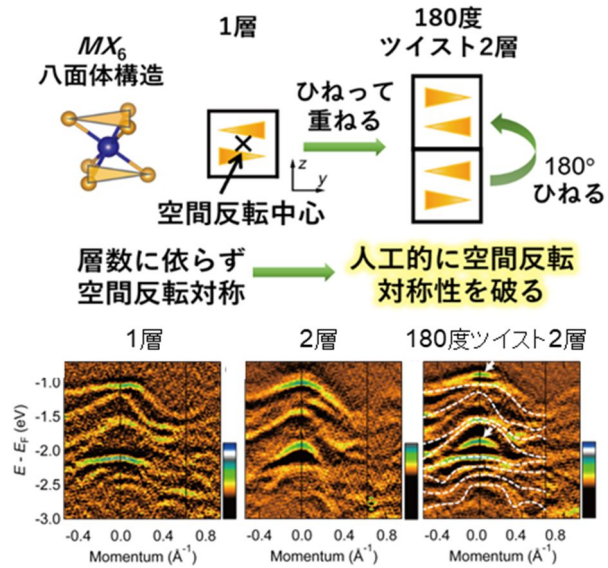


図4 (上段)カルコゲン原子の八面体構造(1T型構造)を有する単層 ReSe₂を180度ひねって積層することによって、人工的に空間反転対称性を破った180度ツイスト2層 ReSe₂を作製できることを示した概念図。(下段)得られた単層、2層、180度ツイスト2層 ReSe₂の角度分解光電子分光像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Bruno Kenichi Saika, Satoshi Hamao, Yuki Majima, Xiang Huang, Hideki Matsuoka, Satoshi Yoshida, Miho Kitamura, Masato Sakano, Tatsuto Hatanaka, Takuya Nomoto, Motoaki Hirayama, Koji Horiba, Hiroshi Kumigashira, Ryotaro Arita, Yoshihiro Iwasa, Masaki Nakano, and Kyoko Ishizaka	4. 巻 4
2. 論文標題 Signature of topological band crossing in ferromagnetic Cr1/3NbSe2 epitaxial thin film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L042021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.L042021	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 Satoru Masubuchi*, Masato Sakano*, Yuma. Tanaka*, Yusai Wakafuji, Takato Yamamoto Shota. Okazaki, Kenji Watanabe, Tkashi Taniguchi, Jincal Li, Hirotaka Ejima, Takao Sasagawa, Tomoki Machida, Kyoko Ishizaka (* equally contributed)	4. 巻 12
2. 論文標題 Dry pick-and-flip assembly of van der Waals heterostructures for microfocus angle-resolved photoemission spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-14845-z	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 Masato Sakano*, Yuma Tanaka*, Satoru Masubuchi*, Shota Okazaki, Takuya Nomoto, Atsushi Oshima, Kenji Watanabe, Tkashi Taniguchi, Ryotaro Arita, Takao Sasagawa, Tomoki Machida, Kyoko Ishizaka (* equally contributed)	4. 巻 4
2. 論文標題 Odd-even layer-number effect of valence-band spin splitting in WTe2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.023247	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 坂野 昌人、石坂 香子、増淵 覚、町田 友樹	4. 巻 90
2. 論文標題 顕微レーザー角度分解光電子分光による原子層WTe ₂ フレークの電子状態の観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 679 ~ 683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.90.11_679	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 坂野昌人	4. 巻 34
2. 論文標題 キラルな結晶構造を有するテルル単体におけるスピン偏極したバンド構造	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 放射光	6. 最初と最後の頁 235-241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Hidefumi Takahashi, Kai Aono, Yusuke Nambu, Ryoji Kiyonagi, Takuya Nomoto, Masato Sakano, Kyoko Ishizaka, Ryotaro Arita, and Shintaro Ishiwata	4. 巻 102
2. 論文標題 Competing spin modulations in the magnetically frustrated semimetal EuCuSb	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.174425	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29件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Masato Sakano
2. 発表標題 Breaking of spatial inversion symmetry in anti-parallel-stacked transition metal dichalcogenide
3. 学会等名 Superstripes 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masato Sakano
2. 発表標題 Micro-focused ARPES study on atomically thin WTe2 flakes
3. 学会等名 Superstripes 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂野昌人
2. 発表標題 カイラル半導体テルル単体におけるスピン構造の観測
3. 学会等名 カイラル物質科学の新展開 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Akatsuka, M. Sakano, T. Yamamoto, T. Nomoto, R. Arita, R. Murata, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, M. Kitamura, K. Horiba, K. Sugawara, S. Souma, T. Sato, H. Kumigashira, K. Shinokita, H. Wang, K. Matsuda, S. Masubuchi, T. Machida, K. Ishizaka
2. 発表標題 Breaking of spatial inversion symmetry in anti-parallel-stacked ReSe2
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Sakano, Y. Tanaka, S. Masubuchi, S. Okazaki, T. Nomoto, A. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Arita, T. Sasagawa, T. Machida, K. Ishizaka
2. 発表標題 Observation on the odd-even layer-number effect in WTe2 with laser-based micro-ARPES
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hamao, B. K. Bruno, X. Huang, Y. Majima, H. Matsuoka, M. Kitamura, M. Sakano, T. Nomoto, M. Hirayama, K. Horiba, H. Kumigashira, R. Arita, Y. Iwasa, M. Nakano and K. Ishizaka
2. 発表標題 Temperature dependent electronic structure of Cr1/4NbSe2 thin films revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山本崇人, 坂野昌人, 赤塚俊輔, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 三石夏樹, 北村未歩, 堀場弘司, 菅原克明, 相馬清吾, 佐藤宇史, 組頭広志, 篠北啓介, 松田一成, 増淵寛, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 ツイスト2層WSe2におけるバンド構造のツイスト角依存性の直接観測
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木剛, 久保田雄也, 三石夏樹, 赤塚俊輔, 古賀淳平, 坂野昌人, 増淵寛, 田中良和, 大隅寛幸, 玉作賢治, 矢橋牧名, 高橋英史, 石渡晋太郎, 町田友樹, 松田巖, 石坂香子, 岡崎浩三
2. 発表標題 時間分解X線回折測定によるVTe2における超高速格子変調ダイナミクスの観測
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 車地崇, 木俣基, 今城周作, 三石夏樹, 坂野昌人, 巖正輝, 鬼頭俊介, 池内和彦, 中村充孝, Jorge. I. Facio, 佐賀山基, 石坂香子, 金道浩一, 有馬孝尚
2. 発表標題 希土類金属間化合物TbTXの量子振動におけるリフシツ-コセヴィッチの式の破れ
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木剛, 久保田雄也, 三石夏樹, 赤塚俊輔, 古賀淳平, 坂野昌人, 増淵寛, 田中良和, 大隅寛幸, 玉作賢治, 矢橋牧名, 高橋英史, 石渡晋太郎, 町田友樹, 松田巖, 石坂香子, 岡崎浩三
2. 発表標題 時間分解X線回折測定によるVTe2における超高速格子変調ダイナミクスの研究
3. 学会等名 第36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 2023年

1. 発表者名 三石夏樹, 杉田悠介, 上谷学, 秋葉智起, 坂野昌人, 堀場弘司, 組頭広志, 酒井英明, 高橋英史, 石渡晋太郎, 求幸年, 石坂香子
2. 発表標題 V族遷移金属テルライドMTe ₂ (M = V, Nb, Ta)の電子構造と一次元鎖構造不安定性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村飛鳥, 千足勇介, 下志万貴博, 田中佑磨, 坂野昌人, 増淵寛, 町田友樹, 渡邊賢司, 谷口尚, 石坂香子
2. 発表標題 超高速時間分解電子顕微鏡によるツイスト2層WSe ₂ の超高速格子ダイナミクスの研究
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤塚俊輔, 坂野昌人, 山本崇人, 野本拓也, 有田亮太郎, 村田陵河, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 北村未歩, 堀場弘司, 菅原克明, 相馬清吾, 佐藤宇史, 組頭広志, 篠北啓介, 松田一成, 増淵寛, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 180度ツイスト2層ReSe ₂ における空間反転対称性の破れと電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱尾智, Bruno Kenichi Saika, 黄驥, 真島裕貴, 松岡秀樹, 北村未歩, 坂野昌人, 野本拓也, 平山元昭, 堀場弘司, 組頭広志, 有田亮太郎, 岩佐義宏, 中野匡規, 石坂香子
2. 発表標題 角度分解光電子分光によるCr ₁ /4NbSe ₂ 薄膜におけるバンド構造の温度変化の観測
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峯明史, Yigui Zhong, Sahand Najafzadeh, 大川顕次郎, 坂野昌人, 石坂香子, 幸埴, 笹川崇男, 岡崎浩三
2. 発表標題 極低温高分解能レーザーARPESによるトポロジカル超伝導体PdBi ₂ における超伝導ギャップの直接観測
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato Sakano, Yuma Tanaka, Satoru Masubuchi, Shota Okazaki, Takuya Nomoto, Atsushi Oshima, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Ryotaro Arita, Takao Sasagawa, Tomoki Machida, and Kyoko Ishizaka
2. 発表標題 micro-focused ARPES study on transition metal dichalcogenide flakes
3. 学会等名 The 9th International Workshop on 2D Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Sakano, Y. Tanaka, S. Masubuchi, S. Okazaki, T. Nomoto, A. Oshima, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. Arita, T. Sasagawa, T. Machida, K. Ishizaka
2. 発表標題 Direct observation of the layer-number-dependent electronic structure in few-layer WTe ₂
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂野昌人, 田中佑磨, 増淵寛, 岡崎尚太, 野本拓也, 山本崇人, 渡邊賢司, 谷口尚, 有田亮太郎, 笹川崇男, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 ツイスト二層/二層WTe ₂ における電子状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Sakano
2. 発表標題 Direct observation of the layer-number-dependent electronic structure in few-layer WTe ₂
3. 学会等名 5th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato Sakano
2. 発表標題 Direct observation of the layer-number-dependent electronic structure in few-layer WTe ₂
3. 学会等名 The 61st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 B. K. Bruno, S. Hamao, H. Matsuoka, M. Nakano, M. Kitamura, M. Sakano, T. Nomoto, M. Hirayama, K. Horiba, H. Kumigashira, R. Arita, Y. Iwasa, and K. Ishizaka
2. 発表標題 Electronic structure of Cr ₁ /3NbSe ₂ epitaxial thin films studied by angle-resolved photoemission spectroscopy
3. 学会等名 APS March meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中佑磨, 増淵寛, 坂野昌人, 野本拓也, 有田亮太郎, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 武田和大, 大池広志, 賀川史敬, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 原子層1T'-MoTe ₂ における電子状態の観測と層数依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋英史, 青野快, 南部雄亮, 鬼柳亮嗣, 野本拓也, 坂野昌人, 石坂香子, 有田亮太郎, 石渡晋太郎
2. 発表標題 磁性半金属EuCuSbにおけるフラストレーションに起因した特異な磁気基底状態の解明
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑磨, 増淵寛, 坂野昌人, 大島敦史, 野本拓也, 有田亮太郎, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 原子層WTe2における層数依存した電子状態の観測
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 M. Sakano
2. 発表標題 Direct observation of the layer-number-dependent electronic structure in few-layer WTe2
3. 学会等名 The 7th International Wworkshop on 2D Materals (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Sakano, M. Hirayama, T. Takahashi, S. Akebi, M. Nakayama, K. Kuroda, K. Taguchi, T. Yoshikawa, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Ono, H. Kumigashira, T. Ideue, Y. Iwasa, N. Mitsuishi, K. Ishizaka, S. Shin, T. Miyake, S. Murakami, T. Sasagawa, and Takeshi Kondo
2. 発表標題 Radial spin texture in elemental tellurium with chiral crystal structure
3. 学会等名 Quantum Complex Matter 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Tanaka, S. Masubuchi, M. Sakano, A. Oshima, T. Nomoto, R. Arita, S. Okazaki, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, K. Ishizaka
2. 発表標題 Fabrication of atomically thin WTe2 flakes and band structure investigation by angle-resolved photoemission spectroscopy
3. 学会等名 Quantum Complex Matter 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Tanaka, S. Masubuchi, M. Sakano, A. Oshima, T. Nomoto, R. Arita, S. Okazaki, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, K. Ishizaka
2. 発表標題 Observation of the layer dependent electronic structures in atomically thin WTe2 flakes
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑磨, 増淵寛, 坂野昌人, 野本拓也, 有田亮太郎, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 武田和太, 大池広志, 賀川史敬, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 原子層WTe2における電子状態の観測と層数依存性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>2022年6月29日 プレスリリース 「2次元物質の電子構造の直接観測 原子層の数の偶奇で大きく変わる性質を発見」 東京大学工学部 https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-06-29-002</p>

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