

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02105

研究課題名(和文) スピン分解ARPESによる機能性薄膜ハイブリッドの創出

研究課題名(英文) Development of functional ultra-thin film hybrid based on spin-resolved ARPES

研究代表者

高橋 隆 (Takashi, Takahashi)

東北大学・材料科学高等研究所・教授

研究者番号：00142919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,900,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル絶縁体やグラフェンなどの新奇物質の基盤電子状態の決定と、それに基づく戦略的な高機能物質創生、さらに異物質のハイブリッド化による新機能創発を目的として、多元MBEシステムを組み込んだ高分解能スピン分解光電子分光複合装置を建設した。この装置を用いて、FeSe原子層超薄膜におけるバルクを遥かに凌駕する高温超伝導の発現、2層グラフェンの超伝導化、3層グラフェンの積層構造制御、原子層遷移金属ダイカルコゲナイドの電子状態制御、界面ディラック電子状態の観測と質量制御、ワイル半金属・線ノード半金属の発見など、電子構造の決定と制御による原子層新機能物質の高機能化、および新たな物質相の確立に成功した。

研究成果の概要(英文)：We constructed a complex spin-resolved ARPES system with a multi-component MBE system to achieve the following three targets; (1) exploring the electronic structure of novel functional materials, (2) strategic development of advanced new materials based on the determined electronic structure, and (3) creating novel functions by making a hybrid of different materials. Using this ARPES system, we have succeeded in creating several new materials/functions as well as improving their novel properties. Some representative achievements are realization of high- T_c superconductivity in atomically thin FeSe, fabrication of superconducting bilayer graphene with intercalation method, synthesis of trilayer graphene with selecting the stacking sequence and identification of the electronic structure, control and tuning of electronic structure in atomically thin transition-metal dichalcogenide, observation and mass-tuning of Dirac-cone interface states, and discovery of Weyl and nodal-line semimetals.

研究分野：光電子固体物性学

キーワード：スピン分解光電子分光 分子線エピタキシー 高温超伝導体 トポロジカル絶縁体 グラフェン 遷移
金属ダイカルコゲナイド ワイル半金属 ディラック半金属

1. 研究開始当初の背景

半導体ヘテロ構造や銅酸化物高温超伝導などに代表される二次元電子系は、三次元系にはない巨視的量子現象や電子物性を示すことから、広範な分野において最も重要な研究舞台の一つである。エレクトロニクス応用には、電子のもつ電荷の自由度が鍵を握るが、スピントロニクスと呼ばれる、電子のスピン自由度に着目した研究が近年急速に発展しており、とりわけ、トポロジカル絶縁体やグラフェンなどのエキゾチックな二次元電子状態をもつ薄膜物質において興味深い機能や量子現象が注目を集めている。種々の二次元薄膜について、期待されるような種々の量子現象を発現させ、その物性応用を展開するには、機能の中心を担う「電子構造」に立脚した戦略的な物質開拓と高機能化が必要であり、(1) その場観察による薄膜の電子・スピン状態の直接評価、(2) 異種薄膜のヘテロ構造の実現、の二点が不可欠となる。

電子状態を評価する実験手段の中でも、角度分解光電子分光(ARPES)は、電子の「エネルギー」と「運動量」を同時に決定できる唯一の手法であり(図1)、その長所を生かして、例えば銅酸化物高温超伝導体における超伝導発現機構の解明などで大きな役割を果たして来た。他方、近年のスピントロニクス関連物質の著しい研究進展や、次世代省エネルギーデバイス応用の可能性を鑑みると、ARPES が電子のスピン自由度まで決定することができれば、応用まで含めた薄膜物質研究において、強力な実験手段となる。ところ

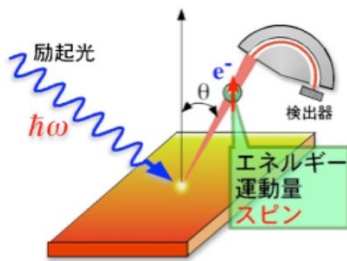


図1 光電子分光と電子の全物理量

が、電子のスピン自由度には検出効率の低さ($\sim 1/1000$)という問題があり、装置の開発は長らく停滞していた。これを克服するため、申請者らは、「超高分解能3次元スピン分解光電子分光装置」(平成23-26年度 基盤研究(S) 代表:高橋 隆)の開発に取り組み、高効率・高エネルギー分解能のスピン分解光電子分光の実現に成功した。この装置により、様々な高機能物質についてスピンにまで分解した物質の電子状態の解明が進みつつある。

種々の二次元薄膜の基盤電子構造の確立が実験的に可能となった今こそ、これら物性の高度化を更に推進すべき段階にあると考え、申請者らは、世界最高性能のスピン分解ARPES装置をMBE薄膜作成装置とドッキングし、機能性薄膜の特性をその場で評価してこれを試料作製に生かす作製と評価のフ

ィードバックループを確立することで、上記(1)の問題を解決したいと考えた。これに加えて、二次元薄膜への新機能付与と新奇量子現象の発現において決定的に重要な点が、上述(2)の異種薄膜ヘテロ構造の作成である。グラフェンやトポロジカル絶縁体は、それ自体が高い機能性を有するものの、マヨラナ準粒子の発現やトポロジカル電気磁気効果など、理論的に提案されている種々の量子現象は、その多くが異種の薄膜物質を接合して初めて実現する。異種薄膜の接合には、各分野での高度な薄膜育成技術に加え、高水準での育成技術の融合が求められる。この現状に立ち、申請者らは、複数の異なる高機能物質、とりわけ、(i)トポロジカル絶縁体、(ii)ラシュバ・強磁性金属、(iii)高温超伝導体、および(iv)グラフェン関連物質の4分野の二次元薄膜が、新機能物質におけるデバイス応用に資する電子構造の解明に重要との認識から、スピン分解ARPES装置の開発と並行してこれらの物質群のMBE装置の開発とその電子状態解明を進めてきた。申請者らは既に、高い超伝導転移温度を示すFeSe薄膜の作製、巨大なスピン分裂を示すラシュバ金属の発見、Fe超薄膜における異常な強磁性の発見、SiC上の大面積グラフェンの育成と元素インターカレーションなどに成功した。これらのMBE技術を組み合わせ、薄膜ヘテロ構造(ハイブリッド構造)の作製を可能とするプラットフォームを実現する事で、個々の母材料にはない量子現象や高機能を発現する、新たな機能性薄膜の開発の道を拓くことができると考えられる。

2. 研究の目的

近年、トポロジカル絶縁体やグラフェンに代表される新機能物質が次々と発見され、基礎科学やデバイス応用の研究が加速的に進展している。これらの新機能物質を基軸として新たな量子現象を創出するためには、電子状態のその場(in-situ)完全評価と、これに基づく戦略的な薄膜物質の作成が本質的に重要である。本研究では、分子線エピタキシー法によって、トポロジカル絶縁体、高温超伝導体、グラフェン、ラシュバ・強磁性金属の4系統のエピタキシャル薄膜を自在に組み合わせたヘテロ構造を作成する薄膜ハイブリッドMBEシステムを構築して超高分解能3次元スピン分解光電子分光装置とドッキングする。この複合装置によって種々の高機能薄膜とそのヘテロ構造における基盤電子構造を確立し、二次元電子系を舞台とした新奇量子現象の創出を目指す。

3. 研究の方法

多様な量子物質相の創発を目的として、各種高機能物質の薄膜MBE装置の間を、in-situで試料を相互移送して異種物質接合を作製する「薄膜ハイブリッドMBEシステム」と、試料の電子状態をスピンにまで分解

して完全評価する「スピン分解高分解能光電子分光装置」が一体となった「薄膜ハイブリッド MBE-スピン分解 ARPES 複合装置」の建設を行った。薄膜ハイブリッド MBE において、グラフェン、超伝導薄膜、トポロジカル絶縁体薄膜、ラシュバ・強磁性薄膜の4つの系統を中心に MBE 装置を立ち上げ、各種試料の成長基板に適した通電加熱機構とスパッタ・アニール機構の製作・設置、分子線ビーム向上のための各元素専用の蒸着源の製作、膜厚計の設置・調整などを行った。スピン分解光電子分光装置においては、スピン検出効率向上のための磁性ターゲットの改良、電子検出システムにおける CCD カメラとネットワークの高速化、紫外レーザー光源の導入と調整、2 軸モーターを搭載した電子レンズ系への改良、またそれに伴う電子イメージの歪み補正などを行い、エネルギー・角度分解能の向上に成功した。

装置開発と並行して、建設した装置を用いて以下のテーマを中心に研究を進めた。

【高温超伝導体】

鉄系原子層超伝導薄膜の作製と光電子分光測定、キャリアドーピングによる電子相図の決定、基板からの歪み効果、高温超伝導機構の解明

【グラフェンおよび関連物質】

インターカレーションによるグラフェンの超伝導化、多層膜の結晶構造制御、遷移金属ダイカルコゲナイドの原子層薄膜の作製と電子物性の起源および制御機構の解明

【トポロジカル絶縁体】

新規トポロジカル物質相創発のためのトポロジカル絶縁体薄膜の作製と電子構造の解明、ディラック半金属、ワイル半金属を実現する物質の探索

【ラシュバ・強磁性薄膜】

重金属薄膜表面における巨大ラシュバ効果、強磁性薄膜の作製と表面電子状態、希薄磁性半導体の電子構造の解明

【薄膜ハイブリッド】

上記4つの物質のヘテロ接合の作製、界面ディラック電子状態の直接観測、マヨラナ粒子などの新奇準粒子観測のためのプラットフォーム物質の探索、界面電子構造の制御

4. 研究成果

【高温超伝導体】

2008 年に発見された鉄系高温超伝導体は、バルク結晶において最高で 55 K 程度の超伝導転移温度が報告されているが、原子層超薄膜においてはその T_c を凌駕する可能性が指摘されてきた。本研究では、単層 FeSe 超薄膜の作成に成功し、60 K を超える高温超伝導を検証することに成功した。さらに、これまで超伝導が報告されてこなかった多層 FeSe 超薄膜においても、アルカリ金属を蒸着して母物質のフェルミオロジーを制御す

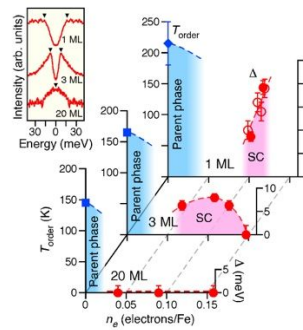


図2 単層・多層 FeSe 超薄膜の電子相図

ることで、多層において世界で初めて超伝導を発現させることに成功した。さらに、基板応力の違いを利用して結晶格子の歪みとフェルミ面の関係を明らかにした他、FeSe における反強磁性秩序とミラー対称性によるディラック電子状態の発現などを見出した。これらの成果により鉄系超伝導体を利用したナノ超伝導デバイスの素子開発が急速に進展すると期待される。

【グラフェンおよび関連物質】

シリコンカーバイド(SiC)上に高品質の2層グラフェンを作製し、グラフェンの層間にカルシウム原子を規則的に挿入することで、二層グラフェン層間化合物 C_6CaC_6 の原子層超薄膜の作製を行った。原子層超薄膜の本来の伝導特性を観測するために、マイクロ4端子法により C_6CaC_6 試料の低温における電気伝導度を測定したところ、この超薄膜物質が超伝導転移温度 $T_c=4$ K(onset)の新型超伝導体であることを見出した。本成果は、米国電気電子学会(IEEE)やアメリカ物理学協会

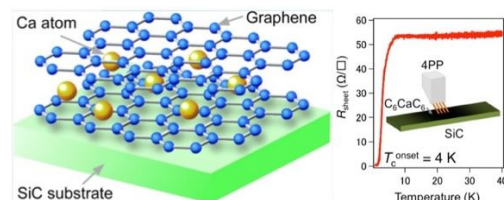


図3 原子層 C_6CaC_6 の結晶構造と電気抵抗

(AIP)でトップニュースとして取り上げられ、国内外から大きな反響があった。

また、三層グラフェンにおいて、2種類存在する積層パターン(ABA, ABC)の作り分けにも世界で初めて成功した。ARPES 測定により、ABA 構造で質量ゼロのディラック電子状態が E_F 近傍に存在する一方で、自然界に僅かしか存在しない ABC 構造ではディラック伝状態が有限の質量をもつことで、 E_F 上にギャップを開くことを見出した。以上より、積層パターンにより電気特性の異なるグラフェンを作り分ける事が可能であると結論した。

【トポロジカル絶縁体】

Bi_2Se_3 及び Bi_2Te_3 の薄膜の作製を行い、量

子サイズ効果によるバンドの変調と、膜厚減少に伴うトポロジカル相転移の可能性を指摘した。グラフェン、Si、遷移金属ダイカルコゲナイドなど様々な基板において Bi_2Se_3 の単ドメイン薄膜の成長に成功した。その他に、多重ヘテロ構造超伝導物質 $\text{Cu}_x(\text{PbSe})_5(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_6$ における2次元フェルミ面の観測、Tl系トポロジカル絶縁体の高バルク絶縁化、超伝導 Tl- Bi_2Te_3 のフェルミ面の観測などを行った。

さらに、新たなトポロジカル物質相として、反転中心のない層状化合物 NbP のフェルミアークの観測とワイル半金属相の確立、線形ディラックバンドが1次元的に連なるトポロジカル線ノード半金属 HfSiS におけるバルク線ノード電子構造の確立と、理論では予測されていないディラックノードアーク表面状態の観測、またディラックバンドのみがフェルミ面を構成する理想的線ノード半金属 CaAgAs の電子構造を確立した。

【薄膜ハイブリッド・ラシュバ効果】

2次元トポロジカル絶縁体/半金属相が提唱されている Bi 超薄膜を $1T\text{-TaS}_2$ 上に成長させることに成功した。その結果、膜厚の減少に伴う Bi(111)から Bi(110)への構造相転移を観測し、また Bi(110)超薄膜において、 E_F 近傍の電子のディラックコーン電子状態が基板との相互作用、もしくは $1T\text{-TaS}_2$ の CDW 近接効果により、制御できる可能性を

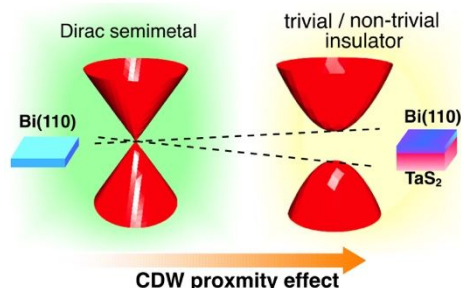


図4 Bi 超薄膜におけるディラック電子状態と CDW 近接効果

指摘した。

鉄とタングステンを接合することによって、その界面にディラック電子を発生させ、さらにディラック電子に巨大な質量を与えることに成功した。ディラック電子の質量の大きさはトポロジカル絶縁体に比べて遥かに大きく、さらに鉄薄膜の磁化の向きを制御することで、質量の切り替えも可能であることを見出した。

さらに、トポロジカル超伝導相を高温で実現するために、銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{212}$ の上に Bi 超薄膜の成長を行い、結晶が安定して成長する条件を確立した。10 BL の Bi 薄膜において近接効果による超伝導ギャップは観測されず、 $\text{Bi}_2\text{212}$ のコヒーレンス長 (~1nm) に匹敵する厚さの Bi 超薄膜の成長が

近接効果の観測に不可欠と結論した。

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37件)

- (1) K. Yamada, S. Souma, K. Yamauchi, N. Shimamura, K. Sugawara, C. X. Trang, T. Oguchi, K. Ueno, T. Takahashi, and T. Sato, Ultrathin Bismuth Film on $1T\text{-TaS}_2$: Structural Transition and Charge-Density-Wave Proximity Effect, *Nano Letters* **18**, 査読有, 2018, 3235-3240, DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01003
- (2) Y. Nakata, T. Yoshizawa, K. Sugawara, Y. Umemoto, T. Takahashi and T. Sato, Selective Fabrication of Mott-Insulating and Metallic Monolayer TaSe_2 , *ACS Applied Nano Materials* **1**, 査読有, 2018, 1456-1460, DOI: 10.1021/acsanm.8b00184
- (3) K. Sugawara, N. Yamamura, K. Matsuda, W. Norimatsu, M. Kusunoki, T. Sato, and T. Takahashi, “Selective fabrication of free-standing ABA and ABC trilayer graphene with/without Dirac-cone energy bands”, 査読有, *NPG Asia Materials* **10**, 2018, e466/1-5, DOI:10.1038/am.2017.238
- (4) Y. Satake, J. Shiogai, D. Takane, K. Yamada, K. Fujiwara, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, and A. Tsukazaki, “Fermi-level tuning of the Dirac surface state in $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Se}_3$ thin films”, 査読有, *Journal of Physics: Condensed Matter* **30**, 2018, 085501/1-6, DOI: 10.1088/1361-648X/aaa724
- (5) D. Takane, K. Nakayama, S. Souma, T. Wada, Y. Okamoto, K. Takenaka, Y. Yamakawa, A. Yamakage, T. Mitsuhashi, K. Horiba, H. Kumigashira, T. Takahashi, and T. Sato, “Observation of Dirac-like energy band and ring-torus Fermi surface associated with the nodal line in topological insulator CaAgAs”, 査読有, *npj Quantum Materials* **3**, 2018, 36897, doi:10.1038/s41535-017-0074-z
- (6) Y. Ito, Y. Tanabe, K. Sugawara, M. Koshino, T. Takahashi, K. Tanigaki, H. Aoki, M. Chen, “Three-dimensional porous graphene networks expand graphene-based electronic device applications”, 査読有, *Physical Chemistry Chemical Physics* **20**, 2018, 6024-6033, DOI: 10.1039/C7CP07667C
- (7) S. Kanayama, K. Nakayama, G. N. Phan, M. Kuno, K. Sugawara, T. Takahashi, and T. Sato, “Two-dimensional Dirac semimetal phase in undoped one-monolayer FeSe film”, 査読有, *Physical Review B* **96**, 2017, 220509R/1-5,

- DOI: 10.1103/PhysRevB.96.220509
- (8) S. Souma, K. Honma, T. Sato, M. Tsujikawa, M. Shirai, and T. Takahashi, “Emergence of undulating surface band upon oxygen adsorption of Fe thin film on W(110)”, 査読有, Applied Physics Letters **111**, 2017, 241603/1-4, DOI: 10.1063/1.5017484
- (9) K. Sugawara, K. Suzuki, M. Sato, T. Sato, and T. Takahashi, “Enhancement of band gap and evolution of in-gap states in hydrogen-adsorbed monolayer graphene on SiC(0001)”, 査読有, Carbon **124**, 2017, 584-587, DOI: 10.1016/j.carbon.2017.09.024
- (10) H. Oinuma, S. Souma, D. Takane, T. Nakamura, K. Nakayama, T. Mitsuhashi, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Yoshida, A. Ochiai, T. Takahashi, and T. Sato, “Three-dimensional band structure of LaSb and CeSb: Absence of band inversion”, 査読有, Physical Review B **96**, 2017, 041120R/1-5, DOI: 10.1103/PhysRevB.96.041120
- (11) G. N. Phan, K. Nakayama, K. Sugawara, T. Sato, T. Urata, Y. Tanabe, K. Tanigaki, F. Nabeshima, Y. Imai, A. Maeda, and T. Takahashi, “Effects of strain on the electronic structure, superconductivity, and nematicity in FeSe studied by angle-resolved photoemission spectroscopy”, 査読有, Physical Review B **95**, 2017, 224507/1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.224507
- (12) K. Nakayama, M. Kuno, K. Yamauchi, S. Souma, K. Sugawara, T. Oguchi, T. Sato, and T. Takahashi, “Band splitting and Weyl nodes in trigonal tellurium studied by angle-resolved photoemission spectroscopy and density functional theory”, 査読有, Physical Review B **95**, 2017, 125204, DOI:10.1103/PhysRevB.95.125204
- (13) 高橋隆, 菅原克明, 一ノ倉聖, 高山あかり, 長谷川修司, 「2層グラフェン層間化合物の2次元超伝導」, 査読有, 表面科学 **38**, 2017, 460-465. DOI: 10.1380/jsssj.38.460
- (14) D. Takane, Z. Wang, S. Souma, K. Nakayama, C. X. Trang, T. Sato, T. Takahashi, and Y. Ando, “Dirac-node arc in the topological line-node semimetal HfSiS”, Physical Review B, 査読有, **94**, 2016, 121108, DOI:10.1103/PhysRevB.94.121108
- (15) Y. Nakata, K. Sugawara, R. Shimizu, Y. Okada, P. Han, T. Hitosugi, K. Ueno, T. Sato, and T. Takahashi, “Monolayer 1T-NbSe₂ as a Mott insulator”, 査読有, NPG Asia Materials **8**, 2016, e321, DOI:10.1038/am.2016.157
- (16) 中山耕輔, 「FeSe 原子層膜超伝導」, 査読有, 固体物理 (超伝導の新しい潮流) 特集号 **51**, 2016, 751-761.
- (17) D. Takane, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, K. Segawa, and Y. Ando, “Work function of bulk-insulating topological insulator Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y”, 査読有, Applied Physics Letters **109**, 2016, 091601, DOI:10.1063/1.4961987
- (18) Y. Tanabe, Y. Ito, K. Sugawara, D. Hojo, M. Koshino, T. Fujita, T. Aida, X. Xu, K. K. Huynh, H. Shimotani, T. Adschiri, T. Takahashi, K. Tanigaki, H. Aoki, and M. Chen, “Electric Properties of Dirac Fermions Captured into 3D Nanoporous Graphene Networks”, 査読有, Advanced Materials **28**, 2016, 10304-10310, DOI:10.1002/adma.201601067
- (19) S. Souma, L. Chen, R. Oszwaldowski, T. Sato, F. Matsukura, T. Dietl, H. Ohno and T. Takahashi, “Fermi level position, Coulomb gap, and Dresselhaus splitting in (Ga,Mn)As”, 査読有, Scientific Reports **6**, 2016, 27266, DOI:10.1038/srep27266
- (20) C. X. Trang, Z. Wang, D. Takane, K. Nakayama, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, A. A. Taskin, and Yoichi Ando, “Fermiology of possible topological superconductor Tl_{0.5}Bi₂Te₃ derived from hole-doped topological insulator”, 査読有, Physical Review B **93**, 2016, 241103(R), DOI:10.1103/PhysRevB.93.241103
- (21) C. X. Trang, Z. Wang, K. Yamada, S. Souma, T. Sato, T. Takahashi, K. Segawa, and Y. Ando, “Metal-insulator transition and tunable Dirac-cone surface state in topological insulator TlBi_{1-x}Sb_xTe₂ studied by ARPES”, 査読有, Physical Review B **93**, 2016, 165213, DOI:10.1103/PhysRevB.93.165213
- (22) S. Souma, Z. Wang, H. Kotaka, T. Sato, K. Nakayama, Y. Tanaka, H. Kimizuka, T. Takahashi, K. Yamauchi, T. Oguchi, K. Segawa, and Y. Ando, “Direct Observation of Nonequivalent Fermi-Arc States of Opposite Surfaces in Noncentrosymmetric Weyl Semimetal NbP”, 査読有, Physical Review B **93**, 2016, 161112(R), DOI: 10.1103/PhysRevB.93.161112
- (23) S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa, “Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene”, 査読有, ACS Nano **10**, 2016, 2761-2765, DOI: 10.1021/acsnano.5b07848
- (24) K. Sugawara, Y. Nakata, R. Shimizu, P. Han, T. Hitosugi, T. Sato, and T. Takahashi, “Unconventional Charge-Density-Wave Transition in Monolayer 1T-TiSe₂”, 査読有, ACS Nano **10**, 2016, 1341-1345, DOI: 10.1021/acsnano.5b06727
- (25) H. Honma, T. Sato, S. Souma, K. Sugawara, Y. Tanaka, and T. Takahashi, “Switching of Dirac-fermion mass at the interface of ultrathin ferromagnet and Rashba metal”, 査読有, Physical Review Letters **115**, 2015, 266401, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.266401
- (26) K. Nakayama, H. Kimizuka, Y. Tanaka, T.

- Sato, S. Souma, T. Takahashi, S. Sasaki, K. Segawa, and Y. Ando, “Observation of two-dimensional bulk electronic states in superconducting topological insulator heterostructure $\text{Cu}_x(\text{PbSe})_y(\text{Bi}_2\text{Se}_3)_z$: implications for unconventional superconductivity”, 査読有, *Physical Review B* **92**, 2015, 100508(R). DOI:10.1103/PhysRevB.92.100508
- (27) K. Sugawara, T. Sato, Y. Tanaka, S. Souma, and T. Takahashi, “Spin- and valley- coupled electronic states in monolayer WSe_2 on bilayer graphene”, 査読有, *Applied Physics Letters* **107**, 2015, 071601. DOI: 10.1063/1.4928658
- (28) Y. Miyata, K. Nakayama, K. Sugawara, T. Sato, and T. Takahashi, “High-temperature superconductivity in potassium-coated multilayer FeSe thin films”, 査読有, *Nature Materials* **14**, 2015, 775-779. DOI:10.1038/nmat4302
- 〔学会発表〕(計 114 件)
- (1) 菅原克明, TiSe_2 超薄膜における電子構造のキャリア量依存性, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 岩手, 2017 年 9 月 21 日.
- (2) Seigo Souma, Electronic structure of topological semimetal (invited), MaHoJeRO-Symposium, Mainz (Germany), Sep 8, 2017.
- (3) Takafumi Sato, Electronic states of novel topological materials studied by ARPES (invited), International Workshop on Strong Correlations and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy (CORPES-17), Hiroshima, Jul 2, 2017.
- (4) 菅原克明, 高橋隆, 超伝導グラフェンの作製とその電子デバイスへの応用 (招待講演), ファインケミカルジャパン 2017, 東京ビッグサイト(東京), 2017 年 4 月 21 日
- (5) 菅原克明, グラフェン関連原子層超伝導 (招待講演), 日本物理学会 第 71 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月 17-20 日.
- (6) 相馬清吾, 高分解能 ARPES で見たトポロジカル半金属の電子構造(招待講演), 新学術領域 TMS 第二回領域研究会, 東北大学, 2016 年 12 月 16-18 日.
- (7) Kosuke Nakayama, Electronic structure of iron-based high-Tc superconductors (invited), 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), Tokyo International Forum, Tokyo, Dec 13-15, 2016.
- (8) 高橋隆, 放射光を用いたテラレーメイド高機能材料開発 (招待講演), 東北大学金属材料研究所共同利用ワークショップ 3GeV 高輝度放射光 SLiT-J と産学協創, 東北大学, 2016 年 12 月 13-14 日.
- (9) 中山耕輔, FeSe 原子層薄膜における高温超伝導 (招待講演), 日本物理学会 第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月 19-22 日.
- (10) Kosuke Nakayama, High-Tc superconductivity in multilayer FeSe films seen

- via high-resolution ARPES (invited), CEMS Topical Meeting on Emergent 2D Materials, RIKEN, 2015 年 12 月 11-12 日.
- (11) 佐藤宇史, 光電子分光で見る新奇トポロジカル物質の電子状態 (招待講演), 第 9 回物性科学領域横断研究会, 東京大学, 2015 年 11 月 13-15 日.
- (12) Seigo Souma, Direct observation of spin in materials by photoemission spectroscopy (invited), 12th JGFoS symposium, Kyoto, Oct 1-4, 2015.
- (13) Kosuke Nakayama, High-temperature superconductivity in atomically thin multilayer FeSe films on SrTiO_3 International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015, Geneva, Swiss, Aug 23-28, 2015.
- (14) Takashi Takahashi, Topological Insulators Studied by Spin-Resolved ARPES, ICMAT2015 & IUMRS-ICA2015, Singapore, Jun 28-Jul 3, 2015.

〔図書〕(計 1 件)

- (1) 高橋隆, 佐藤宇史, 「基本法則から読み解く物理学最前線 16, ARPES で探る固体の電子構造 —高温超伝導体からトポロジカル絶縁体—」, 共立出版, 2017, 101.

〔その他〕

ホームページ等

<https://arpes.phys.tohoku.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 隆 (TAKAHASHI, Takashi)
東北大学・材料科学高等研究所・教授
研究者番号: 00142919

(2) 研究分担者

佐藤 宇史 (SATO, Takafumii)
東北大学・理学研究科・教授
研究者番号: 10361065

相馬 清吾 (SOUMA, Seigo)
東北大学・スピントロニクス学術連携研究教育センター・准教授
研究者番号: 20431489

菅原 克明 (SUGAWARA, Katsuaki)
東北大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 70547306

中山 耕輔 (NAKAYAMA, Kosuke)
東北大学・理学研究科・助教
研究者番号: 40583547

福谷 圭祐 (FUKUTANI, Keisuke)
東北大学・高度教養教育・学生支援機構
・助教

(H28 年 3 月まで)

研究者番号: 10706021