

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17464

研究課題名(和文)独立駆動4探針・磁性探針STMによるスピン偏極した1次元電子系の研究

研究課題名(英文) Study of spin-polarized one-dimensional edge state using by using independently-driven four-tip STM

研究代表者

高山 あかり (Takayama, Akari)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：70722338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：スピン偏極したバンド構造を持つ物質について電気伝導測定をメインに様々な物性測定を行った。その場4探針電気伝導測定装置を用いてSi(111)微傾斜面上に作成したトポロジカル絶縁体Bi₂Se₃およびBi₂Te₃薄膜における輸送特性のステップエッジの効果を明らかにした。また、トポロジカル物質と磁性絶縁体のヘテロ接合構造MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃におけるバンドおよびスピン構造・構造解析・磁化特性・輸送特性を解明した。さらに、電気伝導測定およびSTM/STS測定により、巨大Rashba効果をもつ表面超構造(Tl, Pb)/Si(111), (Tl, Pb)/Ge(111)の超伝導現象の解明を行った。

研究成果の概要(英文)：We have found the transport property of topological insulator and surface superstructure with Rashba effect, which have spin-polarized band on surface or edge. We have investigated the transport properties on step edge for topological insulators Bi₂Se₃ and Bi₂Te₃ thin films on the Si(111) substrate by using the in-situ 4PP electrical conductivity measurement. We have also clarified various physical properties of MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃, which is heterojunction between magnetic insulator and topological insulator. In addition, we have demonstrated the superconductivity of (Tl, Pb)/Si(111) and (Tl, Pb)/Ge(111) which show the giant Rashba effect by using 4PP resistivity measurement and STM/STS.

研究分野：表面物理

キーワード：スピン物性 Rashba効果 トポロジカル絶縁体 輸送特性

1. 研究開始当初の背景

Rashba 系やトポロジカル物質では、スピン軌道相互作用によって空間反転対称性の破れた 2 次元面や 1 次元エッジにスピン偏極バンドが形成されることが知られており、これまで 2 次元面を中心に、スピン・角度分解光電子分光 (ARPES) が行われ、その電子状態が明らかになってきた。1 次元の輸送特性を測定・議論するためには、バルクと表面・エッジ状態を分離し、測定方向をエッジ方向に対して任意に制御する必要がある。また、スピン偏極バンドを持つ 2 次元表面の輸送特性について、磁性との関連性など、多くの疑問が残されていた。

2. 研究の目的

本研究は、スピン偏極したバンド構造を持つ、Rashba 効果およびトポロジカル絶縁体について、独立駆動型 4 探針電気伝導測定装置を用いて、これらの輸送特性を明らかにし、その次元性に関する議論を目的とする。また、磁性不純物がこれらのスピン状態に与える影響などを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、4 つの STM 探針が独立に駆動するプローブ装置「独立駆動型 4 探針電気伝導測定装置」において実験を行う。装置の改良、カーボンナノチューブに磁性体を蒸着した磁性探針の作成等を行う。微傾斜面上に成長させた Rashba 系・トポロジカル物質などを用い、それらの電気伝導測定などを行う。

4. 研究成果

極低温測定に対応するため、独立駆動型 4 探針電気伝導測定装置の STM 槽内に熱シールドとしてテフロンシートを設置した。また、カーボンナノチューブ探針に強磁性体 CoFe 薄膜を蒸着した磁性探針を作成した。さらに、全体の真空度の向上、や電気ノイズの低減、走査電子顕微鏡 SEM のフィラメント高輝度化などを行った。

Si(111)微傾斜面上に作成したトポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ および Bi₂Te₃ 薄膜を用いて正方 4 探針測定を行った。1 次元エッジと並行なテラス方向、1 次元エッジを垂直に横切るステップ方向において、それぞれ電気抵抗を測定した結果、エッジを横切る場合の伝導度が、

並行な場合より低くなることがわかった。このことは、後方散乱が禁止されるトポロジカル絶縁体においても、ステップエッジが抵抗として働くことを示唆している。また、膜厚の異なる試料で同様の実験を行った結果、この異方性は膜厚が薄いほど顕著であった。このことは、厚い膜ではバルクの伝導が増加したためと考えられる。さらに、バルクを分離した輸送特性を測定するため、Bi の一部を Pb で置換した (Bi_(1-x)Pb_x)₂Te₃ ($x = 0.00, 0.10, 0.17, 0.20$) において電気伝導測定を行った。その結果、 $x > 0.10$ の試料において、やや高い電気抵抗値を示すことを観測した。これは、Pb 置換によってバンド全体がホールドープされ、表面バンドのみがフェルミ準位を横切るという ARPES による先行研究と矛盾しない[1]。これは、バルクの影響を取り除き、スピン偏極した表面バンドとエッジ由来の成分のみが含まれる輸送特性である。

また、トポロジカル物質と磁性絶縁体のヘテロ接合構造における輸送特性を明らかにするため、Bi₂Se₃ や Bi₂Te₃ に Mn と Se を蒸着した薄膜について研究を行った。光電子分光測定によるバンド分散の決定や LEED-IV による構造解析の結果では、Bi₂Se₃ に Mn のみの層を含む MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃ が新たに形成されていることが明らかになった。スピン偏極したバンド分散を持つトポロジカル絶縁体 Bi₂Se₃ に Mn を組み込んだ人工構造 MnBi₂Se₄/Bi₂Se₃ について、その物性を明らかにするため様々な実験を行った。理論計算から、Bi₂Se₃ の表面スピン偏極バンドの電子軌道と磁性体 Mn の電子軌道が重なることで、ディラックコーンにギャップが生じたことを明らかにした。また、SQUID および XMCD 測定により、MnBi₂Se₄ の強磁性の詳細を明らかにした。この試料について「その場 4 端子電気伝導測定法」を用いた実験を行った結果、Mn の蒸着量が増えるにつれて、それぞれで金属的な伝導を示しつつも、電気伝導度が減少する様子を観測した。MnBi₂Se₄ を形成したあとの余分な Mn が試料内部に拡散した Mn が散乱体として働くことが一因であると結論した。

さらに、巨大 Rashba 効果により、表面にスピン偏極したバンドをもつ (Tl, Pb)/Si(111), (Tl, Pb)/Ge(111) において極低温・強磁場下その場 4 端子電気伝導測定を行った。いずれも 2 K 付近での超伝導転移を観測し、Rashba 系表面超構造での超伝導を初めて報告した。スピン偏極バンドのみがフェルミ面に存在することから、スピン偏極バンドが超伝導にな

っていると考えられる。また、STS/STM 測定の結果、超伝導ギャップの形状が V 字型を示すこと、また表面全体が超伝導渦で覆われる磁場下においても、ギャップが存在する様子を観測したことから、非 BCS 的な超伝導であると考えている。また、磁場下 STM/STS 測定において、エッジでは超伝導渦の形成が観測されなかった。表面超構造で超伝導を示す In/Si(111)では、低磁場領域で、エッジに超伝導渦が形成された様子が報告されており[2]、今後、スピン分裂の大きい(Tl, Pb)/Si(111)のエッジ構造の伝導をより深く追求したい。

上記 3 つの研究結果について、論文発表、学会発表により成果報告を行った。

<引用文献>

1. M. Aitani, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 110112.
2. S. Yoshizawa, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 247004.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① S. Y. Matsushita, A. Takayama, E. Kawamoto, C. Hu, S. Hagiwara, K. Watanabe, T. Takahashi, and S. Suto, Anisotropic electronic band structure of intrinsic Si(110) studied by angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculations, Phys. Rev. B 96, 125302 (2017). DOI:10.1103/PhysRevB.96.125302, 査読有
- ② P. Chen, W. W. Pai, Y.-H. Chan, A. Takayama, C.-Z. Xu, A. Karn, S. Hasegawa, M. Y. Chou, S.-K. Mo, A.-V. Fedorov and T.-C. Chiang, Emergence of charge density waves and a pseudogap in single-layer TlTe₂, Nat. Commun. 8, 516 (2017). DOI: 10.1038/s41467-017-00641-1, 査読有
- ③ T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa, Y. Okuyama, T. Kubo, R. Nakanishi, R. Akiyama, A. Takayama, T. Hajiri, S. Ideta, M. Matsunami, K. Sumida, K. Miyamoto, Y. Takagi, K. Tanaka, T. Okuda, T. Yokoyama, S. Kimura, S. Hasegawa, and E. V. Chulkov, Large-Gap Magnetic Topological Heterostructure Formed by Subsurface Incorporation of a Ferromagnetic Layer, Nano Lett. 17, 3493–3500 (2017). DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b00560, 査読有
- ④ 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, 表面科学 38, 460-465 (2017). <https://doi.org/10.1380/jsssj.38.460>, 査読有

- ⑤ S. Ito, B. Feng, M. Arita, A. Takayama, R.-Y. Liu, T. Someya, W.-C. Chen, T. Iimori, H. Namatame, M. Taniguchi, C.-M. Cheng, S.-J. Tang, F. Komori, K. Kobayashi, T.-C. Chiang, and I. Matsuda, Proving Nontrivial Topology of Pure Bismuth by Quantum Confinement, Phys. Rev. Lett. 117, 236402 (2016). DOI:10.1103/PhysRevLett.117.236402, 査読有
- ⑥ S. Ichinokura, K. Sugawara, A. Takayama, T. Takahashi, and S. Hasegawa, Superconducting Calcium-Intercalated Bilayer Graphene, ACS Nano, 10, 2761-2765 (2016). DOI: 10.1021/acsnano.5b07848, 査読有
- ⑦ 一ノ倉聖, 保原麗, 高山あかり, 長谷川修司, A. V. Matetskiy, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, *In situ* 電気伝導測定による Rashba 型表面構造 (Tl, Pb)/Si(111)の超伝導の観測, 表面科学 37, 363-368 (2016). <https://doi.org/10.1380/jsssj.37.363>, 査読有
- ⑧ A. V. Matetskiy, S. Ichinokura, L. V. Bondarenko, A. Y. Tupchaya, D. V. Gruznev, A. V. Zotov, A. A. Saranin, R. Hobara, A. Takayama, and S. Hasegawa, Two-Dimensional Superconductor with a Giant Rashba Effect: One-Atom-Layer Tl-Pb Compound on Si(111), Phys. Rev. Lett. 115, 147003 (2015). DOI:10.1103/PhysRevLett.115.147003, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① Structural analysis of bilayer graphene on SiC substrate by total-reflection high-energy positron diffraction, Symposium on Surface and Nano Science 2018 (国際学会) 2018 年 1 月 10 日(Furano, Japan)
- ② グラフェン/SiC の輸送特性:基板との相互作用の効果, 日本物理学会 (2017 年秋季大会) 2017 年 9 月 21 日(岩手大学, 盛岡)
- ③ Rashba 系表面超構造の超伝導, 日本表面科学会 2017 年真空・表面科学合同講演会 (招待講演) 2017 年 8 月 16 日(横浜市大, 横浜)
- ④ One-dimensional edge states with spin splitting in bismuth, Nano-Micro Conference 2017 (招待講演) (国際学会)

- 2017年6月21日(Shanghai, China)
- ⑤ STM・ARPESによる(Pb,Bi)/Si(111)の構造および電子状態, 日本物理学会, 2017年3月17日(大阪大学, 大阪)
 - ⑥ TRHEPDを用いた2層グラフェン層間化合物C₆LiC₆の構造解析, 陽電子回折研究会, 2017年1月20日(高エネルギー加速器研究機構, つくば)
 - ⑦ 走査トンネル分光測定による(Tl,Pb)/Si(111)表面超構造における超伝導の観測, 物性研短期研究会, 2016年10月31日(東京大学物性研究所, 柏)
 - ⑧ One-Dimensional Edge States with Giant Spin Splitting in a Bismuth Thin Film studied by spin-resolved ARPES, Spintronics - EMN Las Vegas Meetings, 2016年10月12日 (Las Vegas, USA). (招待講演) (国際学会)
 - ⑨ Pb/Ge(111)超薄膜における電子構造および輸送特性の膜厚依存性, 日本物理学会, 2016年9月16日(金沢大学, 金沢)
 - ⑩ Electronic properties of Pb/Ge(111) studied by ARPES and transport measurements, The 20th International Vacuum Congress (IVC-20), 2016年8月25日(Busan, Korea). (国際学会)
 - ⑪ MnX/Bi₂X₃ (X=Se, Te)薄膜の輸送特性, 日本物理学会, 2015年9月19日(関西大学, 大阪)
 - ⑫ Pb/Ge(111)超薄膜における構造と輸送特性, 日本物理学会, 2015年9月18日(関西大学, 大阪)

[図書] (計 1件)

- ① A. Takayama, Anomalous Rashba effect of Bi thin film studied by spin-resolved ARPES, Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings, Intech, (2016). 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高山 あかり (TAKAYAMA, Akari)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号 : 70722338