

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340092

研究課題名（和文）空間反転対称性の破れたナノ超伝導体のスピン分解フェルミオロジー

研究課題名（英文）Spin-resolved fermiology of nano-superconductors  
with a broken space inversion symmetry

研究代表者

木村 昭夫 (KIMURA AKIO)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00272534

研究成果の概要（和文）：

本研究は、空間反転対称性の破れに起因するナノ構造体のスピン分裂バンド構造について、スピン・角度分解光電子分光、高分解能角度分解光電子分光、および低温走査型トンネル顕微鏡を用いて明らかにすることを目的として行った。その結果、ビスマス単結晶のバルク状態のスピン状態の観測、タリウムや鉛吸着半導体表面における巨大なスピン分裂バンドの観測、さらには新しいトポロジカル絶縁体の発見など数々の顕著な成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

The aim of our research was to clarify the spin-split band structures of nanostructures induced by a space inversion symmetry utilizing spin- and angle- resolved photoemission spectroscopy, high-resolution angle-resolved photoemission spectroscopy and scanning tunneling microscopy. In the study, spin polarized bulk continuum states in a Bi single crystal, a giant spin-split bands at Tl and Pd adsorbed semiconductor surface and new topological insulators have been discovered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：固体物理（実験）

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：空間反転対称性の破れ、スピン角度分解光電子分光、高分解能角度分解光電子分光、走査型トンネル顕微鏡、ラシュバ効果、トポロジカル絶縁体

## 1. 研究開始当初の背景

空間反転対称性の破れた固体表面では非磁性体であっても波数空間においてスピン分裂バンドが生じる。このような特異な電子構造によって、電場によって誘起されるスピン流などが期待され興味深い。さらには、空間反転対称性の破れたナノ超伝導体が人工的に作成できれば、スピン1重項と3重項の混成が

許可されるような特異な超伝導状態が実現できるはずである。

## 2. 研究の目的

本研究は、半導体表面にPbなどの重元素超構造やナノ構造を人工的に作成し、空間反転対称性の破れに起因するスピン分裂バンド構造およびその準粒子の振る舞いについて、スピン・角度分解光電子分光、高分解能角度

分解光電子分光, および低温走査型トンネル顕微鏡を用いて明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

この研究目的を達成するにあたって, スピン・角度分解光電子分光, 高分解能角度分解光電子分光, 低温走査型トンネル顕微鏡に代表される3つの測定手法を用いて研究をすすめた。スピン・角度分解光電子分光については, 小型モット型スピン検出器を備えた装置の開発高効率化を行ってきた。これまでは, 試料マニピュレーターの回転軸が1軸に限定されていたために, フェルミ面の決定には不十分であった。そこで, 本研究では, まず多軸回転ができるマニピュレータを新たに導入し, フェルミ面のマッピングを可能にした。

### 4. 研究成果

平成20年度は, 既存のスピン・角度分解光電子分光装置に液体ヘリウムを用いて冷却可能な極低温クライオスタット付き高精度多軸回転マニピュレータ (i-GONIO) を新規に導入した。また, Bi(111)単結晶表面, Sb/Si(111), Tl/Si(111)などの半導体吸着表面について現行装置を用いた実験を行った。特にTl/Si(111)については, ブリルアンゾーンの境界に位置する波数において, スピンが垂直に向く現象を世界で初めて明らかにした (発表論文11)。本研究に関して中国新聞 (2009年3月4日社会面), 北國新聞 (2009年3月4日社会7面), 日刊工業新聞, 科学新聞に成果が報道された。

平成21年度は, 平成20年度に設置した極低温クライオスタット付き高精度多軸回転マニピュレータを用いて Sb/Si(111), Bi/Si(111), Pb/Si(111), Bi/W(110)等を対象としたスピン・角度分解光電子分光実験を行った。特に, Bi/Si(111)に関する実験結果では, 時間反転対称性を持たない場合でもラシュバ効果が現れるというまったく新しい物理概念を見いだすことができ世界中の注目を集めた (発表論文9)。本研究は中国新聞 (2009年10月6日社会面) に成果が報道された。

平成22年度は, ビスマス単結晶のバルク状態においてもラシュバ型のスピン分裂が現れることを初めて発見した (発表論文4)。また鉛吸着半導体表面にて巨大なラシュバ型スピン分裂を伴った金属的なバンドを世界で初めて発見した (発表論文6) [日刊工業新聞 (2010.5.18), 産経新聞 (2010.5.18)]。さらにトポロジカル絶縁体ビスマス・セレナイドの表面状態のフェルミ面が六角形に変形していることをつきとめた (発表論文5) [日刊工業新聞 (2010.8.30), 科学新聞 (2010.9.3)]。また3元化合物のタリウム・ビスマス・セレナイドが新しいトポロジカル

絶縁体であることを発見し, 従来よりも理想的な表面状態が形成されていることを明らかにした (発表論文3) [中国新聞 (2010.9.22)]。

### 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18件)

1. Y. Ohtsubo, S. Hatta, K. Yaji, H. Okuyama, K. Miyamoto, T. Okuda, A. Kimura, H. Namatame, M. Taniguchi, and T. Aruga, “Spin-polarized semiconductor surface states localized in subsurface layers,” Phys. Rev. B, 査読有, vol.82, 2010, 201307(R)/pp.1-4.
2. T. Okuda, K. Miyamaoto, Y. Takeichi, H. Miyahara, M. Ogawa, A. Harasawa, A. Kimura, I. Matsuda, A. Kakizaki, T. Shishidou, and T. Oguchi, “Large out-of-plane spin polarization in a spin-splitting one-dimensional metallic surface state on Si(557)-Au,” Phys. Rev. B, 査読有, vol.82, 2010, 161410 (R)/pp.1-4.
3. K. Kuroda, M. Ye, A. Kimura, S. V. Eremeev, E. E. Krasovskii, E. V. Chulkov, Y. Ueda, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Shimada, Y. Ueda, H. Namatame and M. Taniguchi, “Experimental Realization of a Three-Dimensional Topological Insulator Phase in Ternary Chalcogenide TlBiSe<sub>2</sub>,” Phys. Rev. Lett., 査読有, vol.105, 2010, 146801/pp.1-4.
4. A. Kimura, E. E. Krasovskii, R. Nishimura, K. Miyamoto, T. Kadono, K. Kanomaru, E. V. Chulkov, G. Bihlmayer, K. Shimada, H. Namatame, and M. Taniguchi, “Strong Rashba-Type Spin Polarization of the Photocurrent from Bulk Continuum States: Experiment and Theory for Bi(111),” Phys. Rev. Lett., 査読有, vol.105, 2010, 076804/pp.1-4.
5. K. Kuroda, M. Arita, K. Miyamoto, M. Ye, J. Jiang, A. Kimura, E. E. Krasovskii, E. V. Chulkov, H. Iwasawa, T. Okuda, K. Shimada, Y. Ueda, H. Namatame and M. Taniguchi, “Hexagonally Deformed Fermi Surface of 3D topological Insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>,” Phys. Rev. Lett., 査読有, vol.105, 2010, 076802/pp.1-4.
6. K. Yaji, Y. Ohtsubo, S. Hatta, H. Okuyama, K. Miyamoto, T. Okuda, A. Kimura, H. Namatame, M. Taniguchi, and T. Aruga, “Large Rashba spin splitting of a metallic surface-state band on a semiconductor surface,” Nature Commun., 査読有, vol.1, 2010, pp.1-5.
7. M. Ye, Y.T. Cui, Y. Nishimura, Y. Yamada, S. Qiao, A. Kimura, M. Nakatake, H. Namatame, and M. Taniguchi, “Edge states of epitaxially grown graphene on 4H-SiC(0001) studied by scanning tunneling microscopy,” Eur. Phys. J. B, 査読有, vol.75, 2010, pp.31-35.

8. 宮本幸治, 木村昭夫, スピン・角度分解光電子分光による表面 Rashba 効果の研究, *J. Vac. Soc. Jpn.*, 査読有, vol.52, 2009, pp.616-623.

9. K. Sakamoto, H. Kakuta, K. Sugawara, K. Miyamoto, A. Kimura, T. Kuzumaki, N. Ueno, E. Annese, J. Fujii, A. Kodama, T. Shishidou, H. Namatame, M. Taniguchi, T. Sato, T. Takahashi, and T. Oguchi, "Peculiar Rashba Splitting Originating from the Two-Dimensional Symmetry of the Surface," *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, vol.103, 2009, 156801/pp.1-4.

10. Y. Nishimura, M. Kakeya, M. Higashiguchi, A. Kimura, M. Taniguchi, H. Narita, Y. Cui, M. Nakatake, K. Shimada, and H. Namatame, "Surface electronic structures of ferromagnetic Ni(111) studied by STM and angle-resolved photoemission," *Phys. Rev. B*, 査読有, vol.79, 2009, 245402/pp.1-5.

11. K. Sakamoto, T. Oda, A. Kimura, K. Miyamoto, M. Tsujikawa, A. Imai, N. Ueno, H. Namatame, M. Taniguchi, P. E. J. Eriksson, and R. I. G. Uhrberg, "Abrupt rotation of the Rashba spin to the direction perpendicular to the surface," *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, vol.102, 2009, 096805/pp.1-4.

12. M. Ye, Y. T. Cui, S. Qiao, A. Kimura, M. Sawada, H. Namatame, M. Taniguchi, "Graphene epitaxially grown on vicinal 4H-SiC(0001) substrates," *e-J. Surf. Sci. Nanotech.*, 査読有, vol.7, 2009, pp.29-34.

13. 木村昭夫, スピン角度分解光電子分光(解説), 「まぐね」, 査読有, vol. 3, 2008, pp.7-13.

14. T. Kadono, K. Miyamoto, R. Nishimura, K. Kanomaru, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, A. Kimura, M. Taniguchi, "Direct evidence of spin polarized band structure of Sb(111) surface," *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol.93, 2008, 252107/pp.1-3.

15. K. Miyamoto, K. Iori, K. Sakamoto, H. Narita, A. Kimura, M. Taniguchi, S. Qiao, K. Hasegawa, K. Shimada, H. Namatame and S. Blügel: "Spin polarized d surface resonance state of fcc Co/Cu(001)," *New J. Phys.*, 査読有, vol.10, 2008, 125032/pp.1-10.

16. H. Narita, A. Kimura, M. Taniguchi, M. Nakatake, T. Xie, S. Qiao, H. Namatame, S. Yang, L. Zhang, E. G. Wang, "Tip-induced band bending effect and local electronic structure of Al nanoclusters on Si(111)," *Phys. Rev. B*, 査読有, vol.78, 2008, 115309/pp.1-6.

17. T. Hirahara, K. Miyamoto, A. Kimura, Y. Niinuma, G. Bihlmayer, E.V. Chulkov, T. Nagao, I. Matsuda, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, S. Hasegawa, "Origin of the surface-state band splitting in ultrathin Bi films: from a Rashba effect to a parity effect," *New J.*

*Phys.*, 査読有, vol.10, 2008, 083038/pp.1-12.

18. K. Miyamoto, K. Iori, K. Sakamoto, A. Kimura, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame and M. Taniguchi: "Spin dependent electronic band structure of Co/Cu(001) with different film thicknesses," *J. Phys.: Condens. Matter.*, 査読有, vol.20, 2008, 225001/pp.1-5.

[学会発表] (計 16 件)

1. 木村昭夫, 「トポロジカル物質のスピン分解 ARPES」, ISSP-Workshop 「東京大学アウトステーション (Spring-8 BL07LSU) での物性研究の新展開」, 2011年3月8日, 柏市.
2. A. Kimura, "Probing the Dirac Fermions in the Ternary Topological Insulators by ARPES with Synchrotron Radiation," The 15th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, Mar. 3-4, 2011, Higashi-Hiroshima.
3. 木村昭夫, 「3次元トポロジカル絶縁体 - 放射光光電子分光でとらえる表面ディラック・コーン-」 第400回物性セミナー記念講演会「ディラック電子特集」, 2011年1月11日, 東広島市.
4. A. Kimura, K. Kuroda, M. Ye, Y. Ueda, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, "Ternary bismuth chalcogenides as a new class of 3D topological insulator," 第15回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-15 「半導体スピントロニクス」の展開, 2010年12月21日, つくば市.
5. 木村昭夫, "Controlling the topological electronic states of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  by guest atoms intercalation," 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第1回領域研究会, 2010年12月20日, 京都市.
6. 木村昭夫, "A more ideal Dirac cone realized in the ternary topological insulator  $\text{TlBiSe}_2$ ," 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」第1回領域研究会, 2010年12月19日, 京都市.
7. A. Kimura, "Novel Electronic Structures of Strongly Spin-Orbit Coupled Systems: From Rashba System To Topological Insulator," International Conference of AUMS, Dec. 5-8, 2010, Jeju, South-Korea.
8. A. Kimura, S. Kim, K. Kuroda, M. Ye, K. Miyamoto, M. Nakatake, T. Okuda, Y. Ueda, H. Namatame, and M. Taniguchi, "Surface scattering via bulk continuum states in the 3D topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  probed by scanning tunneling microscope," The 6th International Workshop on Nano-scale Spectroscopy and Nanotechnology, Oct.25-29, 2010, Kobe.
9. 木村昭夫, 「ARPES および STM で見る 3

次元トポロジカル絶縁体の電子構造」量子物理学・ナノサイエンス第 27 回セミナー, 2010 年 9 月 13 日, 東京都.

10. A. Kimura, “Rashba effect in metals by spin-resolved photoemission”, 449. Wilhelm and Else Heraeus Seminar: “Rashba and related spin-orbit effects in metals, Jan.6-8, 2010, Physikzentrum Bad Honnef, Germany.

11. A. Kimura, “Spin-resolved ARPES as a probe of surface and bulk electronic structures”, 11-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure, Oct.6-10, 2009, Nara.

12. A. Kimura, “Photoemission and core absorption spectroscopy with synchrotron radiation for the future nanospintronics”, 5th Korean Japanese Students Workshop, Sep. 10-11, 2009, Pusan National University, South-Korea.

13. 木村昭夫, 「分光測定でわかること」, 第 1 回日本放射光学会放射光基礎講習会「先端研究開発ツールとしての放射光利用技術」, 2009 年 9 月 7 日, 東京都.

14. A. Kimura, “Core absorption spectroscopy with polarized synchrotron radiation; Application to functional materials”, 10<sup>th</sup> International School and Workshop of Crystallography on “Role of Synchrotron Radiation in Advancement of Materials Sciences”, Feb.1-5, 2009, Ain Soukhna, Egypt.

15. A. Kimura, “Core absorption spectroscopy with polarized synchrotron radiation-- Principles and experimental techniques --”, 10<sup>th</sup> International School and Workshop of Crystallography on “Role of Synchrotron Radiation in Advancement of Materials Sciences”, Feb.1-5, 2009, Ain Soukhna, Egypt.

16. A. Kimura, “Electronic structure of functional materials revealed by photoelectron spectroscopy”, SESAME-JSPS School “The Synchrotron Light Applications”, Nov.17-22, 2008, Cairo, Egypt.

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/srphys/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 昭夫 (KIMURA AKIO)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00272534

### (2) 研究分担者

生天目 博文 (NAMATAME HIROFUMI)

広島大学・放射光科学研究センター・教授

研究者番号：10218050

井野 明洋 (INO AKIHIRO)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60363040

仲武 昌史 (NAKATAKE MASASHI)

広島大学・放射光科学研究センター・助教

研究者番号：60342599

坂本 一之 (SAKAMOTO KAZUYUKI)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号：70261542

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：