

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244066

研究課題名(和文) 高効率スピン分解光電子分光法の高度化とスピントロニクス材料の3次元スピン解析

研究課題名(英文) Improvement of high efficiency spin-resolved photoelectron spectroscopy and 3-dimensional spin analysis of materials for spintronics

研究代表者

奥田 太一 (Okuda, Taichi)

広島大学・放射光科学研究センター・准教授

研究者番号：80313120

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,700,000円、(間接経費) 7,710,000円

研究成果の概要(和文)：電子の持つスピン自由度を詳細に観測することは、磁性体の性質や、スピン軌道相互作用の誘起する新規スピン物性を理解する上で非常に重要である。これまでスピン検出器としてはモット検出器が主流であったが、スピン検出効率が非常に低いという欠点があった。近年我々の開発・改良したVLEEDスピン検出器はモット検出器の100倍のスピン検出効率を持つ優れた検出器である。本研究では、このVLEEDスピン検出器を二台配置し、電子のスピン偏極度のみならずスピンベクトルを三次元的に決定することができる装置を開発した。これにより次世代のスピントロニクス材料のスピン電子物性を詳細に研究することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Spin freedom is one of the most important aspect of electrons. Magnetic properties of materials and a new spin related phenomena caused by spin-orbit interaction can be understood by investigating the energy, momentum and spin of electron in solids. To investigate electron spin one needs spin detector. Most popular spin detector is so-called Mott detector that is used all over the world so far. However, the efficiency of spin detection is very low. Recently we have developed a new spin detector called VLEED spin detector that has 100 times higher efficiency than the Mott detector. In this study we utilised two VLEED detectors and enabled to investigate the direction of spin vector as well as its spin polarization. Because of the high efficiency, 10 (5) times higher energy (angular) resolution in spin-resolved photoemission has been realised. This study opens a pathway to investigate spin properties of materials for the next generation spintronics devices very precisely.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：スピントロニクス スピン分解光電子分光 スピン軌道相互作用 装置開発 トポロジカル絶縁体 ラシュバ分裂

1. 研究開始当初の背景

エレクトロニクスの限界が叫ばれる中、電子の電荷だけでなく、電子のスピン自由度を利用したスピントロニクスの研究が盛んになってきている。固体中の電子スピンは古くから知られるように磁性体の磁性の直接原因であり、固体内のスピン電子状態を知ることにより物質の磁性を知ることができる。一方最近注目されるトポロジカル絶縁体やラッシュバスピンスピン分裂などに代表される固体中のスピン軌道相互作用が関与したスピン物性では、電子のトータルのスピンアンバランスではなく波数に依存したスピンの非対称性が重要になっており、スピンを分離した電子状態(スピン分離したバンド構造)を観測することが重要である。スピン・角度分解光電子分光法は電子の固体中でのエネルギーと運動量、さらにスピンを直接的に観測できる手段として再び脚光を浴びており、現在世界中でスピン・角度分解光電子分光装置の建設ラッシュが始まっている。中でもスイスライトソースに建設された装置では従来のモットスピン検出器と呼ばれるスピン検出器を2台利用することによりスピンベクトルの三次元解析を可能とし、これまで、トポロジカル絶縁体などの様々な新物質の研究を行って来ている。しかしながらモット検出器は測定効率が原理上非常に低いためスイスライトソースのような高輝度低エネルギー光源がその利用に必要不可欠となっていた。一方日本国内には低エネルギーの高輝度放射光源は残念ながら存在しないことから、この分野での日本の遅れが近年顕著になりつつあった。

2. 研究の目的

そこで従来のモット検出器の欠点である低検出効率という問題を解決するため、我々は2008年頃から低速電子回折(VLEED)を用いた高効率のスピン検出器の開発を開始した。その結果従来のモット検出器の約100倍のスピン検出効率を持つ検出器の実用化に成功した。これによりこれまで不可能だった高分解能でのスピン分解光電子分光実験が可能となり、これまでに無い詳細なスピン電子構造を観測できる基盤を築いた。

本研究ではこのVLEEDスピン検出器を増設し二台用いることにより高分解能で3次元スピンベクトル解析を可能とする新装置へと既存装置を改造することを目的とした。これによりこれまで不可能だったスピンベクトルの向きを3次元的に解析することが可能となり、従来の10倍の分解能で電子スピンのスピン偏極度のみならずスピンベクトルを決定できるようになる。この装置の導入により新規トポロジカル絶縁体などのスピン物性の解明など次世代のスピントロニクス材料のスピン電子状態研究を飛躍的に進歩させることを目的とした。

3. 研究の方法

我々の開発・改良したVLEEDスピン検出器を用いた高効率スピン分解光電子分光装置は、一台のスピン検出器でX方向とZ方向の二方向のスピン成分を観測することが可能である。この装置に、もう一台のVLEEDスピン検出器を設置することにより、Y方向のスピン成分を同時に観測可能にすることが可能である。2台のスピン検出器を同時に利用するため、スピン検出器に電子を導く電子レンズも1台増設した。また複数のスピン成分を同時に観測できるようにソフトウェアの改造やスピン検出用の磁化コイルの自動制御装置などの開発を行った。

4. 研究成果

装置の改造は順調に進み、H23年度中に装置設計を終了し、24年度に装置の製作、建設を行った。25年度には性能評価を行い、予定通りの性能を発揮することを確認した。その結果、本装置は世界的にみても最も効率が高く、エネルギーおよび角度分解能も高いスピン・角度分解光電子分光装置となった。この装置を用いてトポロジカル絶縁体やラッシュバスピンスピン分裂を示す新規物質の研究が格段に迅速かつ高精度で行えるようになり、新しい成果が次々と上がっている状態である。

また本装置は全国共同利用・共同研究拠点である広島大学放射光科学研究センターのビームラインに設置されており、国内外のユーザーにも開放されている。現在では欧米、アジアからも多くの研究者が利用申請を出すまでになっており、多くの国際共同研究に発展している。そしてその成果は論文や国内・国際会議などで発表されている。

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19件すべて査読付き)

1. "Photoelectron spin-polarization-control in the topological insulator Bi₂Se₃", Z.-H. Zhu, C. N. Veenstra, S. Zhdanovich, M. P. Schneider, T. Okuda, K. Miyamoto, S.-Y. Zhu, H. Namatame, M. Taniguchi, M. W. Haverkort, I. S. Elfimov, and A. Damascelli, Phys. Rev. Lett. 112, 076802 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.076802>
2. "Experimental Evidence of Hidden Topological Surface States at the Interface of PbBi₄Te₇", T. Okuda, T. Maegawa, M. Ye, K. Shirai, T. Warashina, K. Miyamoto, K. Kuroda, M. Arita, Z.S. Aliev, I. R. Amiraslanov, M. B. Mabanly, E. V. Chulkov, S. V. Ereemeev, A. Kimura, H. Namatame, and M. Taniguchi, Phys. Rev. Lett. 111, 206803 (2013). DOI:

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.206803>

3. "Spin and Angle-Resolved Photoemission of Strongly Spin-Orbit Coupled Systems", T. Okuda and A. Kimura, *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 021002, (2013). <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.021002>
4. "Observation of a highly spin-polarized topological surface state in GeBi₂Te₄", K. Okamoto, K. Kuroda, H. Miyahara, K. Miyamoto, T. Okuda, Z. S. Aliev, M. B. Badanly, I. R. Amiraslanov, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, D. A. Samorokov, T. V. Menshchikova, E. V. Chulkov, and A. Kimura, *Phys. Rev. B* 86, 195304 (2012). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.195304>
5. "Topological surface states with persistent high-spin polarization across the Dirac point in Bi₂Te₂Se and Bi₂Se₂Te", K. Miyamoto, A. Kimura, T. Okuda, H. Miyahara, K. Kuroda, H. Namatame, M. Taniguchi, S. V. Eremeev, T. V. Menshchikova, E. V. Chulkov, K. A. Koch, and O. E. Tereschenko, *Phys. Rev. Lett.* **109**,166802(2012). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.166802>
6. "Giant Rashba-type spin-splitting in bulk BiTeI", K. Ishizaka, M. S. Bahramy, H. Murakawa, M. Sakano, T. Shimojima, T. Sonobe, K. Koizumi, S. Shin, H. Miyahara, A. Kimura, K. Miyamoto, T. Okuda, H. Namatame, M. Taniguchi, R. Arita, N. Nagaosa, K. Kobayashi, Y. Murakami, R. Kumai, Y. Kaneko, Y. Onose, and Y. Tokura, *Nature Materials* 10, 521 (2011). doi:10.1038/nmat3051
7. "Efficient SPin REsolved SpectroScopy Observation (ESPRESSO) machine at Hiroshima Synchrotron Radiation Center", T. Okuda, K. Miyamoto, H. Miyahara, K. Kuroda, A. Kimura, H. Namatame, and M. Taniguchi, *Rev. Sci. Instrum.* 82, 103302 (2011). <http://dx.doi.org/10.1063/1.3648102>
8. その他12件

〔学会発表〕(計 72 件 うち招待講演 9 件)

1. (Invited) “スピン分解光電子分光を用い

たディラック電子系の研究” 宮本幸治、日本物理学会第 69 回年会、3 月 27-30 (2014) 東海大学湘南キャンパス。

2. (Invited) “スピン分解光電子分光を用いたディラック電子系の先駆的研究” 宮本幸治、第 27 回日本放射光学会年会、1 月 11-13 (2014) 広島国際会議場。
3. (Invited) "Exploring of Spin-polarized Surface States by Highly-Efficient Spin-Polarized Photoelectron Spectroscopy“ T. Okuda, The fall meeting of Korean Physical Society, 31stOctober, 2013, Changwon city, Korea
4. (Invited) “Ge 系トポロジカル絶縁体新物質・多層膜”、木村昭夫、日本物理学会 2013 年秋季大会、9 月 25-28 日(2013)、徳島大学
5. (Invited) “Observation of spin-polarized surface states induced by spin-orbit interaction by high-resolution spin-polarized photoelectron spectroscopy”, T. Okuda, International workshop on Strong correlations and angle-resolved photoemission spectroscopy (CORPES13), 29th Jul.-2nd Aug. Hamburg, Germany 2013.
6. (Invited) “Spin-resolved Photoemission”, T. Okuda, 7th Surface Nano-Science Workshop, Muju, Korea, 19-21st, Jan. (2011).
7. その他 招待講演 3 件、一般講演 6 3 件

〔図書〕(計 1 件)

1. 「問題と解説で学ぶ表面科学」日本表面科学会編、編集幹事：松井文彦、共立出版 (2013) 193 ページ

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
外界から保護されたスピン流を持つトポロ
ジカル絶縁体の発見
<http://www.hsrc.hiroshima-u.ac.jp/result/spin4.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥田 太一 (OKUDA TAICHI) 広島大学・
放射光科学研究センター・准教授

研究者番号：80313120

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

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

宮本 幸治 (MIYAMOTO KOJI) 広島大学・
放射光科学研究センター・助教

研究者番号：50508067