

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13506

研究課題名(和文)光励起電子のスピン軌道相互作用の直接観測：オプト・スピントロニクスの実現に向けて

研究課題名(英文)Direct observation of spin orbit interaction in photoexcited states

## 研究代表者

荒船 竜一 (ARAFUNE, Ryuchi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・独立研究者

研究者番号：50360483

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：スピン軌道相互作用(SOI)は電子の相対論的効果が顕著な形で現れるそうごさようであり、近年新しい量子相として注目されているトポロジカル物性の根幹である。光によるスピンの観測・制御はその制御性の高さから有望な技術であり、SOIと光学応答を組み合わせる革新的技術を開発させるために光励起電子のバンド構造におけるSOIの影響を直接測定する技術を構築することは極めて重要である。本研究では非占有準位のバンド構造を高分解能で決定出来る手法として知られる2光子光電子分光に円二色性測定をくみあわせることによって、光励起状態のSOIの影響を直接観測する手法、円偏光励起2光子光電子分光を開発した。

研究成果の概要(英文)：We have explored the band splitting and spin-texture of the image potential state (IPS) on Au(001) derived from the Rashba-type spin-orbit interaction (SOI) by using angle-resolved bichromatic two-photon photoemission (2PPE) spectroscopy in combination with circular dichroism (CD). The Rashba parameter for the first ( $n=1$ ) IPS is determined to be , which is consistent with the spin polarized band structure calculated from the embedded Green's function technique for semi-infinite crystals. The present results demonstrate that bichromatic CD-2PPE spectroscopy is powerful for mapping the spin-polarized unoccupied band structures originating from SOIs in various classes of condensed matter.

研究分野：表面物性

キーワード：スピン軌道相互作用 鏡像準位 2光子光電子分光

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用(SOI)は電子の相対論的效果が顕著な形で現われる相互作用であり、近年新しい量子相として注目されているトポロジカル物性やマルチフェロイック物性の根幹をなす。マルチフェロイック物性では特異な電気磁気効果に由来する光学応答が現われる。スピントロニクス分野においても円偏光誘起異常ホール効果による純スピンの生成や光励起によるスピン圧の発生、トポロジカル絶縁体表面における光励起電子のスピン方向の制御などが可能となっている。しかしシステムティックなコントロールのための理解はいまだ不十分であり、そのためには光励起電子のバンド構造におけるSOIの影響に関する知見は不可欠である。しかしながら、スピン分解逆光電子分光などエネルギー分解能の低い手法があるのみで、高分解能が実現可能な手法が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、**非占有状態におけるSOI由来のスピン偏極電子バンドを直接観測することである。**具体的には狭帯域レーザーを用い円偏光(CPL)励起による高エネルギー分解能2光子光電子分光法(円偏光励起高分解能2光子光電子分光:CPL-HR2PPE)を開発する。図1にCPL-HR2PPEのエネルギーダイアグラムを示す。

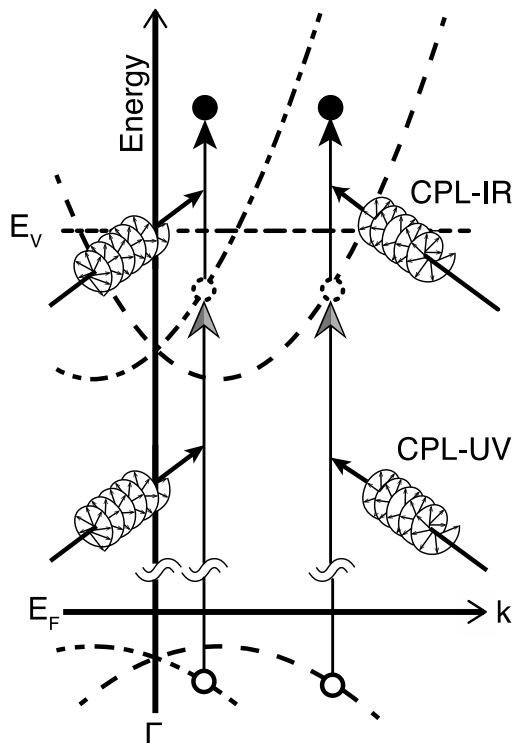


図1: 円偏光励起高分解能2光子光電子分光のエネルギーダイアグラム。バンドにおける点線のスタイルの違いはそのバンドを締める電子のスピンキャラクターが異なっていることを意味している。円偏光のヘリシティ

に応じて励起される電子のスピンが異なる。

3. 研究の方法

CPL-HR2PPEによるSOI由来のスピン分解したバンド測定の原理はシンプルである(図1参照)。紫外(UV)レーザー・パルスによって電子が占有準位から非占有準位に励起される。励起準位におけるSOIに応じてそのバンドのスピン縮退が解けているとその励起バンドはスピン偏極した電子で締められていることになる。このスピン偏極した電子を赤外(IR)パルスで励起し光電子として真空中へ放出させる。この赤外パルス光を円偏光にすることによってスピン選択励起を行い光励起状態のスピン状態の情報を得る。

4. 研究成果

まず、所有している光電子分光システムの超高真空マニピュレータの改造を行った。これは、SOI由来のバンド分裂の波数空間の2次元マッピングを実現するために必要である。波数空間の2次元マッピングは本研究で本質的に重要である。スピン選択励起される電子のスピン方向は励起光の波数ベクトル、偏波面のヘリシティで決まる。光電子分光で電子の波数ベクトルは放出方向・角度から求められるので、光電子放出角を入射面内だけでなく、それと垂直方向にも振って測定する必要がある。このために、試料を図2に示す回転ができるようにマニピュレータの改造を行なった。

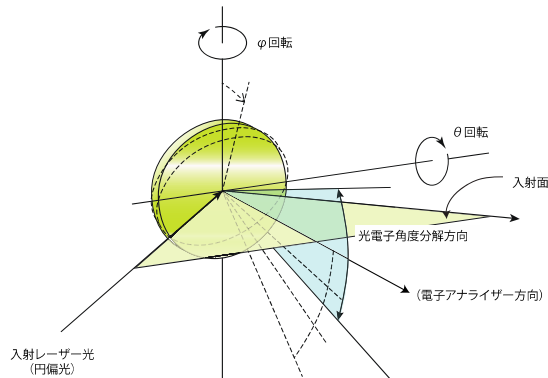


図2 光の入射方向、入射面と光電子の検出角度の関係。

光励起電子バンドのSOIが観測された報告はいはなく、確立されたモデル試料といったものはない。しかし、Au(001)はそのモデル試料として有力であると考えられる。Au(001)表面にはShockley表面状態と同様の起源を持つ鏡像準位状態が非占有準位にある。Au(111)面のShockley表面状態は占有準位に現われRashba効果による大きなバンド分裂が起きていることが知られている。鏡像準位の電子バンドも同様にRashba効果によるバンド分裂が起こるという理論予測があった。構築したシステムを用いて、非占有準位の電子SOI由来の電子バンドの直接観測を行った。

図3に波数  $k=-0.162 \text{ \AA}^{-1}$  と  $k=0 \text{ \AA}^{-1}$  に対応する円偏光励起2光子光電子スペクトルを示す。

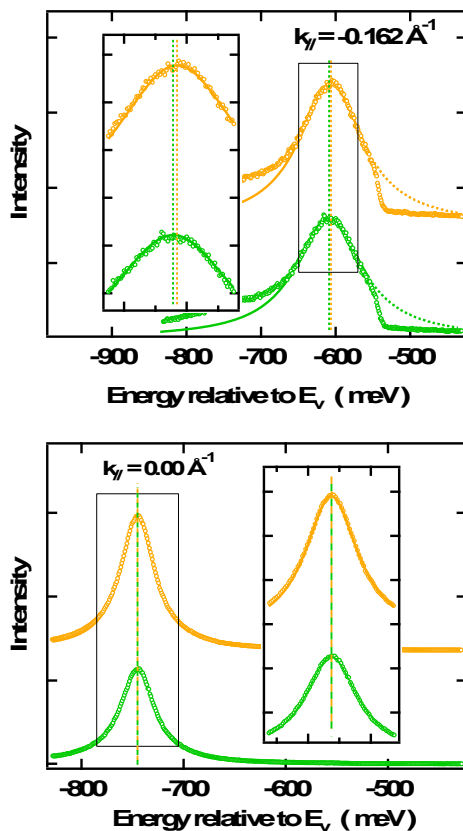


図3 : Au(001)の2光子光電子スペクトル。上段が  $k=0.162 \text{ \AA}^{-1}$  に対応するスペクトル下段が  $k=0 \text{ \AA}^{-1}$  に対応するスペクトルである。オレンジのスペクトルが右円偏光励起のスペクトルであり緑のスペクトルが左円偏光励起のスペクトルである。上段のスペクトルには励起円偏光のヘリシティに依存したピークの違いが現れるのに対して、下段のスペクトルではその違いが現れない。

図3で分かるように点では円偏光のヘリシティに対してスペクトルは変化しない一方で、それ以外の点ではスペクトルのピーク位置に差が現れる。このスペクトル差を円二色差と呼ぶ。

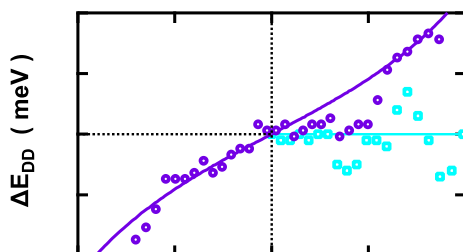


図4 : 円二色差の波数依存性。紫と水色のデータでは光の入射面と光電子射出面の関係がことなる。紫: 光の入射面 // 光電子検出面、水色: 光の入射面 ⊥ 光電子検出面

図4に円二色差の波数依存性を示す。波数  $k$  の絶対値が大きくなるに従って円二色差が大きくなる事が分かる。さらに、入射面と光電子検出面を並行にして同様の実験結果を行うと、この円二色差は現れなかった。これらの結果は非占有準位に Rashba 型の SOI によるバンド分裂が起きていることを意味している。得られた円二色差の波数依存性から Rashba パラメータ  $\alpha$  を  $\alpha = 48 \text{ meV \AA}^{-1}$  と決定できた。本研究は鏡像準位における SOI の観測および Rashba パラメータを決定した初めてのものである。

### 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3件)

1. N. Kawakami, C. L. Lin, M. Kawai, R. Arafune and N. Takagi, "One-dimensional edge state of Bi thin film grown on Si(111)" Appl. Phys. Lett., **107**, 031602 (2015). 査読有り

2. K. Kawahara, R. Arafune, M. Kawai, and N. Takagi, "Pragmatic Application of Abstract Algebra to Two dimensional Lattice Matching", e-J. Surf. Sci. Nanotech., **13**, 361 (2015). 査読有り

3. N. Takagi, C. L. Lin, K. Kawahara, E. Minamitani, N. Tsukahara, M. Kawai, R. Arafune, "Silicene on Ag(111): Geometric and electronic structures of a new honeycomb material of Si" Prog. Surf. Sci. **90**, 1 (2015). 査読有り

[学会発表](計3件)

1. R. Arafune, "Spin-orbit interaction in photoexcited state on Au(001): Circular dichroism in high resolution two-photon photoemission spectroscopy", Symposium on Surface and Nano Science, 2016年1月13日(北海道・富良野)

2. T. Nakazawa, R. Arafune, M. Kawai, and N. Takagi, "High-energy resolved two photon photoemission study of elastic scatterings in image potential state of Cu(001)", Atomic Level Characterization 2015, 2015年10月25日(島根県・松江市)

3. T. Nakazawa, R. Arafune, N. Takagi, and M. Kawai, "Rashba splitting in image potential state of Au(001) investigated by high energy-resolution circular dichroism two-photon photoemission spectroscopy", European Conference on Surface Science, 2015年8月31日(スペイン・バルセロナ)

[図書](計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況（計 0件）

〔その他〕  
ホームページ等  
[http://samurai.nims.go.jp/ARAFUNE\\_Ryuichi-j.html](http://samurai.nims.go.jp/ARAFUNE_Ryuichi-j.html)

6. 研究組織

(1)研究代表者  
荒船 竜一 ( Ryuichi  
ARAFUNE )  
国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点・独立  
研究者

研究者番号：50360483

(2)研究分担者  
なし ( )

研究者番号：

(3)連携研究者 ( )  
なし