

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01954

研究課題名(和文) スピン角度分解光電子分光で探るレーザー光による光誘起スピン電流の電子スピン制御

研究課題名(英文) Electron spin control of photo-induced spin current probed by spin-ARPES using laser source

研究代表者

宮本 幸治 (Koji, Miyamoto)

広島大学・放射光科学研究センター・准教授

研究者番号：50508067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光励起で生成される正孔(光誘起スピン偏極電気伝導の源)と光電子の一对一对応に着目し、これまで明らかとなっていない光の入射角・偏光依存性によるスピン偏極電流のスピン方位・偏極度を、スピン分解光電子分光法を用いて明らかにすることを目的としている。極低温で且つ光誘起された電気伝導およびスピン分解光電子分光を同時測定できる装置を開発した。レーザーの修理が必要なが海外メーカーのため修理対応などがコロナの影響で行えず、最終的な結果を得ることは困難であった。別の角度で、放射光光源を用いて光励起エネルギーと誘起される光電子の関係について研究を行い新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、膨大な情報のやり取りを可能にするために、今後必要不可欠となる光とスピントロニクス物質の相互作用についての研究である。特に、誘起されるスピン電流のスピン方位及び偏極度の大きさのコントロールが可能になれば、光輸送による情報量の取得に大きなアドバンテージを設けることができ、取得できる情報量を増大させることも可能であるため、その波及効果や社会的意義は大きい。一方、極低温で且つ電気伝導やスピン電子構造を観測できる装置は世界的に見ても無く、別研究での需要も見込めるため基礎研究の観点でも波及効果は大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is spin control and spin polarization of photo-induced spin polarized current in relation with the incident angle and polarization dependence of light. The purpose is to clarify the spin direction and polarization of polar currents using spin-resolved photoelectron spectroscopy, from the one-to-one correspondence between photoelectrons and holes (source of photo-induced spin polarization current) generated by photoexcitation. We have developed a device that can simultaneously measure photoinduced current and spin-resolved photoelectron spectroscopy with extremely low temperatures. Although it was necessary to repair the laser, it was difficult to obtain the final result because it was not possible to repair it due to the influence of the corona virus because it was an overseas manufacturer. However, we studied the relationship between photoexcitation energy and induced photoelectrons using a synchrotron radiation source, and obtained new findings.

研究分野：表面・固体電子構造

キーワード：スピントロニクス スピン軌道相互作用 光スピン電流 スピン分解光電子分光

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、エレクトロニクス及びマグネトロニクスに変わる新技術として研究および実用化が進んできている。これらの基本技術として、スピン生成、スピン制御、スピン検出の確立が必須である。これまで実用化されたものは不揮発性メモリーや TMR 素子を用いた高密度記憶媒体といった情報保存の分野に特化している。また、大容量の情報を特定の場所から高速で移動できる光通信技術の需要も高まっている。そのため、光通信デバイスとして、光を利用したスピントロニクス技術であるオプトスピントロニクスが注目を集めている。

半導体・絶縁体中に真空紫外以上のエネルギーをもつ光を照射すると、その光で励起された価電子帯の正孔により、その物質中の電気伝導は上昇する。これを光電気伝導という。さらに、空間反転対称性が破れ、スピン軌道相互作用の強い物質(トポロジカル絶縁体、ラシュバ物質など)では、スピンに依存した遷移確率強度の違いからスピン偏極した光電気伝導が生じる

そのため、光電気伝導に関して、実験的に光の入射方向・偏光性とスピン方向の関係性、さらに、そのメカニズムを解明することはオプトスピントロニクスの分野で最重要課題の一つである。

これまでの研究では、GaAs 等の空間反転対称性の破れた半導体を用いて光誘起によって発生したスピン電気伝導のスピン依存性を感知するために磁性体を接合する、もしくは、自然発光の円偏光度から間接的にキャリアーのスピン方向を予測していた。しかし、磁性体接合の方法では、磁性体の磁区方向に沿ったスピン方向しか分離観測できない。さらに、発光の円偏光度の方法では生成した光の進行方向に平行なスピンしか区別する事ができず、これまでの方法では、スピン方位およびスピン偏極度の完全決定にはいたらなかった。それゆえ、**光スピン制御における最重要課題である光の入射方向・偏光性とスピン方向の関係性を明確にできていない。**

2. 研究の目的

トポロジカル絶縁体やラシュバ物質に対して、"光の入射角・偏光依存したスピン偏極正孔のスピン方位を完全決定"し、光を利用してスピンを制御する基礎的なメカニズムを実験的に明らかにすることである。

3. 研究の方法

しかし、本研究の目的の最重要課題である光によって生成された正孔のスピン方位の完全決定は、既存の方法では困難である。そこで、**光励起によって生成される正孔ではなく、これまで注目されてこなかった励起された光電子に注目した。**

光励起によって生成される正孔は、同時に生成される光電子のスピン情報および運動量分布と一対一対応している。従って、光電子のスピン方位・スピン偏極度を観測する事で光励起時の正孔のスピン方位・スピン偏極度を決定できる。

実は、このような光電子のスピンを完全決定できる有力な手法がある。それが、スピン分解光電子分光測定である。申請者を含めこれまで、この手法は磁性体などに代表される固体中の電子の始状態(光励起前の状態)における電子スピン構造を調べるために用いられてきた。

残念ながら、従来のスピン角度分解光電子分光装置(SARPES 装置)は、スピン検出の感度が悪く微弱な信号を捉える必要があった。そのため、精密な測定が必要なスピン方位の決定には不向きであった。

申請者は、これまで困難であった SARPES 装置の高効率化に成功し、従来の装置(エネルギー分解能 70meV, 角度分解能 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$)の 100 倍の性能をもつ世界最高性能(エネルギー分解能 5meV, 角度分解能 0.3°)の SARPES 装置の開発に成功した。本研究は我々が開発した高効率 3D-SARPES 装置に光の入射極角を変更できる改造と 6 軸の高性能マニピュレーターなど導入および、偏光板により様々な光の偏光を容易に作り出せる 6eV 極真空紫外レーザー光源(広島大学既存)と組み合わせ研究を行った。

4. 研究成果

6K 以下でかつ電気伝導を測定可能な高性能 6 軸マニピュレーターを開発・導入した。また、

既存のレーザー・スピン角度分解光電子分光装置と組み合わせ、様々な光の入射角での光電子スピン観測実験を可能にした。高精度マニピュレーターを導入し、レーザー光源を用いて PbBiTeS 系のトポロジカル物質の角度分解光電子分光測定を行った。本物質は、5層7層が交互に席そうした構造を示し、表面に5層のものが7層のものがくるかという2つの可能性がある。これらの再表面がどの層かによって、トポロジカル表面状態のエネルギー位置がことなることが理論的に予想されていた。図1に、本研究の結果の一部を示す。高精度マニピュレーターの導入およびレーザー光源を集光限界まで集光することで、数10 μm の試料位置の変更を可能にし、微小ドメインを狙い撃ちできるようになったため、図1(a)に示すような試料の位置による電子構造の違いを捉えることに成功した。位置Aの電子構造と位置Bのd年思考像は明らかに異なっている。特に表面電子構造にあたる波数0 $^{-1}$ の結合エネルギー0.6eV付近では、トポロジカル表面状態の結合エネルギーが約100meV程度の差があることが分かった。また、放射光を用いてスピン角度分解光電子分光測定を行い、励起光依存性によって2つのディラック電子系で光電子強度が変化していることを突き止めた。これらの結果をまとめて論文[Physical Review Materials 2, 104201]を創出した。

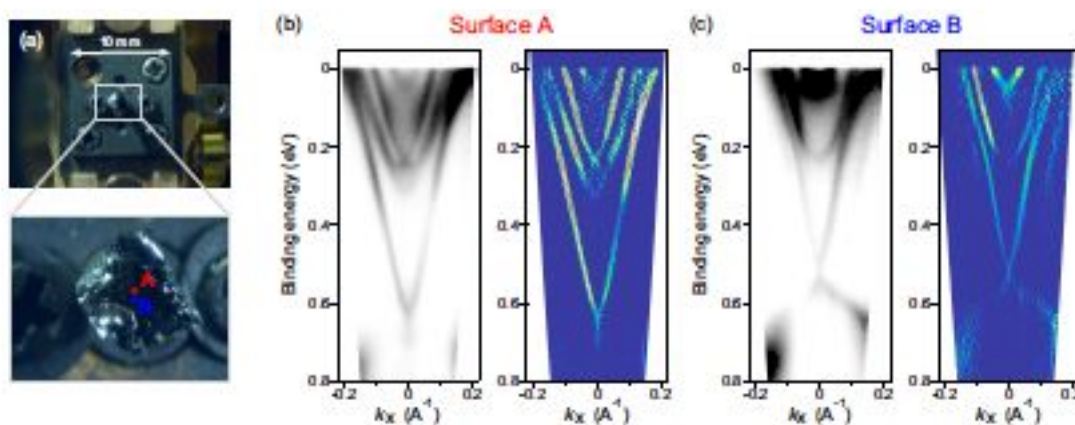


図1 (a)測定試料の写真. A,B は測定した試料位置を示している。(b)測定点 A での電子バンド構造。(c)測定点 B での電子バンド構造。

一方で、マニピュレーター導入後にレーザー(海外社製)が非常に不安定でたびたび故障に見回れた。さらに、コロナ禍の状況と相まって、海外から出張にきてもらう修理などができない状況が続き、当初の計画通りすまなかった。また、2019年に、最初に導入した高性能6軸マニピュレーターの低温測定のテスト時に、温度変化による真空リークがあることが分かり、急遽、再作成などで半年以上の時間をようしたが、その年度の最終末にスピン分解光電子分光測定が行える環境を整えた。

レーザーの不安定性から、2020年には当初の予定の計画を変更し、放射光光源を用いた励起光エネルギー依存性による研究に切り替えた。その結果、トポロジカル絶縁体 PbBiTeS にある2つのスピン偏極ディラック電子状態で異なる光のエネルギー変化に依存した明確な光電子強度の振る舞いを観測することに正格子、これは、Bi 内殻励起を伴う共鳴による光電子強度の増大のためであることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sumida Kazuki, Sakuraba Yuya, Masuda Keisuke, Kono Takashi, Kakoki Masaaki, Goto Kazuki, Zhou Weinan, Miyamoto Koji, Miura Yoshio, Okuda Taichi, Kimura Akio	4. 巻 1
2. 論文標題 Spin-polarized Weyl cones and giant anomalous Nernst effect in ferromagnetic Heusler films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 1/9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43246-020-00088-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Imai Takehito, Chen Jiahua, Kato Kazuki, Kuroda Kenta, Matsuda Teruo, Kimura Akio, Miyamoto Koji, Ereemeev Sergey V., Okuda Taichi	4. 巻 102
2. 論文標題 Experimental verification of a temperature-induced topological phase transition in TlBiS ₂ and TlBiSe ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125151
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.102.125151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Sumida, T. Natsumeda, K. Miyamoto, I. V. Silkin, K. Kuroda, K. Shirai, S. Zhu, K. Taguchi, M. Arita, J. Fujii, A. Varykhalov, O. Rader, V. A. Golyashov, K. A. Kokh, O. E. Tereshchenko, E. V. Chulkov, T. Okuda, and A. Kimura	4. 巻 2
2. 論文標題 Enhanced surface state protection and band gap in the topological insulator PbBi ₄ Te ₄ S ₃	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 104201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.2.104201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 K. Miyamoto, H. Wortelen, T. Okuda, J. Henk and M. Donath	4. 巻 8
2. 論文標題 Circular-polarized-light-induced spin polarization characterized for the Dirac-cone surface state at W(110) with C _{2v} symmetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10440
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-018-28693-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Juergen Henk, Koji Miyamoto, and Markus Donath	4. 巻 98
2. 論文標題 Retrieving the initial-state spin polarization from spin-resolved photoemission: Proposal for a case study on W(110)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.045124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------