

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887024

研究課題名(和文) スピン偏極表面電子状態を用いた新奇スピンフィルタ材料の探索

研究課題名(英文) Search for novel electron spin filter using spin-polarized surface states

研究代表者

大坪 嘉之(OHTSUBO, Yoshiyuki)

大阪大学・生命機能研究科・助教

研究者番号：70735589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：電子の電荷・スピンの両性質を用いるスピントロニクス技術の応用例の1つである電子線スピンフィルタ機能に着目し、(1)未知物質の電子線スピンフィルタ機能の測定方法の確立と、(2)高効率・長寿命な新奇電子線スピンフィルタ候補物質の探索の2点を目的として研究を行った。スピンフィルタ機能の測定方法に関しては、通常の電子銃とMott型のスピン検出器の組み合わせを用い、未知物質の電子線スピン反射率を測定できることを示した。またBi被覆InSb(001)基板において複数種類の1次元的な未知の表面原子構造を作製した。得られた新表面構造の今後のスピントロニクス分野への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We are interested in the spin-filtering functionality of electron beam, which is a typical example of spintronics application using both of two character of electrons (charge and spin). For this study, we have (i) established the experimental method how to observe the spin-filtering functionality of electron beam and (ii) searched for the novel candidate of such electron-beam spin filter with high efficiency and long lifetime. We used a conventional electron gun and Mott-type spin detector and demonstrated that the combination of these components can directly detect the spin-selective electron scattering. We also found some new surface atomic structures on the InSb(001) surface covered with Bi, showing one-dimensional (1D) surface atomic structure. One of the 1D Bi/InSb(001) surface holds the surface state with large spin polarization and its possible application to future spintronics is expected.

研究分野：数物系科学

キーワード：スピントロニクス 表面電子状態 電子線スピンフィルタ

1. 研究開始当初の背景

当時から現在に至るまで、電子の電荷・スピンの両性質を用いるスピントロニクス技術への応用や、トポロジカル物質の結晶端に現れる有効質量0のスピンの偏極電子状態などの研究が盛んに行われており、実験・理論計算の両面から、多くのスピン偏極表面電子状態が発見・提案されている。

上記のようなスピン偏極電子状態の応用例の一つが、電子線スピントロニクス技術である。これは標的に入射した電子線の反射率あるいは散乱断面積のスピン依存性を利用し、特定方向にスピン偏極した電子を選択的に反射・散乱させる機構である。この性質を用いてスピン偏極電子線を作製、あるいは入射電子線のスピン偏極度を測定することができる。当時実用化されているスピントロニクスとしてはスピン軌道相互作用(SOI)を用いるMott型、SPLEED型、強磁性標的を用いるVLEED型等が存在し、スピン・角度分解光電子分光(SARPES)装置のスピン検出器などに用いられていたが、その動作機構は30年以上前に確立されたものから大きく変わってはいなかった。特に数〜数十電子ボルト(eV)の比較的低速な電子線に対して機能するVLEED、SPLEED型のスピンフィルタにおいては、このエネルギーの電子の物質中での平均自由行程が最大でも数nm程度であることから、表面近傍の電子状態が極めて重要であると考えられるが、そのような表面状態のスピン偏極を積極的に用いたスピントロニクス標的は発見されていなかった。

このような状況において、研究代表者等はTi/Ge(111)表面においてSOIと波数空間における時間反転対称性の破れに起因するスピン偏極非占有表面電子状態を発見した。この表面状態は波数に依存してその偏極度を変えるため、標的結晶の方位角を回転させるだけでフィルタリングされる電子スピンを選択可能であると考えられる。また、研究代表者等はBi単結晶(111)面の非占有状態にもスピン偏極し、かつ波数に依存してその方向が変化する表面電子状態を発見しており、この物質でもスピントロニクス機能発現の可能性があると考えた。理論計算によれば、ここで述べた表面状態のスピン偏極度はどちらも100%に近く、従来よりも高偏極度で高効率なスピントロニクスとなる可能性がある。これらの、これまで利用されていない新しいスピン偏極表面電子状態を用いることで、より高効率・高偏極度の電子線スピントロニクスを実現可能であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非占有スピン偏極表面状態による電子線スピントロニクス機能の有無とその起源について明らかにするため、候補物質としてBi(111)表面を作製し、その電子線反射率の入射電子線スピン依存性(スピン反射率)を測定することである。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、当初は具体的には、以下の2つの手順を平行して研究を行う計画であった。

(1) 電子線スピン反射率測定装置を開発する。標準試料にVLEED型スピントロニクス標的として広く用いられているO/Fe(001)を採用し、2重散乱機構による未知試料のスピン反射率の測定を目指す。O/Fe(001)標的は超高真空中でエピタキシャル成長により作製し、基板・作製条件等を変えてスピントロニクス機能の最適化を行う。作製した標的のスピンフィルタ機能については、分子科学研究所UVSORで建設中のSARPES装置に付設するVLEED型スピン検出器の標的として実際にSARPES実験に使用し、評価する。これを標準試料として装置の開発・較正を行い、未知試料に適用できるようにする。装置が完成したならば、まずは第一の新奇スピントロニクス候補物質であるBi(111)表面について電子線スピン反射率測定実験を行う。

(2) 並行して新奇スピントロニクス候補物質の探索を行う。強いSOIを持つBiやSn等の第5・第6周期元素により形成される表面原子構造に注目し、スピントロニクスとして利用可能な大きなスピン偏極度と電子状態のスピン分裂幅を持つ電子状態の実現を目指す。また、必要ならば既知の電子状態に基づいたシミュレーションと実験結果を比較し、詳細なスピン散乱機構について検討する。Bi薄膜等の膜厚によりスピン偏極度が変化する物質については、数〜数十原子層程度の薄膜の場合も調査し、「裏側」の基板・薄膜界面電子状態の影響についても調査する。このような計算機実験の過程でスピントロニクス機能を制御するパラメータが発見できたならば、その仮説に基づいてより高機能(高スピン反射率・高輝度・長寿命)化を目指して物質探索・表面構造デザインを行う。

しかしながら、予算の不足から(1)で計画したスピン反射率測定装置の開発が困難であることが明らかになった。そこで当初計画を変更し、共同利用研究機関(仏国Synchrotron SOLEIL)に設置されたMott型スピン検出器と熱励起型電子銃を利用し、Bi(111)表面等の試料に照射して反射された電子のスピン偏極度を測定する方法に変更した。

4. 研究成果

(1) 電子線スピン反射率測定

図1に標準試料であるO/Fe(001)標的を用いた反射電子線のスピン偏極度スペクトルを示す。使用した電子銃の制約から入射エネルギーは200 eVに固定した。さらに、O/Fe(001)標的の既知のスピン偏極非占有電子状態を利用するため、標的に188 eVの電場を印加することで入射電子を減速した。入射電子は標的による反射後に同電場により加速されて入射当初と同程度のエネルギーに

復帰するはずであるが、図 1 に示す反射電子スペクトルは 200 eV 周辺にピークを持っており、確かに標的により弾性散乱した電子を検出できていることがわかる。

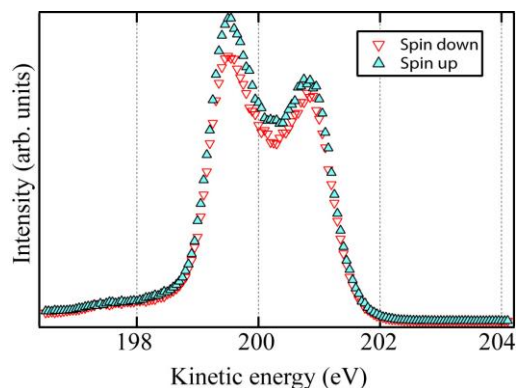


図 1 O/Fe(001)標的により反射された電子線のスピ分解スペクトル

反射電子線の互いに反平行な 2 方向のスピ成分を図 1 に 2 種類のマーカーで示した。入射電子線は明らかにスピ偏極していないため、得られたスピ偏極度は O/Fe(001)標的の既知のスピ偏極非占有電子状態に由来するものであると考えられる。また、図には示していないが、O/Fe(001)標的の磁化方向を反転させることで得られる反射電子線のスピ偏極度が反転することも確認した。以上の結果から、本実験セットアップにより電子線スピフィルタ機能の測定が可能であることを実証した。

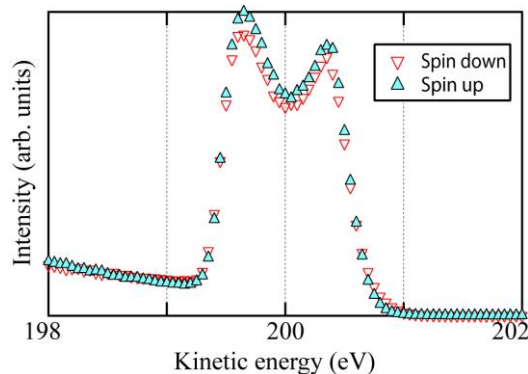


図 2 Bi(111)薄膜清浄面により反射された電子線のスピ分解スペクトル

図 2 は同様の手段で測定した Bi(111)薄膜清浄面による反射電子スペクトルのスピ偏極度である。本試料は非磁性体であるため、得られた反射電子線のスピ偏極度は表面近傍のスピ偏極非占有状態が何らかの形でスピ偏極していることを示している。

以上の一連の実験により、反射電子線のスピ偏極度を直接観測することで、新奇スピフィルタ候補物質のスピフィルタ機能を直接観測できることが示された。

(2) 新スピフィルタ候補物質として、基板清浄面に異方性を持つ III-V 族半導体 InSb(001)上に Bi 及び Sn を含む表面原子構造の形成を試みた。

Bi/InSb(001)表面においては、基板の異方性を反映した(1×3)周期の 1 次元的表面原子構造を作成することに成功した。重元素である Bi を含むために表面電子状態の大きなスピ偏極が期待されたが、得られた表面状態のスピ偏極はほぼ無視できるほど小さかった。しかしながら、得られた表面電子状態はその表面原子構造を反映した 1 次元的なかつ金属的な特徴を示し、これまで殆ど観測例のなかった表面原子構造における朝永・ラッティンジャー液体が実現していることが明らかになった。この成果は当初の研究計画では予定しないものであったが、発表論文(3)として既に Physical Review Letters 誌で出版されている。

一方、InSb(001)基板上的 Bi 薄膜の膜厚をさらに増やしていくと、また別の表面 1 次元構造が現れることも明らかにした。この 1 次元 Bi 薄膜においては大きなスピ分裂幅を持つスピ偏極表面電子状態がフェルミ準位近傍に観測されており、スピフィルタ候補物質としてのみならず、その他様々なスピントロニクス分野への応用可能性のある表面物質として、現在研究を継続している。

以上のように、本研究において新奇スピフィルタ候補物質の機能性測定方法を確立するとともに、有望な候補物質を発見・作製することにも成功した。今後は特に今回発見した Bi/InSb(001)表面のスピ偏極電子状態に着目し、スピフィルタ機能のみならず様々な機能性の発現可能性を視野にさらなる研究を進める予定である。

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 7 件)

(1) J.-C. Rojas-Sánchez, S. Oyarzún, Y. Fu, A. Marty, C. Vergnaud, S. Gambarelli, L. Vila, M. Jamet, Y. Ohtsubo, A. Taleb-Ibrahimi, P. Le Fèvre, F. Bertran, N. Reyren, J.-M. George, A. Fert

“Spin to Charge Conversion at Room Temperature by Spin Pumping into a New Type of Topological Insulator: α -Sn Films”, Physical Review Letters 誌 vol. 116 (2016), 096602 (doi: 10.1103/PhysRevLett.116.096602) 査読有

(2) N.H. Azhan, K. Okimura, Y. Ohtsubo, S.-i. Kimura, M. Zaghrioui, J. Sakai

“Large modification in insulator-metal transition of VO₂ films grown on Al₂O₃(001) by high energy ion irradiation in biased reactive sputtering”, Journal of Applied Physics 誌 vol.

119 (2016), 055308 (doi: 10.1063/1.4941348) 査読有

(3) Yoshiyuki Ohtsubo, Jun-ichiro Kishi, Kenta Hagiwara, Patrick Le Fèvre, François Bertran, Amina Taleb-Ibrahimi, Hiroyuki Yamane, Shin-ichiro Ideta, Masaharu Matsunami, Kiyohisa Tanaka, Shin-ichi Kimura
“Surface Tomonaga-Luttinger Liquid State on Bi/InSb(001)”, Physical Review Letters 誌 vol.115 (2015), 256404 (doi: 10.1103/PhysRevLett.115.256404) 査読有

(4) Lewis Bawden, Jonathan M Riley, Choong H Kim, Raman Sankar, Eric J Monkman, Daniel E Shai, Haofei I Wei, Edward B Lochocki, Justin W Wells, Worawat Meevasana, Timur K Kim, Moritz Hoesch, Yoshiyuki Ohtsubo, Patrick Le Fèvre, Craig J Fennie, Kyle M Shen, Fangcheng Chou, Phil DC King
“Hierarchical spin-orbital polarization of a giant Rashba system”, Science Advances 誌 vol. 1, 2015, e1500495 (doi: 10.1126/sciadv.1500495) 査読有

(5) Madhab Neupane, Su-Yang Xu, R Sankar, Q Gibson, YJ Wang, I Belopolski, N Alidoust, G Bian, PP Shibayev, DS Sanchez, Y Ohtsubo, A Taleb-Ibrahimi, S Basak, W-F Tsai, H Lin, Tomasz Durakiewicz, RJ Cava, A Bansil, FC Chou, M Zahid Hasan
“Topological Phase diagram and saddle point singularity in a tunable topological crystalline insulator”, Physical Review B 誌 vol. 92, 2015, 075131 (doi: 10.1103/PhysRevB.92.075131) 査読有

(6) L Perfetti, Jérôme Faure, E Papalazarou, J Mauchain, M Marsi, MO Goerbig, A Taleb-Ibrahimi, Y Ohtsubo
“New aspects of electronic excitations at the bismuth surface: Topology, thermalization and coupling to coherent phonons”, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 誌 vol. 201, 2015, 60, (doi:10.1016/j.elspec.2014.12.004) 査読有

(7) Koichiro Yaji, Yoshiyuki Ohtsubo, Shinichiro Hatta, Hiroshi Okuyama, Ryu Yukawa, Iwao Matsuda, Patrick Le Fèvre, François Bertran, Amina Taleb-Ibrahimi, Akito Kakizaki, Tetsuya Aruga
“Experimental evidence for two-dimensional states localized in subsurface region of Ge(111)”, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 誌 vol. 201, 2015, 92 (doi: 10.1016/j.elspec.2014.09.005) 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) Yoshiyuki Ohtsubo, J. Kishi, K. Hagiwara, Patrick Le Fevre, Francois Bertran, Amina Taleb-Ibrahimi, H. Yamane, S. Ideta, M. Matsunami, K. Tanaka and S. Kimura
“Surface Tomonaga-Luttinger Liquid on Bi/InSb(001)”, International Conference of the Formation of Semiconductor Interfaces (ICFSI-15), 2015/11/19, 広島国際会議場 (広島県・広島市)

(2) 大坪嘉之, 岸潤一郎, 萩原健太, Patrick Le Fevre, Francois Bertran, Amina Taleb-Ibrahimi, 松波雅治, 田中清尚, 木村真一
「Bi/InSb(001)-c(2×6)表面における 1 次元金属的電子状態」日本物理学会, 2015/09/16, 関西大学千里山キャンパス (大阪府・吹田市)

(3) Yoshiyuki Ohtsubo
“Surface states of elemental topological materials: alpha tin and bismuth”, Spin-Orbit Coupling in Surface or Interface States (SOCSIS2015), 2015/06/11, Spetses (ギリシア)

(4) 大坪嘉之, Luca Perfetti, Mark Oliver Goerbig, Patrick Le Fevre, Francois Bertran, and Amina Taleb-Ibrahimi
「Bi 単結晶のトポロジカル表面状態」日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2015/01/11, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス (滋賀県・草津市)

(5) 大坪嘉之
「単元素トポロジカル物質の表面電子状態」日本物理学会, 2014/09/08, 中部大学春日井キャンパス (愛知県・春日井市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大坪 嘉之 (OHTSUBO, Yoshiyuki)
大阪大学・大学院生命機能研究科・助教
研究者番号: 70735589