

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分  
平成31年3月16日現在

半導体スピントロニクス  
Semiconductor Spin-currentronics

課題番号：16H06330

白石 誠司 (Shiraishi, Masashi)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

広く俯瞰的に再定義した「半導体」材料群におけるスピントロニクス伝搬を実現し、その伝搬物性・緩和物性の基礎学理を理解することで金属スピントロニクスに比べてやや立ち遅れている半導体スピントロニクスにおいて確固たる学理の構築と、応用展開可能な素子創出のための学術的指針を得ることを目的とする。

研究分野：総理工

キーワード：スピントロニクス・半導体・スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

固体を流れるスピントロニクス（純スピン流＝電荷の流れを伴わないスピン角運動量の流れ、とスピン偏極電流の総称）は、基礎物理・応用物理の両面で大きな関心が集まり、世界的な研究競争が行われている。電子のうち1つの属性である電荷が保存量であるのに対し、スピンは非保存量でありスピン拡散長という距離スケールで消失するため、これまで固体中の純スピン流の物性理解のために十分なスピン流を生成できなかったが、近年のナノテクノロジーに発展により、スピン拡散長以下の距離スケールを有する微細素子が作製できるようになり、人類はスピントロニクスを効率的に生成してその物性を精査することが可能となったことが背景にある。当初、非磁性金属中のスピントロニクス物性の研究が先行したが、近年、シリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)、ガリウムヒ素(GaAs)、更にグラフェンなどの分子性半導体（ゼロギャップ半導体を含む）などの半導体中に室温でスピントロニクスが生成・伝播できるようになり、この分野の研究競争が激化している。

2. 研究の目的

無機半導体、ワイドギャップ酸化物や化合物半導体ヘテロ界面で形成される2次元電子系、原子膜半導体、スピン縮退の解けたゼロギャップ線形バンドを持つトポロジカル絶縁体などを広く俯瞰的に「半導体」材料群と再定義し、それらの「半導体」におけるスピントロニクス伝搬の実現と、その伝搬物性・緩和物性の基礎学理の理解を通じて、金属スピントロニクスに比べてやや立ち遅れている

半導体スピントロニクスにおいて確固たる学理の構築と、応用展開可能な素子創出のための学術的指針を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

前項2で述べたように再定義した「半導体」材料群を対象に以下のアプローチで研究を進め、目的の達成を目指した。

I. 高周波測定を用いた統一的評価手法を導入することによる半導体中のスピントロニクスの網羅的・包括的物性理解と、上記で定義した広範な半導体材料群中のスピントロニクス輸送物性とその緩和物性の評価。従来の電氣的、動力学的、熱的手法によるスピントロニクス輸送物性との対応の考察。

II. Iを通じて、特に原子膜系やトポロジカル絶縁体などの新奇「半導体」スピントロニクス物性を決定する大きな要因であるキャリア濃度によるスピン緩和物性の包括的測定と理解。

III. 特に新しい材料群である遷移金属ダイカルコゲナイド系半導体、トポロジカル絶縁体中のスピントロニクス輸送物性の計測と評価を通じた、新奇「半導体」材料スピントロニクス素子創出への展開。

4. これまでの成果

以下、目標別に成果をまとめたのち、当初構想を超える結果も得られたので順に記載する。

目標 I では本提案の基軸となる新規高周波法によるスピнкаレント物性解析手法を確立することで酸化物ヘテロ界面における 2 次元電子系を介した室温スピнкаレント輸送、Si 中のドーピング濃度を連続的に変化させたときのスピнкаレント緩和物性の変化の系統的解析に成功した。更に Si 中のスピнкаレント緩和におけるフォノンと不純物の寄与の独立かつ定量的な解析と理解、化合物半導体 2 次元電子系や SiC におけるスピнкаレント緩和の実験・理論両面からの検討、半導体中での熱的スピнкаレントの生成の世界初の成功とそれを通じた電氣的・動力学的・熱的に生成されたスピнкаレントの緩和長など諸物性が一致することの確認、など多くの重要な成果を挙げ、本提案で再定義された「半導体」材料群においてスピнкаレント伝搬に好適な材料の選定という目標 I をほぼ達成すると共に、半導体スピнкаレント輸送物性理解のための重要な基盤学理を確認することに成功した。

目標 II では Si 中のドーパント種を変更することで人工的に強いスピнкаレント緩和機構を導入し、それによる効果を実験的に検証することに成功した。この結果と目標 I で達成した諸結果を合わせることで、半導体中のドーパントは軽元素かつ少量であることが基本的に望ましいことを実験的に証明することができ、半導体スピнкаレント素子のための確固たる設計指針を得た。また上述の高周波法を用いて様々な半導体のスピнкаレント緩和の指標であるスピン軌道トルク伝導度を評価し、極性やドーピング濃度を変えた半導体におけるスピン軌道トルク伝導度を定量的に得ることで、これまで共通の物差しがなかった材料間のスピнкаレント緩和を共通に議論できる土台を構築出来、目標 II も成功裏に達成することができた。

更に、以上 2 つの目標の達成をベースに将来構想でもある半導体スピнкаレント素子として、Si スピнкаレント回路を試作し室温での XOR 演算に成功した。

目標 III では主にトポロジカル絶縁体 (TI) と遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) を対象としたスピнкаレント素子の創出を目指した。TI では巧妙な素子構造と計測技術を編み出し、TI 性が失活する室温でも TI 性によるスピнкаレント計測に成功しただけでなく、そのスピнкаレントが TI のスピン軌道相互作用を介して電流に相互変換されることをオンサーガーの相反性を有する形で初めて実証することに成功した。TMD を用いた研究では CVD 成長された直接遷移半導体である単層 TMD に対する NiFe (Py) との界面での先行研究も含めて最小ショットキーバリア 40 meV を実現 (従来のは半分) した。このように 3 年間で上記材料群を用いたスピнкаレント素子創出と評価は順調に遂行されている。

更に当初構想には全く無かったものの、イオン液体ゲート (イオントロンクス) とスピントロニクスとの融合による、電界効果トランジスタと全く同じ動作原理で動作する金属超薄膜スピнкаレント素子の創出に成功し、本来スピнкаレント伝搬に不適な重い金属において、スピン軌道相互作用を大幅に抑制できるというグランドブレイキングな新奇スピнкаレント物性現象を発見した。

## 5. 今後の計画

これまで非常に順調に研究は推移しているので、目標 III における新規スピнкаレント素子の性能向上、目標 I におけるスピнкаレント伝搬に好適な新材料の探索を継続的に推進しながら、半導体スピнкаレント演算機能の向上と応用可能性の検討を行う。更に当初構想を超える成果であるイオン液体ゲートによるスピнкаレント伝搬の巨大制御効果を突破口に「あたかも半導体のように振る舞う」スピнкаレント伝搬に好適な非半導体材料の探索も鋭意推進していく。

## 6. これまでの発表論文・受賞

主要論文

1. S. Lee, F. Rortais, R. Ohshima, Y. Ando, S. Miwa, Y. Suzuki, H. Koike, and M. Shiraishi, "Quantitative and systematic analysis of bias dependence of spin accumulation voltage in a nondegenerate Si-based spin valve", Phys. Rev. B99, 064408-1~5 (2019).
2. S. Dushenko, M. Hokazono, K. Nakamura, Y. Ando, T. Shinjo and M. Shiraishi, "Tunable inverse spin Hall effect in nanometer-thick platinum films by ionic gating", Nature Commun. 9, 3118-1~7 (2018).
3. N. Yamashita, Y. Ando, H. Koike, S. Miwa, Y. Suzuki, and M. Shiraishi, "Thermally Generated Spin Signals in a Nondegenerate Silicon Spin Valve", Phys. Rev. Applied 9, 054002-1~9 (2018).
4. R. Ohshima, Y. Ando, K. Matsuzaki, T. Susaki, M. Weiler, S. Klingler, H. Huebl, E. Shikoh, T. Shinjo, S.T.B. Goennenwein and M. Shiraishi, "Strong evidence for d-electron spin transport at room temperature at a LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface" Nature Mater. 16, 609-615 (2017).

受賞

1. 第36回大阪科学賞「固体中のスピン流輸送とその物性における先駆的研究」(2018年10月31日受賞)
2. 平成29年度文部科学大臣表彰・科学技術部門「半導体スピントロニクスにおける先駆的研究」(2017年4月19日受賞)

## 7. ホームページ等

<http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp/>  
[mshiraishi@kuee.kyoto-u.ac.jp](mailto:mshiraishi@kuee.kyoto-u.ac.jp)