

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2016

課題番号：15H05458

研究課題名(和文) 反転対称性の破れた結晶構造を利用した高効率なスピン流・電流変換材料の開拓

研究課題名(英文) Spin-charge conversion with noncentrosymmetric materials

研究代表者

関 真一郎 (Seki, Shinichiro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：70598599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、反転対称性の破れた結晶構造のバルク半導体を用いて、スピン分裂に由来したEdelstein効果に基づくスピン流・電流変換の観測を目指した。当初は、強磁性体との接合系におけるスピンポンピング法を用いていたが、この場合には界面における対称性の破れが強く効いてしまい、バルク結晶構造の対称性を反映した選択則を観測することができなかった。このため、磁気光電流効果(磁場下でスピン分裂の対称性を反映したバンド変形が生じた状態でキャリアを光励起することで電流が生じる)の手法を新たに用いた結果、バルク物質の結晶構造・スピン分裂の対称性から予測される方向に光誘起起電力が生じることを確認することができた。

研究成果の概要(英文)：In this work, we attempted to observe spin-charge conversion caused by inverse Edelstein effect associated with the spin-splitting in noncentrosymmetric bulk semiconductors. While we first tried spin-pumping experiments for ferromagnet/semiconductor interfaces, it turned out that the contribution from interface is more significant than the underlying bulk itself and we couldn't observe the selection rule as expected. To overcome this issue, we have performed the magneto-photocurrent measurements, and observed the photo-induced voltage signals along the direction consistent with the symmetry of noncentrosymmetric bulk crystal structures.

研究分野：物性物理

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

近年、スピン角運動量の流れであるスピン流が、散逸のない情報媒体の候補として大きな注目を集めている。スピン流は、金属・半導体中の伝導電子や絶縁体中のスピン波によって担われ、強磁性体中の磁気共鳴などを通じて生成される。一方で、スピン流の検出手法は非常に限られており、従来はもっぱら、重金属(白金やタングステン)中で生じる「逆スピンホール効果」を通じて、スピン流を電流に変換して検出する方法が用いられてきた。この逆スピンホール効果は、電子の散乱確率がスピンの向きに依存して異なることに由来する現象であるが、スピン流と電流の変換効率が小さいほか、変換の際の選択則が一意に決まってしまうという課題がある。

一方、最近になり、スピン流を電流に変換するための新しい機構として、反転対称性の破れた環境下の特殊なバンド構造を利用した、逆 Edelstein 効果とよばれる現象が提案された。一般に、反転対称性の破れた環境の下でスピン軌道相互作用が働くと、電子バンドはスピン分裂を生じ、電子の運動方向 k とスピン偏極方向を一对一に結合させるような「スピン-運動量結合」と呼ばれる機構がはたらくようになる。こうした状況の下では、外部から注入されたスピン流を、そのスピン偏極方向に対応した k 方向の電流に、ほぼ 100%に近い効率で変換することが可能となる。実際にこの現象は 2013 年に初めて実験的に確認され、Bi/Ag の界面で生じる Rashba 型のスピン分裂を利用すると、従来の 100 倍近い高い効率でスピン流を電流に変換できることが報告されている。ただし、この報告例では界面における反転対称性の破れを利用しているため、対称性の制約から変換の際の選択則が逆スピンホール効果と同じになってしまうという課題があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、従来利用されてきた界面以外の新しい系として、反転対称性の破れた結晶構造を伴ったバルク物質を利用することで、より自由度の高いスピン流・電流変換を実現することを目指した。特に、キラルな結晶構造を伴う物質中では、界面系の Rashba 分裂とは異なり Weyl 型と呼ばれる対称性のスピン分裂の発現が予想されており、新しい選択則のスピン流・電流変換が実現できることが期待される。本研究では、こうした反転対称性の破れた構造の半導体を新たに育成し、スピンポンピング・磁気光電流効果といった手法によって、バルク結晶構造に由来した Edelstein 効果を介したスピン流・電流変換の選択則の検証を行った。

3. 研究の方法

具体的な研究対象となる物質として、キラルな結晶構造を伴った半導体であるテルル・RuGe の単結晶を育成した。スピン流・電流変換の観測には、スピンポンピング法と磁気光電流 (magneto-photocurrent) 効果を利用した。前者の実験手法は、強磁性体との接合系を作り、マイクロ波照射によって強磁性共鳴を誘起することで、スピンを外部から注入するプロセスに相当する。一方、磁気光電流効果は、磁場をかけることでスピン-運動量結合の対称性に依存したバンド構造の変形を誘起し、そこに光照射によってキャリア生成を行うことで、電流を生じるプロセスに相当する。いずれも、磁場方向と誘起される起電力方向の対応関係を検証することで、スピン・電流変換の選択則を調べることが可能である。

4. 研究成果

最初に、テルル・RuGe の単結晶上に強磁性体である $Ni_{81}Fe_{19}$ の薄膜を蒸着し、スピンポンピングに伴うスピン流・電流変換の観測を試みた。界面由来の Rashba 分裂による逆 Edelstein 効果、あるいは逆スピンホール効果の場合には、注入したスピンの方向と垂直に起電力が生じる。一方、キラルなバルク結晶中の Weyl 分裂による逆 Edelstein 効果の場合には、注入したスピンの方向と平行に起電力が生じる。どちらの機構によるスピン流・電流変換の場合にも、磁気共鳴の際に生じる起電力信号は、磁場に対して奇な振る舞いを示すことが期待される。

実際に、上記のテルル/ $Ni_{81}Fe_{19}$ 接合系に対してスピンポンピング実験を行った結果を図 1 に示す。注入したスピンの方向と垂直な方向には、磁場に対して奇な起電力が生じているのに対して、スピン方向と平行な方向には、より小さくかつ磁場に対して偶な起電力が生じていることが読み取れる。後者の磁場に偶な起電力成分は、熱起電力に由来していると考えられる。このため、このテルル/ $Ni_{81}Fe_{19}$ 接合系におけるスピン流・電流変換の場合には、界面における逆 Edelstein 効果または逆スピンホール効果が支配的な役割を果たしており、バルク結晶自体の対称性に由来したスピン分裂の寄与は比較的小さいことが明らかになった。同様の振る舞いは、RuGe/ $Ni_{81}Fe_{19}$ 接合系の場合にも観測されており、スピンポンピングの手法はバルク結晶構造由来のスピン分裂に起因したスピン流・電流変換を観測する目的にはあまり適していないことが示唆される。

このため、強磁性体との接合系を作成する必要のない別のアプローチとして、磁気光電流効果の観測を試みた。具体的には、テルルの自然成長面に対して磁場を印加しながら、バンドギャップよりも少し高いエネルギーの光を垂直入射で照射し、生成される起電力の大きさを計測した。図 2 に実際に得られた

起電力の磁場依存性を示す。磁場と平行な方向に、磁場の大きさ及び光の強度に比例した起電力が生じており、キラル結晶の Weyl 分裂の対称性を反映したスピン・電流変換が存在していることを示唆する結果が得られた。

このほか、本課題に関連する成果として、キラルな対称性の結晶構造の強磁性体を利用することで、DM 相互作用に由来したスピン波スピン流のダイオードを実現できることなども明らかにした。

今後は、スピン・電流変換の効率を定量的に評価して、変換効率の向上に向けた一般的な指針を見出すとともに、他の様々な対称性の結晶構造を利用した選択則の拡張などを行っていきたい。

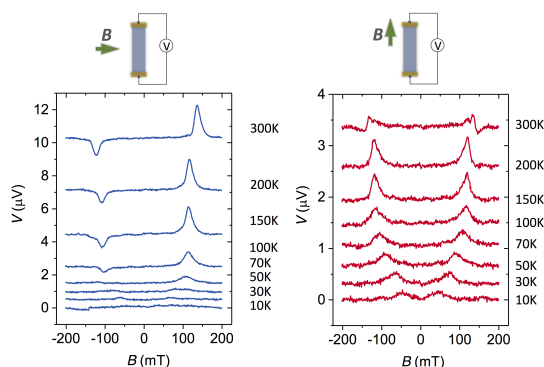


図 1 : Te/Ni₈₁Fe₁₉ 接合系に対するスピンプング実験の結果。特定の磁場で磁気共鳴に伴うスピンの注入が生じる。

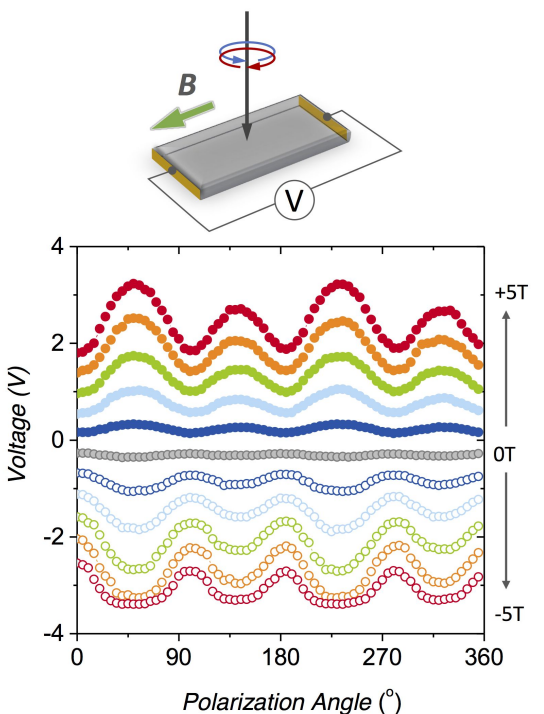


図 2 : Te に対する磁場光電流効果の測定結果。横軸は垂直入射させる光の偏角を表す。

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 8 件)

"Transition to and from the skyrmion lattice phase by electric fields in a magnetoelectric compound"

Y. Okamura, F. Kagawa, S. Seki, and Y. Tokura

Nature Communications 7, 12669 (2016). [査読有]

"Magnetic reversal of electric polarization with fixed chirality of magnetic structure in a chiral-lattice helimagnet MnSb₂O₆"

M. Kinoshita, S. Seki, T. J. Sato, Y. Nambu, T. Hong, M. Matsuda, H. Cao, S. Ishiwata, and Y. Tokura

Phys. Rev. Lett. 117, 047201 (2016). [査読有]

"Magneto-chiral nonreciprocity of volume spin wave propagation in chiral-lattice ferromagnets"

S. Seki, Y. Okamura, K. Kondou, K. Shibata, M. Kubota, R. Takagi, F. Kagawa, M. Kawasaki, G. Tatara, Y. Otani, and Y. Tokura

Phys. Rev. B 93, 235131 (2016). [査読有]

"Thermal generation of spin current in a multiferroic helimagnet"

R. Takagi, Y. Tokunaga, T. Ideue, Y. Taguchi, Y. Tokura and S. Seki

APL Mater. 4, 032502 (2016). [査読有]

"Thermal generation of spin current in an antiferromagnet"

S. Seki, T. Ideue, M. Kubota, Y. Kozuka, R. Takagi, M. Nakamura, Y. Kaneko, M. Kawasaki, and Y. Tokura

Phys. Rev. Lett. 115, 266601 (2015). [査読有]

"Microwave Magneto-chiral Dichroism in the Chiral-Lattice Magnet Cu₂OSeO₃"

Y. Okamura, F. Kagawa, S. Seki, M. Kubota, M. Kawasaki, and Y. Tokura

Phys. Rev. Lett. 114, 197202 (2015). [査読有]

"Ultrafast optical excitation of magnetic skyrmions"
N. Ogawa, S. Seki and Y. Tokura
Scientific Reports 5, 9552 (2015). [査読有]

"Dynamical magnetoelectric phenomena of multiferroic skyrmions"
M. Mochizuki, S. Seki
J. Phys.: Condens. Matter 27, 503001 (2015). [査読有]

[学会発表](計 11 件)

"Thermal generation of spin current in antiferromagnets and helimagnets"
(Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM), New Orleans (USA), 1/Nov/2016)
S. Seki

"Emergent phenomena in chiral-lattice ferromagnetic insulators"
(Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) Workshop on Multiferroics, Shanghai (China), 9/Oct/2016)
S. Seki

"Control of skyrmions by electric field and mechanical strain"
(International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, Dresden (Germany), 19/Aug/2016)
S. Seki

"Chirality and Ferromagnetism"
(Gordon Research Conference on Multiferroic and Magnetoelectric Materials, Lewiston (USA), 10/Aug/2016)
S. Seki

"Spin current in antiferromagnets and multiferroics"
(Spin Caloritronics 7, Utrecht (Netherlands), 15/Jul/2016)
S. Seki

「磁気スキルミオンの生成と制御」
(日本物理学会 2016 年春季大会 東北学院大学 領域 3 (21aAU-3), 2016 年 3 月 21 日)
関真一郎

「キラリティと強磁性」
(物性研短期研究会「量子物質研究の最前線」2015 年 東京大学, 2015 年 12 月 8 日)
関真一郎

「キラルな強磁性絶縁体 Cu₂Se₃ におけ

るスピン波スピン流の非相反伝播特性」
(日本物理学会 2015 年秋季大会 関西大学 領域 3 (17aCG-5), 2015 年 9 月 17 日)
関真一郎、岡村嘉大、近藤浩太、柴田基洋、久保田将司、高木里奈、賀川史敬、川崎雅司、多々良源、大谷義近、十倉好紀

「Chirality and Ferromagnetism」
(物性研国際シンポジウム "New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics" 2015 年 東京大学, 2015 年 6 月 11 日)
関真一郎

"Spin dynamics in chiral multiferroic insulators with magnetic skyrmions"
(2015 International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, Sydney, 2015 年 5 月 20 日)
S. Seki

"Magnetoelectric Skyrmions in Multiferroics"
(2015 INTERMAG, Beijing, 2015 年 5 月 15 日)
S. Seki

[図書](計 1 件)

"Skyrmions in Magnetic Materials"
S. Seki, M. Mochizuki
(2015, Springer, ISBN 978-3-319-24649-9)

[産業財産権]

出願状況(計 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 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

6. 研究組織
(1) 研究代表者
関真一郎 (SEKI, Shinichiro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物
性科学研究センター・ユニットリーダー
研究者番号：70598599

(2)研究分担者
なし ()

研究者番号：

(3)連携研究者
なし ()

研究者番号：

(4)研究協力者
()