

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：12601
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2015～2016
課題番号：15H06133
研究課題名（和文）ラシュバ系における量子スピン輸送現象

研究課題名（英文）Quantum spin transport in Rashba systems

研究代表者
井手上 敏也（Ideue, Toshiya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：90757014
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：ラシュバ型バンド構造を持つ極性半導体BiTeBrにおいて、結晶の空間反転対称性の破れに起因する電流の非相反性を検出することに成功した。観測された非相反電荷輸送現象は極性構造に特有の磁場・電流方位選択則を見出し、シグナルのキャリア数依存性や温度依存性から微視的機構を明らかにした。また、非相反電荷輸送現象をカイラリティーを持つ物質に拡張し、特にWS₂カイラルナノチューブの電界誘起超伝導相において巨大な超伝導電流の非相反超伝導効果が生じることを発見した。結晶カイラリティーの超伝導への影響を初めて実証すると同時に、非相反超伝導現象が特徴的な形状による量子干渉効果の影響を受けることも見出した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have studied the nonreciprocal electric transport in polar and chiral materials, which is one of the manifestations of the lattice symmetry breaking in electric transport. We have successfully observed the second harmonic signals of resistance under magnetic field in polar semiconductor BiTeBr. The observed nonlinear signals correspond to the bulk rectification and satisfy the characteristic selection rule for polar systems. In addition, the experimental results can be quantitatively explained by the simple model using the three-dimensional Rashba model. We further observed the nonreciprocal electric transport in chiral WS₂ nanotubes. Nonreciprocal electric transport is largely enhanced in electric-field-induced superconducting state. Periodic oscillations observed both in first and second harmonic signals indicate that nonreciprocal superconducting transport is affected by the characteristic cylindrical geometry.

研究分野：固体物理学

キーワード：非相反電荷輸送現象 空間反転対称性の破れ スピン軌道相互作用 極性 ラシュバ系 カイラリティー

科学研究費助成事業 研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

(1)従来のスピントロニクス研究は、超巨大磁気抵抗効果やトンネル磁気抵抗効果に代表されるように、強磁性体における磁気秩序由来のスピントランジスタの研究が主流であったが、スピントランジスタの提案や(逆)スピンホール効果の予言と観測等に端を発する、非磁性体における強いスピン軌道相互作用を利用した、電場によるスピン輸送の生成・制御・観測技術が、スピン流の非散逸性や制御性の観点から省エネルギースピントロニクスの実現に有望であり、注目を集めていた。

(2)非磁性体におけるスピントロニクス研究は、界面や結晶構造の空間反転対称性の破れに起因するスピン分裂したバンド構造を持つ金属や半導体の表面・界面での研究が盛んに行われており、最近ではトポロジカル絶縁体等新規物質系でのスピン分裂したバンド構造に由来するスピン輸送現象研究の成果も報告され始めていた。

(3)中でも、ラシュバ系と呼ばれる物質群は、結晶の鏡像反転対称性の破れに起因するスピン・運動量結合により、電子スピンの極性軸及び運動量と直交する特異な電子バンド構造を持っており、非磁性体におけるスピントロニクス研究の理想的な舞台となっている。ラシュバ効果は、従来、界面や表面で研究されてきたが、近年、結晶構造の鏡像反転対称性の破れに由来する巨大なラシュバスピンスピン分裂を持つ三次元物質 BiTeX ($X=\text{I}, \text{Br}$) が発見され、量子輸送現象の研究・理解が進められていた。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、省エネルギースピントロニクスの確立に向けた、非磁性体におけるスピン流輸送現象の基礎学理構築と新現象の開拓・制御を念頭に、新しく発見された三次元ラシュバ系 BiTeX ($X=\text{I}, \text{Br}$) においてラシュバ型バンド構造に起因する特異な量子スピン輸送現象の観測を目的とした。

3. 研究の方法

ラシュバ型バンド構造に起因する特異な量子スピン輸送現象の中でも、特に、非相反電荷輸送現象と呼ばれる現象に関して研究を行い、空間反転が破れた結晶における新現象の開拓と基礎学理構築に取り組んだ。非相反電荷輸送現象とは、電流を物質中のある方位へ流す場合に、磁場印加下において正方向に流す場合と負方向へ流す場合で電気抵抗が異なる現象であり、結晶対称性を反映した電流の整流作用、あるいは電流と磁場の結合に由来する金属における電気磁気効果ととらえることができる(図1)。このような電流方位に依存した電圧シグナ

ルはロックイン測定の実効成分として観測できるため、本研究では主に BiTeX あるいはその他の空間反転対称性の破れた結晶のナノデバイスを作製し、入力電流の2倍の周波数を持つシグナルをロックイン測定し、そのシグナルの磁場・電流依存性や磁場方位に関する選択測を詳細に調べることにより、当該物質における非相反電荷輸送現象の検証を行った。

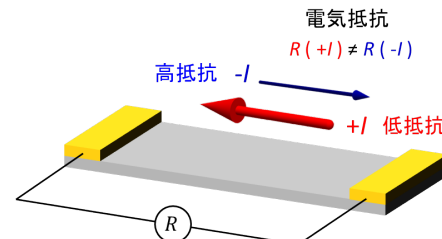


図1. 非相反電荷輸送現象の模式図

4. 研究成果

(1)極性半導体 BiTeBr における非相反電荷輸送現象の発見

近年発見された三次元ラシュバ型バンド構造を持つ極性半導体 BiTeX ($X=\text{I}, \text{Br}$) は、Bi (ビスマス) Te (テルル) Br (臭素) の各原子層が積層した層状化合物で、積層方向への鏡像反転対称性が破れているため、結晶全体で電気分極を持つような極性物質である。現在までに、磁気抵抗効果や圧力効果、熱電効果等の研究が報告されているが、バンドのスピン偏極に起因する輸送現象の報告は、 BiTeBr における光電流効果の報告に限られていた。その主たる原因は、 BiTeX バルク結晶には二種類の極性ドメインが混在しており、スピン偏極に由来するシグナルがドメイン間でキャンセルしてしまうためと考えられる。

本研究では、化学気相法によって得られた BiTeBr 結晶を、スコッチテープ法により基板上に劈開し、マイクロメートルサイズの試料を得ることに成功した。 BiTeBr の典型的なドメインサイズは数百 μm であることが知られており、得られた試料はほぼ単一ドメインであるため、スピン偏極に由来する輸送現象の観測が期待できる。

ラシュバ系に面内に磁場を印加すると、フェルミ面が分極方向と磁場方位両方に垂直な方向へ異方的に変形し、その方向への電流応答が電流の向きに依存するようになることが予想される(図2)。

本研究では、前述した大きさ数 μm 、厚さ 100nm 程度のデバイスにおける非線形電気抵抗を測定することにより、極性物質に特有の非相反電荷輸送現象の観測を試みた。

図3は、非相反電荷輸送現象に対応する、印加電流の2倍波の電圧シグナルを測定した

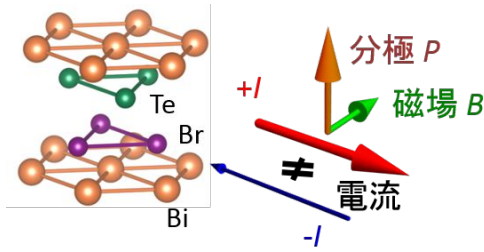


図 2. 極性物質における非相反電荷輸送現象

結果である。電流と面内磁場が平行な時には電流の 2 倍波の非線形磁気抵抗効果は観測できなかったが (図 3 青色データ) 電流と面内磁場が垂直な場合には、磁場に比例するような有限の非線形磁気抵抗効果が観測されていることが分かる (図 3 赤色データ)。このような非線形シグナルの有無の磁場・電流依存性は極性物質に特有の選択則であり、極性物質において結晶の空間反転対称性の破れに起因する電流の非相反輸送現象を初めて観測したと言える。

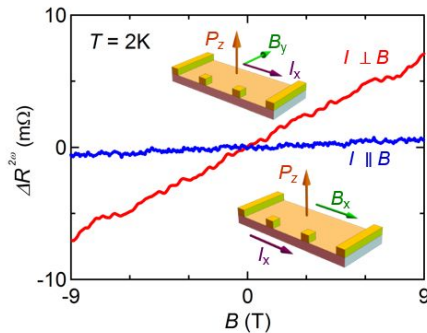


図 3. BiTeBr における非相反電荷輸送現象

さらに、本研究では観測された整流特性の温度・キャリア数依存性等を詳細に測定することにより、低温領域やキャリア数の少ない試料において、整流特性が著しく増大することを発見した。これら低温・低キャリア数領域での整流特性の増大の振る舞いやその定量的な大きさは、3 次元ラッシュバ型バンド構造に基づく微視的なモデルによって、定量的に説明できることが明らかになった。この理論モデルでは、非相反電荷輸送現象のシグナルの大きさは電子の散乱時間のような現象論的なパラメータに依らず、スピン起動相互作用の大きさや有効質量といった内因的な物理量のみによって決まるため、本研究で発見した極性構造に起因する整流特性は、空間反転対称の破れた物質における新機能であるだけでなく、電子状態を決定している微視的な相互作用を決定する手段としても有用であるという点で極めて重要である。

(2)WS₂カイラルナノチューブにおける電界誘起超伝導と非相反超伝導輸送現象の発見

本研究では、前述極性半導体 BiTeBr に限らず、同様に空間反転対称性の破れたカイラルナノチューブにおける非相反電荷輸送現象の研究にも取り組んだ。カイラルナノチューブにおいては、前述極性半導体の場合とは異なり、電流と磁場をどちらもチューブ軸方向へ印加した場合に非相反電荷輸送現象が期待される (図 4)。

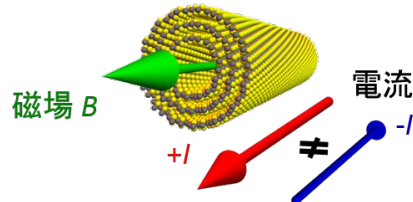


図 4. カイラルナノチューブにおける非相反電荷輸送現象

本研究で対象とした WS₂ ナノチューブは、グラフェンに次ぐ原子層物質として近年大きな注目を集めている、遷移金属ダイカルコゲナイドと呼ばれる物質群の一つである WS₂ のナノ構造体的一种である。本材料は金属と絶縁体の中間の電気伝導性を示す半導体であり、固体ゲート絶縁体材料を用いた電気伝導性の制御や力学特性の研究が行われてきたが、超伝導を含めた電気伝導性の大幅な制御は未報告であった。

本研究では、ゲート絶縁体材料として電解質 (KClO₄) を用いることで、WS₂ ナノチューブデバイスの電気伝導性の制御を試みた。ゲート絶縁体材料である電解質に電圧を印加すると、電解質中のイオンが物質表面や原子層物質の層間に集積して物質中に電荷が蓄積され、大幅なキャリア数の制御が可能となる。その結果、ゲート電圧が小さな領域では、ナノチューブ表面にイオンを蓄積するような静電的な電子ドーピングにより、半導体であった WS₂ ナノチューブに電子を蓄積して金属的電気伝導特性にすることに成功し、さらに、ゲート電圧を大きくし、電子を電気化学ドーピングしたような領域では、電気抵抗がゼロになる超伝導が発現することを発見した。単一ナノチューブにおいて超伝導特性を観測した初めての報告であり、これにより従来研究されてこなかったナノチューブの特徴的な形状 (円筒構造、原子層の巻き方の自由度) を反映した超伝導特性の探索が可能となったと言える。

本研究では、特に磁場下での電気伝導性の振る舞いを詳細に測定することにより、電気抵抗がチューブ軸と磁場の角度に大きく依存する異方的な振る舞いを示す擬一次元的な振る舞いを示すことを見出した。また、磁場がチューブ軸に平行な場合に、円筒を貫く磁束によって超伝導流が干渉効果の影響を受け、周期的な振動を示す Little-Parks 効果を観測した (図 5 青色データ)。これは、

超伝導流が円筒形状の領域で実現されていることを明示しており、単一ナノチューブでの超伝導の証拠の一つである。

さらに、電界誘起超伝導相において、非相反電荷輸送現象に対応する印加電流の2倍波の電圧シグナルが著しく増大すること、前述した量子振動効果が観測されるような領域で、非相反電荷応答シグナルも周期的な振動を示すことを発見した(図5赤色データ)。

これらの結果は、超伝導電流の非相反性を検証し、また、結晶カイラリティの超伝導への効果を観測した初めての報告である。超伝導の整流性(超伝導ダイオード特性)といった空間反転対称性の破れた超伝導体の機能性開拓を促す結果であると同時に、結晶対称性の破れに起因した巨大整流作用に超伝導相が有望であることを示した重要な結果と言える。

また、超伝導相において線形シグナル、非線形シグナルどちらにも量子振動効果が観測できたことから、非相反超伝導電流も量子干渉効果の影響を受けることを示唆しており、今後、発見した超伝導の非相反現象の微視的起源を明らかにする重要な知見となり得る。

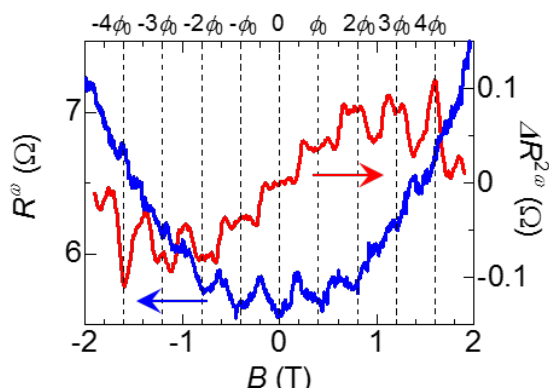


図5. WS₂ カイラルナノチューブにおける非相反電荷輸送現象

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 5 件)

T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa, Y. Iwasa, Nature Physics, 査読有, 印刷中
DOI : 10.1038/NPHYS4056

F. Qin, W. Shi, T. Ideue, M. Yoshida, A. Zak, R. Tenne, T. Kikitsu, D. Inoue, D. Hashizume, Y. Iwasa, Nature Communications, 査読有, 8 巻, 2017, 14465-1~6
DOI: 10.1038/ncomms14465

[学会発表](計 7 件)

井手上敏也、
空間反転対称性の破れた低次元物質における電界誘起超電導、
日本物理学会第 72 回年次大会、
2017 年 3 月 19 日、
大阪大学豊中キャンパス(大阪市豊中市)

T. Ideue, F. Qin, W. Shi, M. Yoshida, A. Zak, R. Tenne, T. Kikitsu, D. Inoue, D. Hashizume, Y. Iwasa, Chiral superconducting transport in WS₂ nanotube
XXX st International Winterschool on Electronic properties of Novel Materials,
2017 年 3 月 7 日、Hotel Sonalp, Kirchberg in Tirol, Austria

井手上敏也、
極性半導体における非相反電荷輸送現象、
第二回 ディラック電子系マルチフェロイクス研究会、
2016 年 11 月 17 日、
名古屋大学物質科学国際研究センター
(愛知県名古屋市)

[その他]

プレスリリースホームページ等
単一超伝導ナノチューブトランジスタの実現 - 省エネルギーナノエレクトロニクスへの新展開へ期待

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/shared/pres/s/data/setnws_20170217104546549096801378_114794.pdf

整流性の新原理を発見 - エキゾチックな結晶における新機能の開拓

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/shared/pres/s/data/setnws_20170307103704352092639202_718736.pdf

6. 研究組織

(1)研究代表者

井手上 敏也 (IDEUE, Toshiya)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：90757014