

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 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：2013～2014

課題番号：25887037

研究課題名(和文) 電流ゆらぎ測定を用いた微小接合系におけるスピンドYNAMIKSの解明

研究課題名(英文) Spin dynamics in small conductors probed by current fluctuations

研究代表者

荒川 智紀 (ARAKAWA, TOMONORI)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00706757

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)：本研究では微少な半導体素子中にスピン流を生成し、それに伴う電流ゆらぎの検出に成功した。ここで実現された検出手法はスピン流の非平衡状態(熱の発生など)に関する新たな情報を与えるため、今後のスピントロニクス発展に寄与すると期待される。さらに、本研究では極めて高精度な電流ゆらぎ測定技術を駆使して、スピン流の生成に伴う電子系の温度上昇を実測した。

研究成果の概要(英文)：How can we electrically detect spin current? In 1918, Schottky argued that the electric flow in a vacuum tube shows peculiar fluctuation whose amplitude is proportional to elementary charge and to the mean current. This is shot noise, a direct consequence of the discreteness of the electric charge. Now, consider the discreteness of spin. By using a spin-valve-type solid-state device, we successfully detected the shot noise induced by a non-equilibrium spin accumulation. The observed shot noise is proportional to the spin current, yielding a spin analogue of Schottky's argument. Our experimental demonstration could open a novel way to approach non-equilibrium spin phenomena like spintronics.

研究分野：メゾスコピック系における量子輸送現象

キーワード：メゾスコピック系 スピントロニクス ショット雑音 スピン流 スピン蓄積

1. 研究開始当初の背景

真空管から放出される電流には、有限のゆらぎが含まれており、この電流ゆらぎは素電荷と電流の平均値に比例する。この普遍的な性質を持つ雑音は、ショット雑音と呼ばれる。この現象は真空管の陰極からランダムに放出される電子の分配過程と電荷の離散性に起因する。ショットとは「粒」のことで、電荷の離散性を端的に表している。ところで、電子は電荷だけでなくスピンという自由度も持つため、スピンの離散性も電流のゆらぎに何らかの影響を与えるのではないかと考えるのは自然な発想である。しかし、スピンに起因したショット雑音については理論的な提案があったものの、実験的な検証は行われてこなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的はショット雑音を精密に測定することでスピン依存伝導過程のダイナミクスを明らかにすることである。特に、スピン流という特殊な非平衡状態に注目することでショット雑音の新たな可能性の開拓を目指した。ここでスピン流とはアップスピン電子の流れとダウンスピン電子の流れの差で定義されるスピン角運動量の流れである。近年、スピン流は電流に替わる新たな物理量として注目されており、その生成・検出手法が盛んに研究されている。しかし、これまで、強磁性電極や逆スピンホール効果を用いた間接的な検出手法しか確立していなかった。また、非平衡度合いに関しては十分な理解が得られていなかった。

具体的には、ショット雑音を用いた新たなスピン流の検出手法の確立(図 1)と、スピン流という特殊な非平衡状態の解明が本研究の目的である。

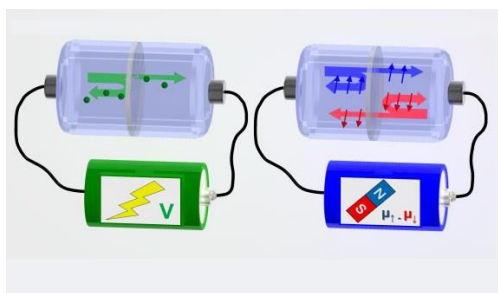


図 1. 電流ゆらぎ測定概念図
(左図)トンネル接合において電子が散乱されショット雑音が発生している様子。(右図)正味の電流がなく、スピン流だけが存在する場合にもショット雑音は発生する。

3. 研究の方法

本研究では、強磁性半導体(Ga,Mn)As と非磁性半導体 GaAs からなる非局所スピンバルブ素子を用いた。この素子では強磁性半導体からスピン偏極電流を注入することで GaAs に正味の電荷を伴わないスピン流を生成す

ることができる(図 2)。このスピン流を非局所に配置したトンネル障壁に印加した状態でショット雑音の測定を行った。

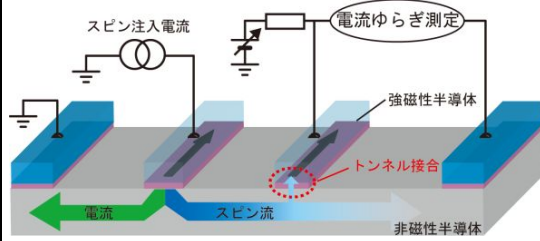


図 2.電流ゆらぎ測定概念図
真ん中左の(Ga,Mn)As 電極から注入されたスピン偏極電流は直下の GaAs 中にスピンが蓄積された状態(スピン蓄積)を引き起こす。これに伴いスピン流が左右に拡散的に伝搬していく。

4. 研究成果

特に、トンネル接合に流れるスピン流と電流を独立に制御することで、ショット雑音に含まれる電流とスピン流の寄与を分離して評価した。図 3 は測定されたスピン流に伴うショット雑音とスピン流との比例関係である。ここではスピン注入を行う電極と検出用の電極との距離、スピン注入の量を系統的に変化させた実験を行っている。すべての結果はランダウアー・ビュティカーのモデルと一致しており、この結果はスピン流のゆらぎに対しても既存の理論が拡張できること実証しています。また、ショット雑音と電流の比から見積もられるファノ因子(伝導過程の統計性を如実に反映する無次元量)は電流成分とスピン流成分で同じ値を持つことを実験的に明らかにした。このことはトンネル過程において電荷とスピンの一体となったトンネルしていることの直接的な帰結である。

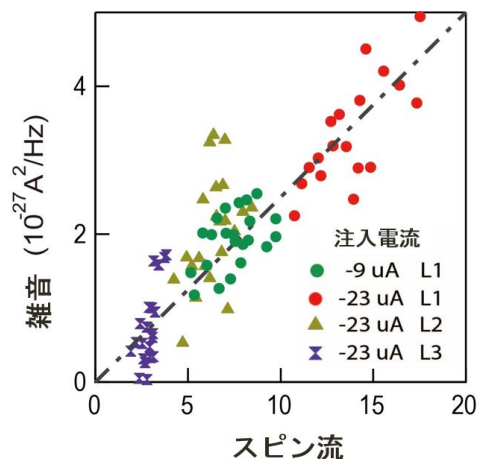


図 3. 電流雑音測定から得られたスピン流に伴う電流雑音とスピン流の比例関係

本研究ではトンネル接合にスピン流を印加し、それに伴うショット雑音の検出に世界で初めて成功した。さらに、本研究では極めて高精度な電流ゆらぎ測定技術を駆使して、

スピン流の生成に伴う電子系の温度上昇を実測した。このようなスピン流の非平衡度合いに関する研究はこれまで進んでおらず、今後、本検出手法がスピン流の非平衡状態の研究を進展させていくと期待される。

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 6件)

(1) T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, and K. Kobayashi, "Shot Noise Induced by Nonequilibrium Spin Accumulation", *Physical Review Letters* **114**, 016601-1~5 (2015). 査読有。

DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.016601

(2) T. Tanaka, T. Arakawa, M. Maeda, K. Kobayashi, Y. Nishihara, T. Ono, T. Nozaki, A. Fukushima, and S. Yuasa, "Leak current estimated from the shot noise in magnetic tunneling junctions", *Applied Physics Letters* **105**, 042405-1~4 (2014). 査読有。

DOI: 10.1063/1.4891556

(3) K. Chida, T. Hata, T. Arakawa, S. Matsuo, Y. Nishihara, T. Tanaka, T. Ono, and Kensuke Kobayashi, "Avalanche electron bunching in a Corbino disk in the quantum Hall effect breakdown regime", *Physical Review B* **89**, 235318-1~4 (2014). 査読有。

DOI: 10.1103/PhysRevB.89.235318

(4) S. Matsuo, T. Koyama, K. Shimamura, T. Arakawa, Y. Nishihara, D. Chiba, K. Kobayashi, T. Ono, C. Chang, K. He, X. Ma and Q. Xue, "Conductance fluctuation and weak antilocalization in epitaxial Bi₂Se₃", *AIP Conference Proceedings* 1566, 193-194 (2013). 査読有。

DOI: 10.1063/1.4848351

(5) K. Chida, M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Nakamura, T. Arakawa, T. Machida, K. Kobayashi, and T. Ono, "Bias Voltage Dependence of the Electron Spin Depolarization in Quantum Wires in the Quantum Hall Regime Detected by the Resistively Detected NMR", *AIP Conference Proceedings* 1566, 279-280 (2013). 査読有

DOI: 10.1063/1.4848394

(6) T. Arakawa, Y. Nishihara, M. Maeda, S. Norimoto, and K. Kobayashi, "Cryogenic amplifier for shot noise measurement at 20

mK", *Applied Physics Letters* **103** 172104-1~4 (2013). 査読有

DOI: 10.1063/1.4826681

[学会発表](計 7件)

(1) 荒川 智紀, "ショット雑音を用いたカーボンナノチューブ量子ドットにおける近藤効果の研究", 日本物理学会 第70回年次大会、2015年3月22日、「早稲田大学(東京)」

(2) Tomonori Arakawa, "Shot noise induced by nonequilibrium spin accumulation", The 1st International Symposium on Interactive Materials Science Cadet Program (iSIMSC), November 18, 2014, 「Osaka(Japan)」(招待講演)

(3) 荒川 智紀, "SU(2)およびSU(4)近藤状態における非平衡電流ゆらぎ", 日本物理学会秋季大会、2014年9月8日、「中部大学(愛知)」

(4) Tomonori Arakawa, "Observation of Spin Shot Noise", The 32th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS 2014), August 11, 2014, 「Austin(USA)」

(5) 荒川 智紀, "スピンショット雑音の観測", 日本物理学会 第69回年次大会、2014年3月27日、「東海大学(神奈川)」

(6) 荒川 智紀, "電流ゆらぎ測定系に用いる低温アンプの改良", 日本物理学会秋季大会、2013年9月26日、「徳島大学(徳島)」

(7) Tomonori Arakawa, "Magnetic low frequency noise in MgO-based Magnetic Tunneling Junctions", The 8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML 2013), May 21, 2013, 「Kyoto(Japan)」

[その他]

ホームページ等

小林研究室ホームページ

http://meso.phys.sci.osaka-u.ac.jp/spin_shot_noise.html

大阪大学ホームページ

http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2015/20150122_1

6. 研究組織

(1)研究代表者

荒川 智紀 (ARAKAWA TOMONORI)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：00706757

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者
なし