

研究種目：特定領域研究
研究期間：2007 ~ 2010
課題番号：19048016
研究課題名（和文） 単電子スピン制御

研究課題名（英文） Single Electron Spintronics

研究代表者
勝本 信吾 (KATSUMOTO SHINGO)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：10185829

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，電気電子工学

キーワード：単電子帯電効果，量子ドット，スピン軌道相互作用，量子情報

1. 研究計画の概要

本計画においては，低電力・高速動作が期待される単電子デバイスと，スピントロニクスデバイスとを組み合わせた系の基礎物理学を調べることで，更に低電力で安定的に動作する素子の実現を目指すものである．具体的目標として：

- (1) 量子ドットなどにおける単電子効果を利用してスピン制御を行う．
- (2) 同じく単電子効果を利用して，スピン流やスピン偏極が生じているかどうか，検出する検出器を開発する．
- (3) 更に，スピン軌道相互作用と単電子効果を組み合わせることで非磁性の半導体中にスピン偏極を生成する．

を掲げ，これらを実験的理論的に追求する．

2. 研究の進捗状況

初年度において量子ドットにおけるゲート電圧操作によりドット中の電子数を固定してスピン状態を変化させる実験を行った．ドットの自由度を維持しつつ電子数を数個レベルまで落とすため側面結合型を使用した．ゲートにより明瞭な軌道状態の反転を確認し，多体効果による占有反転によってスピンの生成消滅が生じていることを確認できた．

次に側面結合量子ドットを使用し，ゲート操作による電子交換レートを量子ポイントコンタクト(QPC)による遠隔検出により測定し，ゲートシーケンスを工夫することで実際にスピン偏極を検出できることを示した．スピン軌道相互作用の強い系を仮定し，リング構造を作製して干渉効果を援用することにより強いスピン偏極を得られることを理論

的に示した．

この予測を実際のデバイスで実証すべく，スピン軌道相互作用の強い系の作製を行った．InGaAs 2次元電子系を微細加工してQPC構造とし，低温電気伝導を測定して，通常の伝導度量子化プラトーに対して半分の大きさのプラトーが明瞭に再現性良く現れることを発見した．これはゼロ磁場においてスピン軌道相互作用と面内歪，量子閉じ込めのために強いスピン偏極が発生したと考えられる．

3. 現在までの達成度

自己評価達成度

これまで，ほぼ研究計画に沿ってそれぞれの課題を遂行してきた．「進捗状況」内の最後の推論が実験的にも完全に確認できれば，非磁性半導体中に全く外部磁場を使用せずにスピン偏極が生成できたことになり，本研究計画の目的は，ほぼ達成したことになる．

ただし，ゲートスピン操作は現在のところゲートによるスピンの生成消滅のみであるから，上記のスピン偏極により発生したスピン流を用いてドットスピンを初期化し，ゲートへの高周波印加によってスピン歳差運動を制御できれば，目的を完全達成したことになると考える．

4. 今後の研究の推進方策

上記「達成度」における考察に従い，まず，スピン軌道相互作用の強い InGaAs 2次元系のQPC伝導に生じた1/2プラトーにおいて実際にスピン偏極が生じていることを側面結合型量子ドットスピン偏極検出器を用いて検出する．これはスピン偏極形成の上からも，

またその検出の上からも大きなインパクトを持つ研究となる。

次に、検出に用いた量子ドットをそのままスピン量子情報操作の量子ビットとして使用し、偏極スピンを導入した直後に高周波を加えて歳差運動を生じさせる実験を行う。最差運動の結果は、運動を生じさせる時間に対して交換レートがどのように変化するか調べることによって測定することができる。これはこれまでに行われたスピン量子ビットの実験に比べて非常に簡単な系での量子情報操作となり、量子ビットの集積化へ向けての進歩となる。

5. 代表的な研究成果

(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 10 件)

- [1] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Detection of spin polarization in a quantum wire”, *Physica E* 42, 809-812 (2010).
- [2] M. Kawamura, T. Yamashita, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, “Strain-induced enhancement of electric quadrupole splitting in resistively detected nuclear magnetic resonance spectrum in quantum Hall systems”, *Appl. Phys. Lett.* 96, 032102(1-3) (2010).
- [3] A. Aharony, O. Entin-Wohlman, Y. Tokura and S. Katsumoto, “Spin filtering due to quantum interference in periodic mesoscopic networks”, *Physica E* 42, 629-633 (2010).
- [4] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Detection of spin polarization with a side-coupled quantum dot”, *Phys. Rev. B* 79, 195353(1-5) (2009).
- [5] M. Kato, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, “Temperature-Dependent Screening of the Edge State around Antidots in the Quantum Hall Regime”, *Phys. Rev. Lett.* 102, 086802(1-4)(2009).
- [6] M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya and T. Machida, “Dynamic nuclear polarization induced by breakdown of fractional quantum Hall effect”, *Phys. Rev. B* 79, 193304(1-3) (2009).
- [7] N. Kang, E. Abe, Y. Hashimoto, Y. Iye, S. Katsumoto, “Magnetotransport through a two-dimensional hole antidot lattice: Signatures of Berry phase”, *phys. stat. sol. (c)* 5, 2847-2849 (2008).
- [8] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye, and S. Katsumoto, “Excited-state spectroscopy on a quantum dot side-coupled to a quantum wire”, *Appl. Phys. Lett.* 93, 112111(1-3)(2008).
- [9] A. Aharony, O. Entin-Wohlman, Y. Tokura, S.

Katsumoto, “Spin filtering by a periodic spintronic device”, *Phys. Rev. B* 78, 125328(1-4) (2008).

[10] M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, “

Dynamic Nuclear Polarization in a Quantum Hall Corbino Disk”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 093715(1-4) (2008).

[学会発表](計 9 件)

[1] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Probing edge states in the quantum Hall regime with a side coupled quantum dot”, The 36th International Symposium on Compound Semiconductors, 2009/9/2, Santa-Barbara, USA

[2] K. Fujita, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, “Measurement of diffusion thermopower in the quantum Hall systems”, 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2009/7/23, Kobe

[3] M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, T. Machida, “Nuclear spin polarization in the breakdown regimes of integer and fractional quantum Hall states”, 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2009/7/23, Kobe

[4] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Detection of spin polarization in a quantum wire”, 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2009/7/21, Kobe

[5] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Detection of Spin Polarization with a Side Coupled Quantum Dot”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2009/1/22, Atsugi

[6] M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and T. Machida, “Nuclear Spin Polarization Induced by Breakdown of Fractional Quantum Hall Effect”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2009/1/22, Atsugi

[7] S. Katsumoto, “Coherent transport in quantum dot systems with spin”, The 23rd Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, 2008/11/20, Kyoto

[8] T. Otsuka, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Excited State Spectroscopy in Side-Coupled Quantum Dots”, IEEE Nanotechnology Materials and Devices, 2008/10/21, Kyoto

[9] E. Abe, Y. Kimura, Y. Hashimoto, Y. Iye and S. Katsumoto, “Charge States of a Superconducting Single-Electron Transistor Coupled with a Two-Dimensional Electron Gas”, IEEE Nanotechnology Materials and Devices, 2008/10/20, Kyoto