

平成21年 6月 5日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340081

研究課題名（和文） 単一光子注入による少数電子系の電子・核スピン制御の研究

研究課題名（英文） Study of manipulation of electron and nuclear spins in few electron systems via single photon injection

研究代表者

大岩 顕（OIWA AKIRA）

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：10321902

## 研究成果の概要：

本研究では、量子情報の長距離伝送実現のための中継技術の基盤開発として、単一光子から量子ドット中の単一電子スピンへの状態転写を目指した。その結果、単一光子検出用横型量子ドットを開発し、単一光子を量子ドット中の電子へ変換する単一光子検出を実現した。さらに光生成された単一電子のスピンを検出する手法を提案し、その実証に成功した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2007年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅰ

キーワード：半導体物性・量子ドット・量子コンピュータ・メソスコピック系・スピンエレクトロニクス

## 1．研究開始当初の背景

将来の情報処理では、量子情報の長距離伝送には光子を使い、演算、蓄積、中継には固体の量子状態を用いるように、異なる物理系の量子ビット間で量子情報を転送することで構築される複合的量子情報ネットワークが必要とされる。一方、量子ドット中の電子スピンは量子ビット有力な候補であり、その物性の解明は重要な課題である。これまで量子ドット中の少数電子系の電子スピンについて、スピン軌道相互作用や核スピン磁場の影響など一端が明らかにされつつあるが、電子スピンコヒーレンス時間や強相関状態での

電子・核スピン物性とその動的特性の解明は学術的な意義が深い。また量子ドットによる光子/電子量子ゲートの実現を目指した単一光子検出と光子が生成する電子スピン検出の研究は、世界的に幾つかの研究グループ（UCLA、ETH、東北大）によって開始されており、緊急性が高い。

## 2．研究の目的

本研究の目標は、“単一光子”の持つ偏光状態を、“単一の電子スピン”の向きとして検出し、また、コヒーレンスを保ったままでの光子情報をスピン情報として蓄積することである。

この実現のため、まず量子ドットへ単一光子を照射しそれを検出する単一光子検出を達成する。次のステップでは、円偏光した単一光子を量子ドットへ照射し、生成される単一電子のスピンの状態を検出する。言い換えれば、単一光子の偏光状態を量子ドットのスピン状態へ変換して読み出す。こうして確立した単一光子による単一電子スピン制御技術を用いて、核スピン制御の研究へ展開する。本研究の目標が達成できれば、光子から電子スピンへ量子情報を蓄積する量子スピンメモリや核スピン量子メモリの実現や、光子による量子もつれ状態の長距離伝送を可能にする量子中継器、さらには量子ドットの電子スピンから円偏光した光を発光する量子もつれ光子対源など、将来の量子情報システムを構築するための鍵とされる技術を確認することができる。

### 3. 研究の方法

副課題を以下のように設定し、計画的に研究を遂行した。それぞれの副課題は、他の副課題と物理的にも技術的にも密接な関係がある。

#### (1) 横型量子ドットにおける単一光子の検出

GaAs系 2次元電子にゲート電極で形成される横型量子ドットを使い、光子注入による量子ドット中の電子数の変化を、近接した量子ポイントコンタクトに流れる電流の変化として高感度に検出する。

#### (2) 横型量子ドットにおける光生成単一電子スピンの読み出し

単一光子検出法を発展させて、横型量子ドットにおいて円偏光した単一光子注入により生成された単一電子スピンの読み出しを行う。

#### (3) 量子ドットにおける光核スピンポンピング

核スピン揺らぎ磁場の低減のために、光学的電子スピン注入による光核スピンポンピングを使い、量子ドット中に大きな核スピン偏極を実現する。

(4) 結合量子ドットへの単一光子注入とスピンプロケードを利用した単一核スピン制御  
スピンプロケードと三重項状態—重項遷移を利用し、単一光子注入による単一核スピン制御を目指す。

#### (5) 自然形成InAs量子ドットにおける単一光子と光生成単一電子スピンの読み出しと緩和時間測定検出

InAs量子ドットを使って単一光子の検出と、光生成単一電子スピンの読み出しを行う。

#### (6) 時間分解光生成電子スピン歳差運動の測定

単一光子によって生成された単一電子スピンの歳差運動を検出し、アンサンブル平均としての位相緩和時間を測定する。

### 4. 研究成果

#### 光子 - 電子スピン変換のための量子ドット素子の作成

量子状態転写は単一の量子つまり単一光子と単一電子スピンの間で実現される必要があり、特に量子ドット中の単一電荷の検出には量子ポイントコンタクトを用いる必要がある。またこの量子ポイントコンタクトは光照射中に感度が維持できるよう極力光照射を避けなくてはならない。したがって量子ポイントコンタクトを備え、その量子ポイントコンタクトは遮光された量子ドット素子の作製法を確立した。

#### 3He 光学クライオスタットの導入と光学系の構築

スピン検出の研究を行なうために重要な低温・強磁場を実現する超伝導マグネット付 3He 光学クライオスタットを購入した。これにより単一光子が生成する単一電子スピンのスピン検出の実験が可能になり、光学窓からの光子の照射により偏光の制御や量子ドットへの集光など制御性の高い実験を行うため、光学系とともに電気伝導測定系の構築を進め、低温・光照射下での電荷検出の実験を達成した。

#### (1) 横型量子ドットにおける単一光子の検出

GaAs/GaAlAs ヘテロ構造上に作成した横型量子ドットを作製した。電荷読出用の QPC と微小開口を有する遮光マスクを備えたものである。この試料に微弱光 (780nm) を照射し、QPC の電流変化により単一光子が生成する単一電子の検出を試みた。光源には半導体パルスレーザを用い、光強度は QD に対する平均光子数が 1 光子 / 1 パルス以下となるよう調整した。電荷検出の実時間測定と単発パルス光照射を繰り返し行なうと、図 1 に示す

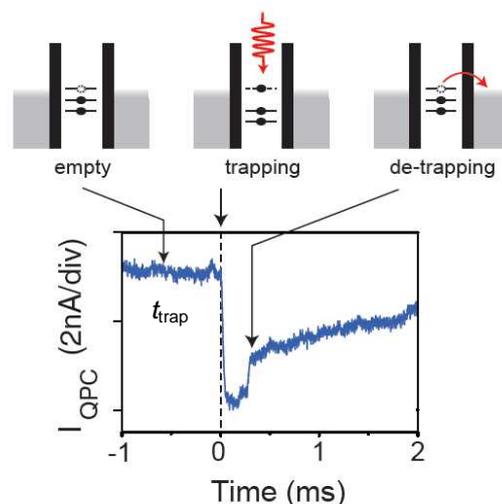


図 1 : 単一光子検出を示す QPC 電流の実時間測定

ように、パルス光照射時刻にちょうど QPC 電流に単一電子の電荷検出を示す信号が約 5% の確率で観測された。照射光強度依存性と量子ドットのトンネルレイト依存性から、この信号は単一光子によって生成された単一電子が QD に捕捉され離脱してゆく過程を実時間検出したものであることが確認できた。このとき時間分解能は  $50\mu\text{s}$  程度で、典型的なスピン緩和時間  $T_1$  よりも十分早く検出できている点は、今後のスピン検出やスピン情報操作にとって重要な点である。またトラップされた光生成電子をトンネル時間の制御により任意の時間のうちに光生成電子をリセットでき、電子スピン演算操作への拡張ができることを実証した。

## (2) 横型量子ドットにおける光生成単一電子スピンの読み出し

量子状態転写実現には、次の 3 つのステップを達成しなくてはならない。第一段階は、単一光子を量子ドット中の単一電荷へ変換する単一光子検出である。これは前述のとおり本研究で、スピン緩和時間内での単一光子の検出とそのリセットを達成した。第 2 段階は、円偏光した単一光子から対応するスピン方向の単一電子を生成しそれを検出することである。これは光子から電子スピンへの角運動量転写に相当する。そこで円偏光を持つ単一光子が励起する単一電子のスピン方向の検出を目指した。当初計画では高磁場で生ずるゼーマン分裂状態を利用した検出方法を提案していたが、ここでは 2 次元電子系に対して垂直磁場を印可した時に、電極に生ずる量子ホールエッジ状態を使った、光生成電子のスピン検出法を新しく考案し、その実証実験を行った。

試料は、単一光子検出実験と同じく GaAs/AlGaAs 2 次元電子上に形成された量子ドットで、近傍に電荷計として量子ポイントコンタクトを有する。適当な大きさの垂直磁場下では量子ドットに対する電極部である 2 次元電子系にスピン分裂エッジ状態が形成される。このときドットから電子がエッジ状態にトンネルする際に、その電子スピン方向に応じて、エッジ状態までの距離が異なるた

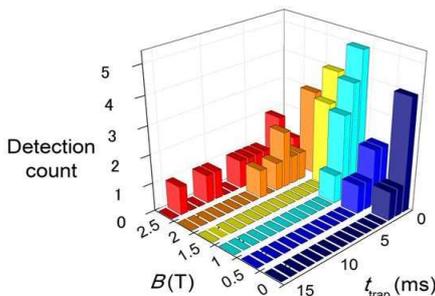


図 2 : 磁場下で測定した単一光子トラップ時間のヒストグラム。

め、トンネル時間にスピン依存性が生じると期待される。これを使うと単一光子によって生成され、量子ドットにトラップされた単一電子が量子ドットからのトンネル時間の差異でスピン方向を検出することができる。

そこで垂直磁場下で無偏光照射による単一光子検出を行い、光生成電子が量子ドット中にトラップされているトラップ時間を解析した。図 2 に示すように、スピン分裂エッジ状態が形成されている磁場よりも低磁場では、トラップ時間は 1ms 以下の比較的短い時間に分布しているが、エッジ状態が形成される磁場領域では 10ms 程度の長いトラップ時間が観測されるようになった。これはエッジ状態によるスピン依存トンネルが起こっており、この手法が光生成単一電子のスピン検出に有効であることを示している。これは今後の単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写への重要な成果である。今後は、この手法を確立し、単一電子スピンの検出や量子状態転写へと展開する。

(4) 結合量子ドットへの単一光子注入とスピンプロケードを利用した単一核スピン制御  
スピンプロケードを利用したスピン検出と核スピン転写を実現するため、遮光マスク付 2 重量子ドットの作製を本研究期間中に、ほぼ完了したので、今後、継続して単一光子検出とスピン検出を目指す。2 重量子ドットのスピンプロケード効果は、将来的な量子状態転写実現のための有効なスピン検出手段であることを、量子もつれ光子対を用いた、独創的な量子状態転写実験の提案と合わせて検討した。

## (5) 自然形成 InAs 量子ドットにおける単一光子と光生成単一電子スピンの読み出しと緩和時間測定検出

自己形成 InAs 量子ドットの直下に形成された狭窄伝導チャネルの電流を測定し、ドットの帯電を反映するつまり電荷検出と思われる信号を検出することができた。今後は確認実験とともに、光照射に対する応答を調べ、InAs 量子ドットによる単一光子検出の実現は今後の研究課題である。

研究分担者である樽茶教授らは人工原子として電子状態の制御性が高い GaAs 系縦型量子ドットの直下に量子ポイントコンタクトを作りこんだ構造を作成し、縦型量子ドットでの電荷検出に成功した。この成果は縦型量子ドットが今後量子情報処理技術において有用となるだけでなく、本研究の量子状態転写においても単一光子の検出や電子スピン検出など横型と同様に量子状態転写の研究を行なうことが出来る可能性が示された。

### 【その他の成果】

単一光子検出の実験において、2 段に変化する QPC 電流を検出した。これは 2 光子が量子ドットにトラップされていることを示唆し

ており、量子暗号分野で開発が望まれている光子数識別機としても本研究で提案した素子が、利用可能であるという新しい知見を得た。

また単一 InAs 量子ドットの輸送現象を測定する手法を開発し、その電気伝導について成果を上げてきた。特に超伝導電極からクーパ対をトンネルさせて量子ドット中で再結合により発光させることで、量子もつれ光子対を発生させるというアイデアを得、InAs 量子ドットへのクーパ対トンネルつまり超伝導電流の観測などの成果をあげた。

#### 【総括】

3年間の研究の本研究で、当初計画していた課題のうち、主要なものをいくつか達成し、主たる目的の大きな部分を実現することができた。特に(1) 横型量子ドットにおける単一光子の検出を達成し、ステップとして単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写である(2) 横型量子ドットにおける光生成単一電子スピンの読み出しのための読み出し方法の実証を達成した。これらは今後、単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写に向けて、研究を推進する上で重要な成果である。

また自己形成 InAs 量子ドットや GaAs 系縦型ドットでも単一光子の検出に必要な、量子ポイントコンタクトによる電荷検出を確立した。2 重量子ドットでは、単一光子とその角運動量転写実験までは実現できなかったが、量子もつれ光子対を用いた量子状態転写実現のための新しい実験法と組み合わせた提案を行った。

核スピンは長いコヒーレンス時間のため量子メモリとして重要であり、単一光子による核スピンの制御も今後、重要性は高まると思われる。本研究期間では顕著な成果を上げるには至らなかったため、今後、研究方法を見直し、研究を継続してゆく。

#### 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)

- 1.K Hitachi, A Inoue, A Oiwa, M Yamamoto, M Pioro-Ladriere, Y Tokura, and S Tarucha, Negative differential conductance in a quantum dot and possible application to ESR detection, Journal of Physics:Conference Series 150, 022026 1-4, 2009,有
- 2.S Takahashi, Y Igarashi, R S Deacon, A Oiwa, K Shibata, K Hirakawa, and S Tarucha, Quantitative evaluation of spin-orbit interaction in InAs quantum dots, Journal of Physics:Conference Series 150, 022084 1-4,

2009, 有

- 3.Y Kanai, R S Deacon, K Yoshida, K Shibata, K Hirakawa, A Oiwa, and S Tarucha, Observation of supercurrent in single InAs self-assembled quantum dots coupled to superconducting leads, Journal of Physics:Conference Series, 150, 22026 1-4 2009,有
- 4.K. Zaitzu, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Taruch, Vertical quantum dot with a vertically coupled charge detector, Applied Physics letters 92, 33101-1-4 2008,有.
- 5.Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Spin-half Kondo effect in a single self-assembled InAs quantum dot with and without an applied magnetic field, Physical Review B 76, 081303 1-4 R 2007, 有.

〔学会発表〕(計 23 件)

1. 大岩 顕, Alessandro Pioda, 浅山徹哉, 木山治樹, 藤田高史, Giles Allison, 樽茶清悟, GaAs 系量子ドットと量子ポイントコンタクトを用いた磁場下での単一光子検出, 日本物理学会 2009 年年次大会, 東京, 日本, 2009 年 3 月 27 日.
- 2.H. Kiyama, T. Fujita, T. Asayama, A. Oiwa, and S. Tarucha, Single photon to single electron conversion using a quantum dot, 2009 APS March Meeting, Pennsylvania, USA, March 16,2009.
- 3.R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Kondo effect and Andreev conductance in self-assembled InAs quantum dots contacted with superconducting and normal leads, International Symposium on nanoscale transport and technology, Kanagawa, Japan, January 21,2009.
- 4.S. Takahashi, Y. Igarashi, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Quantitative evaluation and tuning of spin-orbit interaction in InAs self-assembled quantum dots, International Symposium on nanoscale transport and technology, Kanagawa, Japan, January 20,2009.
- 5.R. S. Deacon, Y. Kanai, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Gate

- tunable proximity supercurrent in self assembled InAs quantum dots, International Symposium on nanoscale transport and technology, Kanagawa, Japan, January 20, 2009.
6. H. Kiyama, T. Asayama, A. Pioda, E. Totoki, A. Oiwa, and S. Tarucha, Real-time single-shot detection of single photons by a quantum point contact in a single quantum dot, International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT), Nara Japan, November 25, 2008.
  7. A. Oiwa, K. Hirakawa, and S. Tarucha (Invited), Spin-orbit interaction and Kondo-superconductivity interplay observed in single self-assembled InAs quantum dots, IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, Kyoto, Japan, October 20, 2008.
  8. T. Asayama, E. Totoki, A. Pioda, A. Oiwa, and S. Tarucha, Real-time single photon detection by quantum point contact in quantum dots, IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, Kyoto, Japan, October 20, 2008.
  9. K. Hitachi, A. Inoue, A. Oiwa, M. Yamamoto, M. Pioro-Ladriere, Y. Tokura and S. Tarucha, Negative differential conductance in a quantum dot and possible application to ESR detection, 25th International Conference on Physics of Low temperature (LT25), Amsterdam, Holland, August 12, 2008.
  10. S. Takahashi, Y. Igarashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Quantitative evaluation of spin-orbit interaction in InAs quantum dots, 25th International Conference on Physics of Low temperature (LT25), Amsterdam, Holland, August 12, 2008.
  11. Y. Kanai, R. S. Deacon, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, A. Oiwa, and S. Tarucha, Observation of supercurrent in single InAs self-assembled quantum dots coupled to superconducting leads, Supercurrent in single InAs quantum dots coupled to aluminium electrodes, 25th International Conference on Physics of Low temperature (LT25), Amsterdam, Holland, August 7, 2008.
  12. R. S. Deacon, Y. Kanai, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Supercurrent in single InAs quantum dots coupled to aluminium electrodes, 29th International Conference on Semiconductor Physics (ICPS2008), Rio de Janeiro, Brazil, July 31, 2008.
  13. A. Pioda, E. Totoki, T. Asayama, A. Oiwa, and S. Tarucha, Single photon detection by quantum point contact in a quantum dot, 29th International Conference on Semiconductor Physics (ICPS2008), Rio de Janeiro, Brazil, July 7, 2008.
  14. 大岩 顕, A. Pioda, 十時 詠吾, 浅山 徹哉, 樽茶 清悟, 電荷検出器を備えた横型量子ドットにおける微弱光応答実験, 日本物理学会第 63 回年次大会, 近畿大学, 大阪 2008 年 3 月 26 日.
  15. A. Pioda, E. Totoki, T. Asayama, A. Oiwa, and S. Tarucha, Single photon polarization to single electron spin conversion in a quantum dot: Preparatory measurements, 2008 Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop, Basel, Switzerland, January 6, 2008.
  16. 五十嵐 悠一, 中岡 俊裕, 渡邊 克之, 山本 倫久, 大岩 顕, 荒川 泰彦, 樽茶 清悟, 2 次元チャネルによる InAs 自己形成ドットのコンダクタンススペクトロスコピー, 日本物理学会第 62 回年次大会, 北海道大学・北海道, 2007 年 9 月 24 日.
  17. 十時 詠吾, Alessandro Pioda, 浅山 徹哉, 大岩 顕, 樽茶 清悟, 量子ポイントコンタクトによる光励起電荷検出の安定性, 日本物理学会第 62 回年次大会, 北海道大学・北海道, 2007 年 9 月 22 日.
  18. A. Pioda, E. Totoki, T. Asayama, A. Oiwa, and S. Tarucha, Photon polarization to electron spin conversion: Detection scheme, devices and experimental status, 日本物理学会第 62 回年次大会, 北海道大学・北海道, 2007 年 9 月 24 日.
  19. A. Souma, A. Oiwa, Y. Kitamura, T. Kodera, K. Ono, and S. Tarucha, Electrical Pump and Probe Measurements of Triplet-Singlet relaxation Dynamics in a Vertically Coupled Double Quantum Dot, 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS15), Tokyo, Japan, July 26, 2007.
  20. A. Oiwa, T. Kajiyama, K. Yoshida, K. Hirakawa and S. Tarucha, Kondo effect and tunneling magnetoresistance in a single self-assembled InAs quantum dot coupled to

ferromagnetic leads, 17th International Conference on Electron Properties of 2-Dimensional Systems (EP2DS), Genova, Italy, July 18, 2007.

21. A. Oiwa, C. Buizert, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Competition between Kondo correlation and superconductivity in a single InAs quantum dot coupled to superconducting leads, Modulated Semiconductor Structures (MSS13), Genova, Italy, 17, July 2007.

22. Y. Igarashi, M. Jung, M. Yamamoto, A. Oiwa, T. Machida, K. Hirakawa, and S. Tarucha, Observation of strongly anisotropic g-factor for a single self-assembled InAs quantum dot, 13th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-13), Genova, Italy, July 17, 2007.

23. A. Pioda, E. Totoki, A. Oiwa, and S. Tarucha, Preparation for Single Photon Polarization to Single Electron Spin Conversion in a Quantum Dot, 2007 Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST)workshop, Tokyo, Japan, March 30, 2007.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

大岩 顕

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号 10321902

### (2)研究分担者

樽茶 清悟

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 40302799

山本 倫久

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号 00376493

### (3)連携研究者

中岡 俊裕

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号 20345143

(平成 19 年度まで)