

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21244046

研究課題名(和文) 単一光子 単一電子スピン結合系における量子状態転写の研究

研究課題名(英文) Coherent transfer in single photon and single electron spin coupled systems

研究代表者

大岩 顕 (Oiwa, Akira)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：10321902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,700,000円、(間接経費) 10,410,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、量子ネットワークの構築や長距離通信を可能にする量子中継器の実現に向け、単一光子と量子ドット中の単一電子スピン間の量子転写に取り組んだ。まず理論提案に従って設計した量子井戸基板を使い量子ドットを作製してg因子を評価し、量子状態転写の条件を満たす量子ドットが実現できたことを明らかにした。このドットにおいて二重量子ドットの共鳴ドット間遷移を使った光生成単一電子検出を達成し、単一光子検出の信頼性を大きく向上させた。さらに2電子スピンのパウリ則と組み合わせて、識別度90%以上で光生成単一電子スピンを検出することに成功した。これらの成果により量子状態転写に向けて大きく前進した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have studied the coherent transfer from single photons to single electron spins in quantum dots towards constructing global quantum network and application to the quantum repeater enabling long distance communication. First, we have fabricated quantum dots using quantum well structures designed by obeying the theoretical proposal and characterized the g-factor of these quantum dots. Then, we have found that the quantum dots that satisfy the coherent transfer condition have been realized. In these quantum dots, we have demonstrated the single photoelectron detection using resonant interdot tunneling and significant improvement in the detection reliability. Moreover, by combining this single photon detection scheme to the Pauli rule in two electron system, we have successfully realized the detection of single photoelectron spin with high distinguishability more than 90%. These achievements offer great steps towards coherent transfer.

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 量子ドット 量子情報技術 光子-スピン量子インターフェース 回路量子電気力学

1. 研究開始当初の背景

量子情報に関する研究は、将来の高度情報化社会を担う情報処理の重要な課題として、長期展望に基づき各国で多角的に研究が進められている。これまで光子を使った量子暗号や固体量子ビットを使った量子演算の実証など、個別の物理系での基盤技術の研究が中心であった。特にこの数年、長いコヒーレンス時間で知られる量子ドット中の電子スピンを使った量子情報処理の研究に大きな進展があり、単一電子スピンの量子ビットとしての基本動作が研究分担者の樽茶教授らにより実現され [Pioro-Ladrie Nature Phys.08]、量子ゲート操作や多ビット化への展開が開けつつある。ここで単一電子と光子へ転写ができれば量子通信や量子メモリへの応用が可能になり、電子スピンの有用性は一気に拡大する。つまり異なる量子2準位系間でのコヒーレントな情報転写は、量子ネットワークの構築や長距離通信を可能にする量子中継器の根幹技術である量子インターフェースを提供することから、量子情報通信研究の発展に大きなブレークスルーを与える。そのため、様々な物理系を使い、その基礎研究と技術開発が急ピッチで進められている。光子の偏光状態からスピン状態への量子状態転写は、理論提案[Vrijen Phys.E01]があり、“アンサンブル”としての量子井戸での実験[Kosaka PRL08]で確認されている。しかし量子情報で不可欠な、単一量子間での転写は実現されていない。

共振器内と結合した2準位系の問題は、共振器量子電磁力学として知られる。この概念を超伝導導波路型共振器と超伝導量子ビットに適用して、光子と量子ビットの強結合状態や単一光子生成、遠隔2量子ビット結合、メーザー発振など目覚ましい成果が報告されている [Wallraff Nature04, Houck Nature07, Majer Nature07, Astafiev Nature07] が、半導体量子ドット中の電子スピンと共振器の結合は、まだ成功例は報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、量子計算機を構成する量子ビットの有力な候補である量子ドットを舞台に、単一光子の量子状態を単一の電子スピンの量子状態にコヒーレントに転写し蓄積する手法の確立と基礎物理の解明を目指した。量子状態転写とは、光子の量子状態を表す重ね合わせの係数を電子スピンの2準位系へ正確に写すことを意味する。これは量子インターフェースという量子通信の根幹技術であり、その開発は、デコヒーレンス、光電子結合強度、共振器ダイナミクスなど、物理として重要な課題を内包する。本研究提案では、以下の2つの研究課題を設定し、それぞれ目標の達成に取り組んできた。

(1) 量子ドット中の偏光選択励起による光子偏光 スピン量子状態転写

“単一光子”の持つ偏光状態を、半導体量子

ドット中の“単一の電子スピン”の量子状態へコヒーレントに転写し蓄積することを目指す。

まず単一円偏光光子から量子ドット中の単一電子スピンへの角運動量転写(インコヒーレント転写)を実証する。次に偏光の重ね合わせ状態から電子スピン状態への量子状態転写(コヒーレント転写)の実証実験を行う。本研究により、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や、光子から電子スピン又は核スピンを使って量子情報を蓄積する量子スピンメモリ、量子鍵暗号技術の信頼性を高める光子数識別器など、光-固体結合型量子情報システムを構築するための基盤技術を確認することができる。

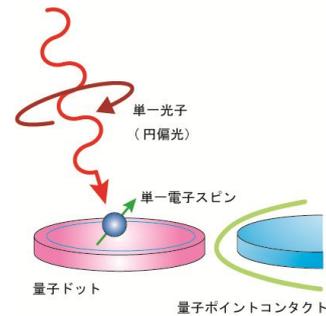


図1 単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写と電荷検出の概念図

(2) 超伝導共振器中の光子状態 電子スピン結合系の物理と応用

マイクロ波領域の共鳴周波数を持つ超伝導共振器中に半導体量子ドットを配置した素子を作製し、光子の共振器モードと半導体量子ドット中の電子スピンの結合の実現と光子 電子スピン量子もつれ状態の物理の解明を目指した。まず共振器 スピンの強結合系を実現し、電子スピン状態の量子非破壊読み出しや光子 電子スピン間での量子状態転写の実証を目指してきた。

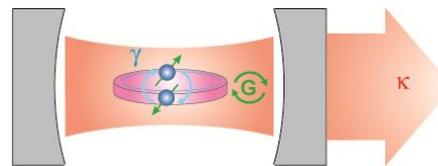


図2 共振器 - 量子ドットスピン結合の概念図

3. 研究の方法

(1) 量子ドット中の偏光選択励起による光子偏光 スピン量子状態転写

単一円偏光光子が生成する単一電子スピン検出

まず単一円偏光光子を入射し、GaAs 中のスピン選択則にしたがって励起された単一電子のスピン検出(角運動量転写)の実現を目指した。スピン検出には次の方法を試みた。

- 1) 磁場下で電極に生成されるスピン分裂端状態を利用するトンネル確率差選択法、
 - 2) 電子領域におけるスピン-三重項と三重項状態のトンネル時間差を用いる。
- これらと電荷検出法を組み合わせ、光生成単一電子が電極へトンネルする挙動の違いから、光生成単一

電子スピンを判定し、角運動量転写の実証を目指した。

併せて強磁場・極低温で集光した光と量子ドットの正確な位置合わせ(0.1 μm の精度)が可能な実験系の構築を行った。

2 重量子ドットにおける光子生成単一電子スピン検出

二重量子ドットにおける2電子状態のパウリ効果によるスピンプロックードはこれまで信頼性の高いスピン検出法として量子ドットのスピン制御の様々な実験に用いられてきた。そこでこれを光生成単一電子のスピン検出に応用する。2つの量子ドットの1つを電子が占有している状態に、光照射を行い、光生成単一電子を捕捉する。この電子スピンと元の電子スピンと平行の場合はパウリ則により、隣のドットへ遷移することができない。つまりこの電子移動とその時のドット間トンネル時間の長短によって光生成電子スピンを判定することができる。

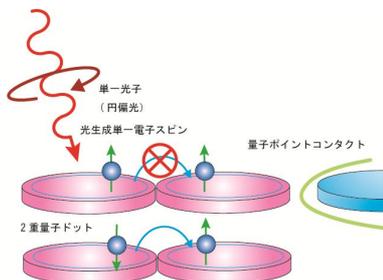


図3 スピンプロックードを使った光生成単一電子の検出

量子状態転写量子井戸素子の開発

量子状態転写の設計指針[Vrijen 01]に基づき、単一正孔状態から上向き/下向き電子スピンをコヒーレントに励起する遷移を可能にするため、g因子がゼロに近い量子井戸構造を設計した。高品質量子井戸基板は、カナダの National Research Council の G. Austing 博士や、ドイツポーフム大の A. Wieck 教授から提供を受けた。これらの基板を用いて量子状態転写素子として横型量子ドットを作製し、g因子の評価を行った。

光子数識別器

電荷計により1光パルスに含まれる複数個の光子を識別することで、量子状態転写横型量子ドット素子は量子暗号で有用な光子数識別器としても機能することを実証することを目指した。

単一光子・単一電子スピンコヒーレント転写の実証

前述の量子状態転写量子ドットを使って軽い正孔状態から励起することで量子状態転写の実現を目指す。電子スピン状態へのコヒーレントな転写を実証するためには、転写された電子スピンの電子スピン状態を表すブロッホ球上の全体で状態を測定するスピン状態トモグラフィ測定が必要である。そこで研究分担者が開発した傾斜磁場による電子スピンのコヒーレント回転操作[Nature

Phys.08]を組み合わせた量子状態転写の検証法の提案と実証を目指した。

自己形成 InAs 量子ドットのスピン軌道相互作用とg因子制御

InAs 量子ドットは大きなg因子や強いスピン軌道相互作用など興味深いスピン物性を持つ。当初は、InAs 自己形成ドットの電荷計の実現と光子検出を提案していたが、GaAs系の量子状態転写の研究が順調に進進したため、超伝導共振器と自己形成 InAs ドット中のスピンとの結合に重要なスピン軌道相互作用やg因子などの諸物性の解明に重点を置いた。

(2) 超伝導共振器中の光子状態 電子スピン結合の物理と応用

光子の電場と電子スピンを結合させる鍵はスピン軌道相互作用であり[Trif PRB08]、そのためスピン軌道相互作用が強い InAs 量子ドットを選択した。ミリメートルサイズの超伝導共振器 - 量子ドット結合系の作製と真空ラビ分裂の観測を目指してきた。本研究は超伝導共振器と超伝導量子ビットの研究で実績のある IBM Watson 研究センターの D. DiVincenzo 博士、M. Ketchen 博士、S. Kumar 博士らと共同で行なった。

順調に研究が進めば、1) 分散領域での量子2準位系の非破壊読み出しや、2) 電子スピンの重ね合わせ状態を保持した単一光子の生成とその検出による量子状態転写の実験と、3) 光子介在による共振器中の離れた量子ドット間交換結合の実験を行う。

4. 研究成果

(1) 量子ドット中の偏光選択励起による光子偏光 スピン量子状態転写

単一量子ドットにおける光生成単一電子とそのスピン検出

本研究の先行研究 基盤研究 B (18340081)において単一量子ドットと高感度電荷計を用いて、単一光子が生成する単一電子を電荷計で検出することに成功しつつあった。本研究で更に実験と解析を進め、磁場下で電極に形成されるスピン分離エッジ状態を使って光生成単一電子スピンを判定できることを明らかにし、論文として発表した[文献6]。

また2電子領域でのスピン-三重項と三重項状態のトンネル時間差を利用し、単一円偏光光子が生成する単一電子スピン検出を試みたが、低い光子検出効率のため統計的にスピン判定に十分な結果が得られなかった。

2 重量子ドットにおける共鳴ドット間遷移を利用した非破壊単一光子検出

スピン検出の信頼性向上に向け、2重量子ドットの2電子状態でおこるパウリスピンプロックードを利用するため、二重量子ドットのドット間共鳴トンネルを使った単一光子検出に着想した。ドット間トンネルを利用することで光生成単一電子捕捉による電荷信号は測定ノイズよりも十分大きくなり、明瞭な振動様の信号が得られるようになり、単一光

子検出の信頼性の向上することができた(図4)。また光生成電子は観測時に二重ドット中に留めておくことができる意味で、**非破壊検出**である。さらに2光子まで識別することができており、光子数識別でも有効な方法である。この成果は文献1で公表した。

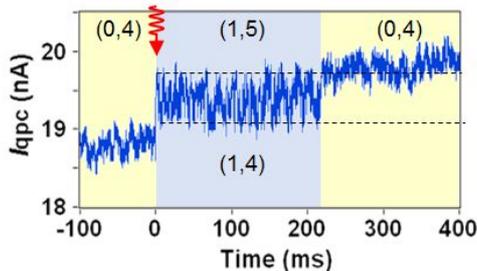


図4 共鳴ドット間遷移を利用した光生成単一電子捕捉の検出。中央の振動する信号が光生成単一電子の捕捉を示す。

量子状態転写量子井戸素子の開発

光子偏光 スピン量子状態転写には量子井戸2次元電子系に量子ドットを作製することが必要である。まずカナダとドイツで作製された量子井戸構造の2次元電子の特性とg因子の評価を行った。さらにスピン操作の微小磁石を備えた二重量子ドットを作製し、そのドットのg因子を評価することで、**量子状態転写が可能な量子ドットを開発**した。またこの量子状態転写量子ドットにおいてドット間共鳴トンネルを使った単一光子検出に成功した。

2重量子ドットにおける光子生成単一電子スピン検出(角運動量転写)

研究開始の早い段階で、従来のGaAs系単一ヘテロ基板上に光検出用遮光マスクを持つ二重量子ドットを作製し、パウルスピロケット効果を利用したスピン検出の実現を目指した。その結果、単一光子検出確率が、照射光の円偏光度に依存するという角運動量転写の予備的な結果を得た。ただし上述と同様に統計的にはデータが不十分で、角運動量転写の実証には、スピン検出の信頼性を向上させて再現性を確認する必要があることが明らかになった。

そこで上述のドット間トンネルを利用した単一光子検出と2電子のパウリ則を組み合わせることで信頼性の高い光生成単一電子スピン検出法の確立を目指した。その結果、**直線偏光照射により生成される単一電子スピンの方向を実時間でかつ高い信頼性で検出することに成功**した(図5)。この時、スピンの識別度は90%以上を達成できた。これは光子-電子スピンの量子状態転写の実現に重要な世界初の成果である[論文準備中]。円偏光照射による角運動量転写の実証は平成25年度からの現行の基盤研究(A)で継続している。

さらにこの量子状態転写量子ドットについて、励起波長を変え、**重い正孔と軽い正孔状態を区別して、量子状態転写に必要な軽い正孔からの励起による単一光子検出に成功**

した[論文投稿中]。これを使い量子状態転写が可能実験条件下で量子状態転写を試みるところまで達成できたが、その実証には至っていない。しかし以上のように最適な量子井戸構造、光生成単一スピン検出、軽い正孔からの励起など**量子状態転写に必要な技術要素を確立**することが出来た。

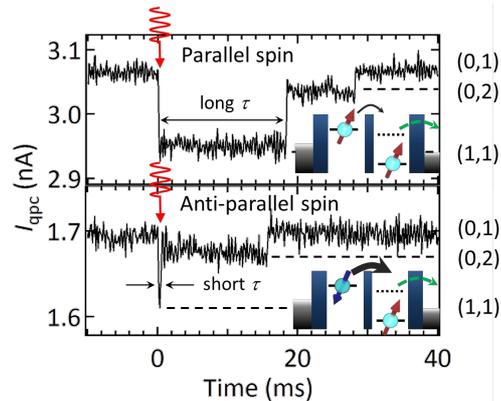


図5 磁場下、非共鳴状態での光生成単一電子のスピン検出。平行スピンの生成されるとパウリ則により長いドット間トンネルが起こる(上)。反平行スピンの場合、ドット間トンネルは早い(下)

(2) 超伝導共振器中の光子 電子スピン結合の物理と応用

超伝導共振器 - 電子スピン結合系の研究

本研究開始と直後にIBM Watson 研を訪問し、超伝導共振器の測定技術の習得を行った。それを基に、日本の研究室で、希釈冷凍機に高周波透過測定系を構築し、希釈冷凍機温度で単一光子レベルの入力-100dBmでの透過測定を実現した。その後、InAs自己形成量子ドットを含む超伝導共振器の研究を本格化し、共振器-量子ドット結合を示す真空ラビ分裂の観測を目指した。しかしGaAs基板における散逸や磁場によるQ値の低下などの問題点が明らかになり、共振器の改善を図った[文献7]

その後、スピン軌道相互作用が強いInSbナノワイヤー量子ドットも取り入れて、共振器中の量子ドット構造の大きな改善を図り、両者に静電的な結合があることを見出した。しかし**最終的に研究期間内に電子スピンと共振器との強結合を示す信号は得られなかった**。これはスピン軌道相互作用のみでは共振器-電子スピンの強結合領域に到達することが難しいためであると考えている。しかし強結合系を実現するための今後の方針として、微小磁石による磁場勾配を用いた方法を提案し、InSbナノ細線に対して素子設計を行い、それに基づいて実際に素子を作製した。

量子ドットにおけるg因子とスピン軌道相互作用の電氣的制御

共振器との結合の重要なパラメータであるInAs自己形成量子ドットのg因子やスピン軌

道相互作用について、電気伝導から定量的に算出するとともに、自己形成ドットの閉じ込め効果に起因する特異な3次元異方性を解明した [文献2,9]。さらにドット近傍に設けた**サイドゲート電極でスピン軌道相互作用やg因子の大きさと異方性を変調**することに成功するという、当初計画になかった成果を挙げることができた [文献2, 4, 5]。

本研究課題の遂行中、量子情報の長距離通信で不可欠なもつれ配信を実現するため、光子と電子スピン間で非局所もつれの生成を確認する実験を着想した。また同時期にスイスとアメリカのグループが、自己形成量子ドット中のスピンと放射された光子との間でもつれを確認した報告がなされるなど、もつれ状態生成実験に緊急性があるとの認識を強くした。そこで本研究で最終目的とする量子状態転写に加えて、光子電子スピン間のもつれ生成を新たに加えて研究課題を再構築し、最終年度前年度応募が認められ、平成25年から新たな基盤研究(A)(25246005)を遂行している。

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 9 件)

T. Fujita, H. Kiyama, K. Morimoto, S. Teraoka, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Non-destructive Real-time Measurement of Charge and Spin Dynamics of Photo-electrons in a Double Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. **110**, 266803 (2013).

DOI:10.1103/PhysRevLett.110.266803

S. Takahashi, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, “Electrically tunable three-dimensional g-factor anisotropy in single InAs self-assembled quantum dots”, Phys. Rev. B, **86**, 161302(R) (2013).

DOI:10.1103/PhysRevB.86.161302

Y. Kanai, R.S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa and S. Tarucha, “Controls of supercurrent in a self-assembled InAs quantum dot Josephson junction by electrical tuning of level overlaps”, Appl. Phys. Lett. **100**, 202109 (2012).

Doi:10.1063/1.4719072

R. S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Electrically tuned g tensor in an InAs self-assembled quantum dot”, Phys. Rev. B **84**, 041302(R) (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.041302

Y. Kanai, R.S. Deacon, S. Takahashi, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot”, Nature nanotech. **6**, 511 (2011). DOI:10.1038/nano.2011.103

A. Pioda, E. Totoki, H. Kiyama, T. Fujita, G. Allison, T. Asayama, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Single-Shot Detection of Electrons Generated by Individual Photons in a Tunable Lateral Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. **106**, 146804 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.146804

G. Allison, A. Oiwa, S. Kumar, D. P. DiVincenzo, M. Ketchen, K. Hirakawa, H. Takayanagi, S. Tarucha, “A superconducting resonator designed for coupling to spin based qubits in quantum dots”, J. of Phys.: Conf. Ser. **245**, 12024 (2010). DOI:10.1088/1742-6596/245/1/012024

Y. Kanai, R. S. Deacon, A. Oiwa, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, S. Tarucha, “Electrical control of Kondo effect and superconducting transport in a side-gated InAs quantum dot Josephson junction”. Phys. Rev. B **82**, 054512 (2010).

DOI:10.1103/PhysRevB.82.054512

S Takahashi, R. S. Deacon, K. Yoshida, A. Oiwa, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Large Anisotropy of the Spin-Orbit Interaction in a Single InAs Self-Assembled Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. **104**, 246801 (2010).

DOI:10.1103/PhysRevLett.104.246801

[学会発表](計 41 件)

T. Fujita, K. Morimoto, S. Teraoka, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa and S. Tarucha, “Real-time spin detection of single photo-electrons with a double quantum dot in a g-factorengineered quantum well”, 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS16), Wroclaw, Poland 1-5 July, (2013) (招待講演)

A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, “Interplay between proximity effect and Kondo effect in InAs self-assembled quantum dot Josephson junctions”, The Science of Nanostructures: New Frontiers in the Physics of Quantum Dots (QD2012) (招待講演), Chernogolovka, Russia, 10-14

Sept. (2012).

A.Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Electrically tunable spin-orbit interaction in self-assembled InAs quantum dots", The 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012)(招待講演), Zurich, Switzerland, 29 July-3 Aug. (2012).

K. Morimoto, T. Fujita, S. Teraoka, G. Allison, H. Kiyama, A. Oiwa, S. Haffouz, D. G. Austing, and S. Tarucha, "g-Factor Evaluation and Single Photon Response of a Single and Double Quantum Dot in a g-Factor Engineered GaAs/AlGaAs Quantum Well", The 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (招待講演), Zurich, Switzerland, 29 July-3 Aug. (2012).

A. Oiwa, Y. Kanai, R. S. Deacon, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, " ", The 7th International Conference on Quantum Dots (QD2012)(招待講演), Santa Fe, USA, 13-18 May (2013).

大岩 顕, "量子ドットにおける単一光子から単一電子スピンへの変換 Conversion from single photons to single electron spins in quantum dots", 日本物理学会第67回年会(招待講演), 大阪, 日本, 2012年3月24-27日.

A. Oiwa, "Electrically Tuned Spin Effects in a Self-assembled InAs Quantum Dot: Spin-orbit Effect, g-factor and Kondo Effect", BIT's 1st Annual World Congress of Nano S&T, Dalian China, 23-26 Oct. (2011).

A. Oiwa, R. S. Deacon, S. Takahashi, Y. Kanai, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, Y. Tokura and S. Tarucha, "Electrical Control of Anisotropic Spin-orbit Interaction in InAs Self-assembled Quantum Dots: Part 1 & Part2", Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2011), Suzhou China, 12-16 Sept., (2011).

A. Oiwa, R. S. Deacon, Y. Kanai, S. Takahashi, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Electrical tuning of g-tensor in self-assembled uncapped InAs quantum dots", 17th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON17)(招待講演), Santa Barbara USA, 25-29 August, (2011).

A. Oiwa, S. Tarucha, "Quantum

information conversion from single photons to single electron spin in quantum dots", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena QNSP, Tokyo Japan, 11th March, (2010).

H. Kiyama, T. Fujita, G. Allison, T. Asayama, A. Pioda, A. Oiwa, and S. Tarucha, "Detection of optically injected single electron charge and spin in a quantum dot using a quantum point contact", The 18th Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), Kobe Japan, 23rd July, (2009).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 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 0 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
<http://www.meso.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

樽茶 清悟 (TARUCHA SEIGO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 40302799

(3)連携研究者

平川 一彦 (HIRAKAWA KAZUHIKO)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号: 10183097