

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21102003

研究課題名(和文)半導体ナノ集積構造による量子情報制御・観測・伝送に関する研究

研究課題名(英文)Control, measure, and transfer the quantum information in semiconductor nanostructures

研究代表者

都倉 康弘(Tokura, Yasuhiro)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：20393788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 151,200,000円、(間接経費) 45,360,000円

研究成果の概要(和文)：1量子ビットのユニタリ演算と2量子ビットゲートを組み合わせた操作をスピン量子ビットにおいて初めて成功し、スピン回転操作の高速化を行い世界最高値を達成した。複数の電子を個別に制御する微小磁石対構造を設計し3スピンの独立コヒーレント操作に初めて成功した。InAs量子ドット素子中のスピン・軌道相互作用とg-因子テンソルの大きさを正確に見積もりその大きさがゲートにより制御可能である事を示した。トンネル結合量子細線と干渉計を結合させた系で伝播電子による“飛行量子ビット”の制御を固体中で初めて実現した。遠く離れた量子ドット間で表面弾性波を用いて単一電子を周囲から孤立させて移送する技術を開発し実証した。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded for the first time to demonstrate operations combining one-qubit unitary gate and two-qubit operation of spin qubits realized in quantum dot (QD) system. By improving device design, the world fastest x-rotation (127MHz) and z-rotation (50MHz) are achieved. We designed a micro-magnet structure that enable electron dipole spin resonance operations to individual spins in multi-QD array and succeeded in controlling three spins. In an InAs QD, the strength of spin-orbit interaction and g-tensor are precisely determined and controlled by gate. Combining tunnel-coupled quantum wires and an Aharonov-Bohm ring, the control of flying qubit is realized by the two-path interferometer. Using surface acoustic wave, single electrons are coherently transferred between distance QDs with success probability more than 90%. We developed wide-band capacitance measurement system to detect the signal related to spin triplet state in a coupled QD system.

研究分野：半導体物性、量子情報科学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：半導体物性 半導体超微細化 ナノデバイス 量子コンピュータ 量子閉じ込め

1. 研究開始当初の背景

1969年のL. Esakiの半導体超格子構造の提案以来、半導体量子構造を用いた電子波の制御技術は著しく発展した。高電子移動度を有するヘテロ構造作製技術やナノ構造作製を可能にするリソグラフィ技術の進展により、人工原子と呼ばれる量子ドットの電子状態が明らかになった。さらに量子力学的に許される重ね合わせ状態をつくることにより、電荷や電子スピン自由度を用いた量子ビットとして機能することが実験的に示された。

本計画研究班においては、半導体人工原子や人工分子の実現、電荷量子ビットや電子スピン量子ビットのコヒーレント制御、電気的ポンププローブ測定や高感度な電荷測定を用いた単電子カウンターなどに代表される観測技術が確立していた。

2. 研究の目的

本計画研究では、次世代の高度な量子情報システムを構築するため、半導体ナノ構造の集積化によって量子情報デバイスを作製し、量子状態の制御・観測・伝送技術を融合的に研究する量子サイバネティクスを推進し機能的な量子情報処理技術を確立することが目的である。1量子ビット・2量子ビットをコヒーレントに制御するだけでなく、本質的に避けることのできないデコヒーレンスを回避(エラー訂正)し、可干渉性の高い量子ビットを構築する(量子状態制御)。また、1量子ビットのシングルショット測定技術だけでなく、複数の量子ビットの量子相関を直接的に測定する相関測定技術を確立する(量子状態観測)。さらに、機能的な集積化のために量子情報をオンチップで効率的に伝送する技術を確立する(量子情報伝送技術)。これらの要素技術を集積化することにより、高性能な量子情報システムに発展することが可能になる。

上記の目的のため、下記の項目を掲げる。

【制御1】量子ビットの多量子ビット化をはかり、量子エラー訂正によるデコヒーレンスの回復技術を確立する。エラー訂正のためには3ビット化と2ビット間の量子もつれ制御が必要になる。現在までに、微小磁石による電子スピン共鳴法により、2重量子ドットを用いた2スピン量子ビット化に成功している。この技術を3重量子ドットに拡張し、3電子の独立スピン共鳴と読み出しを行う。さらに、隣接2ドット間の交換結合のパルス変調により量子もつれ制御を実現する。最近の研究で、デコヒーレンス要因は核スピンゆらぎであることが明らかになっており、揺らぎの積極的な抑制法とエラー訂正アルゴリズムを開発する。最終的には、エラー訂正型3ビットを単位とする量子ビット集積化の概念を提案する。

【制御2】g因子テンソルによるスピン状態制御の理論を構築し、デコヒーレンスが少なくかつ高機能的なスピン制御方法を開発する。

従来固体中の個々の電子スピンを制御する事は困難であったが、微小磁石やスピン・軌道相互作用を利用する事により電場によるスピン制御が可能となって来ている。これをさらに進めて半導体特有のヘテロ接合や核スピン等を利用しg因子を自由に制御した系でスピン制御の可能性を検討する。

【伝送1】電子は固体中を伝搬する際に多くの「環境」自由度と結合する事によりデコヒーレンスを受ける。この基本原理とそれを抑える方針を理論的に検討する。また量子干渉を制御する事により伝搬する電子をコヒーレントに制御する方法を検討する。

【伝送2】表面弾性波または量子ドット列の多段ターンスタイル操作による単一スピン伝送技術を確立する。表面弾性波によるポテンシャルの波に単一電子スピンを載せて、量子ドットから導波路を介して他のドットに伝送する手法と、導波路の代わりにドット列を用いて電子をドットからドットへ順次伝搬させる手法(ターンスタイル型伝搬法)を開発する。

【観測】電荷測定・容量測定の高周波化による高速量子ビット測定技術を確立し、2量子ビットのベル状態の測定技術を確立する。量子ポイントコンタクト(QPC)による電荷計で電荷情報や電子スピン状態を検出する手法を用いて研究を進め、また容量(キャパシタンス)を高速で検出することにより2電子スピン状態の相関検出を目指す。また、2量子ビット系の二次トンネルを利用してベル状態(4状態)を決定論的に読み出す手法を検討し、近似的ではあるが決定論的なベル測定を実現する。

3. 研究の方法

本計画研究では、半導体ナノ構造の集積化によって量子情報状態の制御、観測、伝送に関する研究を遂行するものである。

量子状態制御に関しては、微小磁石を用いた制御された磁場分布を利用した、電場駆動スピン共鳴(EDSR)と複数の電子スピンのアドレッシングを活用する。量子ビットのコヒーレント制御の手法に関する研究のみならず、原理的に避けることのできないデコヒーレンスを回避するための量子エラー訂正機能を実現することを大きな柱としている。電子スピン量子ビットの主なデコヒーレンス起源である核スピンゆらぎを抑制するとともに、3個の電子スピンによって1量子ビットを符号化することにより集積化可能な符号化スピン量子ビットを実現する。

量子状態伝送に関しては、オンチップで電子を伝送する技術を構築する。半導体量子情報デバイスでは伝送に関する研究が遅れていたが、量子ホール領域のエッジチャネル、表面弾性波ポテンシャル、量子ドット列による手法を平行して進めることにより、機能的な伝送技術の確立を目指す。

量子状態観測に関しては、電荷・スピン状

態をシングルショットで読み出す手法のみならず、2量子ビットの相関を検出するベル測定を実現することを目標とする。高速静電容量測定等を利用してベル測定やエンタングルメント状態の生成を実現する。

これらはGaAs系量子ナノ構造を主な材料として研究を進めるため、最終的に制御、観測、伝送の各機能を集積化することが可能であり、高度な量子情報システムへの指針を得ることが出来る。

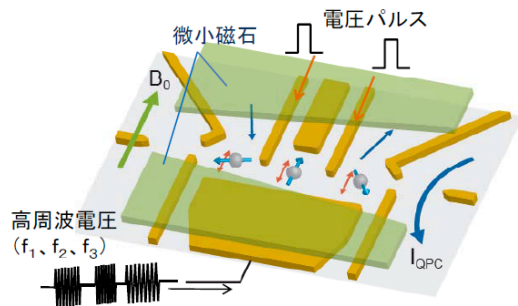


図1 3重量子ドットを用いた3ビットの構成図。ドット上にある微小磁石と高周波電圧を用いて各ドット中の電子のスピンを、それぞれ異なる周波数 (f_1, f_2, f_3) で回転させる。

4. 研究成果

[制御1] 任意の量子演算を行うには、1量子ビットのユニタリ演算と2量子ビット間の制御NOTゲート操作が実現できれば良い。このそれぞれの演算に関しては既に実験の報告があるが、スピン量子ビットにおいてこれを組み合わせた操作に成功した例は未だ無かった。今回制御NOTゲートを実現する為に必要なSWAP^{1/2}ゲートと電場駆動電子スピン共鳴(EDSR)による1量子ビットを組み合わせたコヒーレント制御に初めて成功した。2量子ビット演算はバイアスパルスにより制御されたスピン間の交換相互作用 J_0 の印可時間で決定され、 π パルスではSWAP演算、 $\pi/2$ パルスではSWAP^{1/2}ゲートが実現する。最初積状態であった2量子ビットが「量子もつれ」状態となる様子を近傍に設置した電荷計を用いて確認した。またRamsey法とEcho法によるデフェーシング時間 T_2^* とデコヒーレンス時間 T_2 を決定した。

微小磁石の設計を行い、スピン回転操作の高速化とゲート忠実度の改善を行い、全ての論理演算に使われる x, z 軸周りの回転について世界最高値を達成した (x 回転:127MHz、 z 回転:50MHz、忠実度>95%)。 z 軸周りのスピン回転は不均一磁場を用いた独自の提案である。電子スピン回転操作を高速化した結果として、核スピンとの相互作用の減少が予測される。ラビ振動を精査する事により、ラビ振動の初期シフトの消失とラビ振動強度の時間-離調面でのシェブロン型パターンの出現を観測したことから、核スピンの影響が無

視できるという証拠を得た。強強度のマイクロ波によりスピンのラビ振動数はマイクロ波の振幅に対し非線形な依存性を持つ事が明らかになった。この原因としては量子ドット閉じ込めポテンシャルの非放物性と磁場勾配の非線形性が考えられる。

3つ以上の量子ドット列中の電子に対して、個別に電子スピン共鳴型量子ビットを実現できる微小磁石対構造を設計した。微小磁石法によって、設計上25ビット程度までビット数を拡張できる。微小磁石と組み合わせることが可能な横型3重量子ドットを作製し、(図1)3ドットの理想的な(1,1,1)電子状態とスピンプロックードを確認し、3スピンの独立コヒーレント操作に初めて成功した。以上により3量子ビット誤り訂正実験の準備が整った。さらに4重量子ドットを作製し、4ビット化に必要な(1,1,1,1)電荷状態(各ドットに1電子)を実現し、4ビット化の目処を付けた。

また表面コード対応の2次元的ドット配置のため必要な浮遊ゲートによる遠く離れたドット間結合技術を開発し、ゲートの狭窄による2次元チャンネルを用いて結合を確認した。

ユニバーサルな世界最高速の量子ビット操作による核スピンの影響の抑制、3重量子ドットでの独立コヒーレント操作、4重量子ドットでのビット化に適した電荷状態などは、いずれも初めての実現例であり、世界の関連研究へのインパクトは大きい。

今後は3重量子ドットにおける各量子ビットの性能 (x 回転ゲートとSWAPの時間)を評価し、誤り訂正などの基本アルゴリズムを実証する予定である。

[制御2]不均一な磁場が印可された(または異なる g 因子を持つ)直列2重量子ドットの共鳴トンネル電流をプロット方程式の方法で調べた。クーロン相互作用とスピン選択則の相乗効果による「スピントルネック効果」が期待される。この現象を実験的に詳細に調べる事により二つの量子ドットが異なる g 因子(0.33, 0.89)を持つ事を確認した。しかし磁場の向きが非平行か系が g 因子テンソルで記述される場合はこのスピン選択則が破れる。その結果共鳴トンネル電流ピークの構造が不均一磁場により系統的に変化することを見いだした。

量子ドット中のスピンを振動電場により制御する為には、微小磁石や強いスピン・軌道相互作用(SOI)が必要である。今回SOIの強いInAs量子ドット素子に直接2端子電極をつけ、電極間を流れる電流の励起スペクトルを調べる事により、SOIが外部磁場の方向に対して大きな異方性を持つことを見出した。基底状態の電子スピンの向きと第一励起状態のスピンの向きは外部磁場と平行で、それぞれ反対を向いている。特定の磁場領域では二つの状態のエネルギーが接近し、「反交差」するが、この反交差の幅がSOIの大き

さを特徴づける。この反交差の大きさの印加磁場方向依存性を調べると特定の方向で完全に反交差が消失している事が分かる。本研究により、半導体量子ドット中のSOIの大きさを正確に見積もる事が可能になり、さらにこの相互作用の大きさが制御可能である事を示した。さらにInAs量子ドットにおいて、g-因子テンソルをゲートにより制御可能である事を示した。

二重量子ドットのパウリスピン閉塞条件において超微細相互作用により核スピンを偏極させるプロセスを定量的に議論する枠組みを構築した。また環境と結合した量子ビットが位相コヒーレンスを部分的に失う過程を一般的に調べ、特に電荷計による電荷測定との反作用を定量的に評価した。

[伝送 1] 並列二重量子ドットの伝導特性をスレーブボゾン法により解析しスピン相関とショットノイズ特性を明らかにした。またスピン流の生成と検出を目的としてSOIによる量子ネットワークを提案し、これを用いてスピンフィルターが実現することを示した。またQPCにおいて零磁場でスピン偏極した状態を作り出せる事を見いだした。磁場やトンネル強度、位相を断熱的に変調させる事により電流・スピン流を誘起するプロセスを理論的に解明した。

[伝送 2] トンネル結合量子細線とアハロノフボームリングを結合させて純粋な2経路干渉計を実現し、伝播する電子がどちらの経路に存在するか、という量子情報をゲート電圧によって制御した。これは、伝播電子によって量子情報が運ばれる“飛行量子ビット”の制御を固体中で初めて実現した実験である。また量子状態は、素早く (~100GHz) 制御され、遠くまで (~100 μm) コヒーレントに伝送されることを確認した。

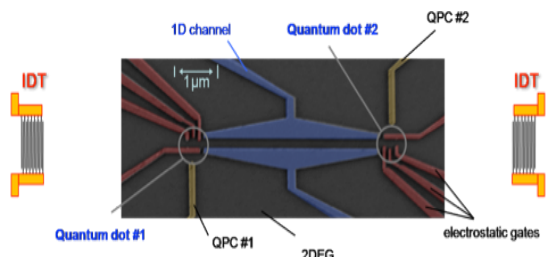


図2：遠く離れた量子ドット間での単一電子移送に用いられた試料。IDTは表面弾性波発生器。

遠く離れた量子ドット間で、単一電子を周囲の電子から孤立させて移送する技術を開発した。具体的には、図2のように二つの量子ドットを空乏化した一次元チャンネルで繋ぎ、左側から表面弾性波 (SAW) を送った。その結果、左側の量子ドット中の単一電子がSAWによる“動く量子ドット”にトラップされ、空乏化した一次元チャンネルを通して右側の量子ドットまで運ばれる。この量子ドット間の単一電子移送を統計的に評価し、約90%の確率で単一電子移送に成功していること

を確認した。単一電子移送中のコヒーレンスが、少なくとも40%以上の確率で保たれる事を確認した。干渉の可視度を50%以上にできればスピンのコヒーレンスも確実に証明できる。またSOIによる電子スピン制御と組み合わせる事も考慮して、スピン二重項の2電子を別々の動く量子ドットへと分離して非局所量子もつれ状態を生成する実験に取り掛かった。この方法によって、単一電子スピンをコヒーレントに長距離伝送することが可能になり、導波路を介して量子ドット間を結ぶ量子ネットワークを形成する事が可能となる。

[観測] 単一電子スピンの検出はスピンの持つ磁気モーメントとプローブとの相互作用が極めて弱い為に技術的に困難だが、スピン状態を電荷状態に転写する事により、電荷計を用いて単一スピン状態の読み出しが可能である。これまでの検出法は破壊測定である点やスピンの回転のみを検出して向きが決定できないなど問題があった。今回微小磁石を集積化した傾斜磁場下二重量子ドットで、マイクロ波とQPCによる電荷計を用いた非破壊スピン射影測定に初めて成功した。

二重量子ドットを用いた電荷量子ビットの確度を上げることを目指して、1電子のみを含む二重量子ドットを作製し、パルス電圧を印加して1電子状態のコヒーレント振動を観測した。印加パルス波形を変化させながら電荷コヒーレント振動の測定を行い、パルス波形を考慮した数値計算により解析した。また電荷量子ビットの測定手法に関して検討を行い、以前から行ってきた電流測定法に加えて、QPCによる電荷測定法を新たな量子ビット測定技術として試みた。QPCによる電荷測定を用いても明瞭なコヒーレント振動を観測できることを示した。またエネルギー反交差を2回通過させることによって生じるLandau-Zener-Stueckelberg (LZS) 量子干渉に起因する信号強度の増大を見いだした。パルス波形を意図的に変形させて干渉効果が大きくなる条件にすると、さらに信号強度が増大する。

半導体二重量子ドット中の軌道状態 (結合・反結合軌道) やスピン状態 (2スピン系における一重項・三重項) を高感度に検出する手法として、エネルギー分散の二階微分に対応する信号を検出できる広帯域キャパシタンス測定技術を開発した。二重量子ドット近傍に作りつけたQPCにおいて高周波の変調測定機能を付加することにより、量子ドット中の電荷移動に伴うキャパシタンス (インピーダンス) の変分をQPCで検出している。二重量子ドットのトンネル結合領域ではドット間の量子力学的なトンネル結合を反映した量子キャパシタンスを測定した。1電子領域ではキャパシタンス信号が周波数に対して単調に減少するのに対し、2電子領域では二段階に減少する。これはスピン三重項状態に電子が入ることに起因していると考えら

れる。

半導体量子ドットにおいて電荷ノイズはデコヒーレンスの要因の一つである。ウェハの構造やプロセス方法を変えてQPCを作製し、QPC電流に現れる電荷ノイズを評価した。ゲート電圧が-0.5Vより深い領域で指数関数的に増加するノイズは、ゲートからトラップサイトへのホッピングに起因している。今回そのようなノイズ特性はウェハ固有の問題ではなく、デバイス作製プロセスに起因することを明らかにした。またウェハに超格子構造を入れると、プロセス起因によるノイズの増加を押さえる事が出来る事を見いだした。

今後は新しい試料を用いて量子もつれした2電子の分離を行う。これが達成されたら、ベル測定用の試料を改めて設計、作製し、非局所量子もつれの検証を目指す。

[領域内共同研究]

量子サイバネティクスの実現には異なる学問分野との融合的研究が重要である。本計画研究は領域内の他研究者との共同研究を積極的に押し進めた。具体的には、①(占部グループ)微小磁石を用いた大きな磁場勾配の実現は、イオントラップ量子ビット系の相互作用制御に有用である事から、磁場勾配の設計に協力し実験的に実現したイオンを用いて実際の勾配の大きさと向きを確認した。②(内海：公募研究)量子ドットを介した伝導において、浮遊電極は位相緩和をもたらす事が知られている。今回この浮遊電極が電流相関(キュムラント)にどのような影響を与えるかについて系統的に調べた。特に電流端子間に温度差がある場合の熱伝導において普遍的な「ゆらぎの定理」が成立する事を示した。③(水落：公募研究、仙場：超伝導G連携研究者)異種の量子系の特徴を生かしたハイブリッド系は量子サイバネティクスの大きな特徴となる。ダイヤモンドNV中心は光学的特性と室温においても高いコヒーレントを保つ電子スピン・核スピン量子状態を持つため注目されている。超伝導磁束量子ビットとこのダイヤモンドNV中心を結合させる事により、量子状態のSWAP操作が可能である事を初めて示した。

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62件)

- ① Y. Utsumi, O. Entin-Wohlman, A. Aharony, T. Kubo and Y. Tokura, “Fluctuation theorem for heat transport probed by a thermal electrode”, Phys. Rev. B **89**, 205314 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.89.205314
- ② K. Hitachi, T. Ota, and K. Muraki, “Intrinsic and extrinsic origins of low-frequency noise in GaAs/AlGaAs Schottky-gated nanostructures”, Appl. Phys. Lett. **102**, 192104 (2014) 査読有 DOI: 10.1063/1.4806984
- ③ T. Fujita, H. Kiyama, K. Morimoto, S. Teraoka, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Nondestructive Real-Time Measurement of Charge and Spin Dynamics of Photoelectrons in a Double Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. **110**, 266803 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.266803
- ④ S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Teraoka, S. Tarucha, J. A. Gupta, and D. G. Austing, “Two- and Three-Electron Pauli Spin Blockade in Series-Coupled Triple Quantum Dots”, Phys. Rev. Lett. **110**, 016803 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.016803
- ⑤ R. Sakano, Y. Nishikawa, A. Oguri, A. C. Hewson, and S. Tarucha, “Full Counting Statistics for Orbital-Degenerate Impurity Anderson Model with Hund’s Rule Exchange Coupling”, Phys. Rev. Lett. **108**, 226401 (2013) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevLett.108.226401
- ⑥ M. Yamamoto, S. Takadal, C. Bauerle, K. Watanabe, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Electrical control of a solid-state flying qubit”, Nature Nanotech. **7**, 247 (2012) 査読有 DOI: 10.1038/NNANO.2012.28
- ⑦ T. Hatano, T. Kubo, Y. Tokura, S. Amaha, S. Teraoka, and S. Tarucha, “Aharonov-Bohm Oscillations Changed by Indirect Interdot Tunneling via Electrodes in Parallel-Coupled Vertical Double Quantum Dots”, Phys. Rev. Lett. **106**, 076801 (2011) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevLett.106.076801
- ⑧ X. Zhu, S. Saito, A. Kemp, K. Kakuyanagi, S. Karimoto, H. Nakano, W. J. Munro, Y. Tokura, M. S. Everitt, K. Nemoto, M. Kasu, N. Mizuochi, and K. Semba, “Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond”, Nature **478**, 221 (2011) 査読有 DOI:10.1038/nature10462
- ⑨ R. Brunner, Y. -S. Shin, T. Obata, M. Pioro-Ladriere, T. Kubo, K. Yoshida, I. T. Taniyama, Y. Tokura, and S. Tarucha, “Two-Qubit Gate of Combined Single-Spin Rotation and Interdot Spin Exchange in a Double Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. **107**, 146801 (2011) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.146801

- ⑩ 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) 査読有 DOI: 10.1038/NNANO.2011.103
- ⑪ S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. D. Wieck, L. Saminadayari, C. Bauerle and T. Meunier, “Electrons surfing on a sound wave as a platform for quantum optics with flying electrons”, *Nature* **477**, 435 (2011) 査読有 DOI:10.1038/nature10416
- ⑫ Y.-S. Shin, T. Obata, Y. Tokura, M. Pioro-Ladriere, R. Brunner, T. Kubo, K. Yoshida, and S. Tarucha, “Single-Spin Readout in a Double Quantum Dot Including a Micromagnet”, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 046802 (2010) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.046802
- ⑬ 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) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.246801

[学会発表] (計 196 件)

- ① S. Tarucha, “Generation and Detection of Quantum Coherence and Entanglement with Quantum Dots”, Workshop on Interferometry and Interactions in Non-equilibrium Meso- and Nano- Systems, Apr. 8 (2013) Trieste, Italy.

[図書] (計 1 件)

- ① S. Tarucha and Y. Tokura, “Control over single electron spins in quantum dots”, *Comprehensive Semiconductor Science and Technology (SEST)*, ed. Pallab Bhattacharya, Roberto Fornari and Hiroshi Kamimura, Elsevier (2011), (全 6 巻、総ページ数 3,608 ページ) Vol. **2**, pp.23-67.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

都倉 康弘 (TOKURA, Yasuhiro)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：20393788

(2) 研究分担者

太田 剛 (OTA Takeshi)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号：30463623

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

山本 倫久 (YAMAMOTO Michihisa)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：00376493

藤澤 利正 (FUJISAWA Toshimasa)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：20212186