

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19104007

研究課題名（和文）量子ドット・細線の量子コヒーレンスの検出と制御に関する研究

研究課題名（英文）Detection and manipulation of quantum coherence in quantum dots and wires

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：個々の電子の量子力学的性質を正確に制御できれば、固体量子物理の学術と情報処理への応用の両方に新概念を提供できる。本研究では、半導体量子ドット、細線を用いてその基礎研究を行った。ドット中の電子スピンの量子力学的性質を利用した情報単位と演算の実現、超伝導効果を含めた種々のスピン効果の電気的制御、量子細線中の電子波の量子コヒーレンスの電気的制御など、上記概念の原理確認に初めて成功した。これにより量子コヒーレンスの制御と物理の進展に大きく貢献した。

研究成果の概要（英文）：Precise control of quantum mechanical properties of individual electrons may offer new concepts of solid-state quantum physics as well as applications to information processing. We have used semiconductor quantum dots and quantum wires to experimentally study the fundamental physics. We have realized quantum bits and logic gates with single electron spins in quantum dots, electrical control of the spin effect including superconducting effect, and electrical control of electron wave propagating in quantum wires. These are all first experimental demonstrations linked to the new concepts described above. These studies will largely promote science and technology of quantum coherence control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	20,500,000	6,150,000	26,650,000
2008年度	20,400,000	6,120,000	26,520,000
2009年度	16,400,000	4,920,000	21,320,000
2010年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2011年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
総計	77,200,000	23,160,000	100,360,000

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：量子ドット、量子細線、量子コヒーレンス、超伝導接合、観測問題

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体ナノ構造を用いて電子の自由度を厳密に制御できるようになり、それを積極的に応用する「量子情報」の研究が進展していた。その中で、我々は量子現象の制御と検出に関して先駆的な役割を果たしてきた。本

課題の直接関係する具体的な背景としては以下の通りである。

（1）量子ドットの単一スピン磁気共鳴（ESR）はコヒーレンスを端的に反映する現象で、量子情報への応用が注目されているが、まだ成功例はない。

(2) クーパ対、強磁性ともにスピンの確定した系であり、これらの多粒子相関と近藤一重項との競合は基礎物理として興味深い、理論と比較できる系統的かつ定量的な研究はこれまでない。

(3) コヒーレンスを人工的に破る観測問題は、デコヒーレンスや量子もつれ制御に直接関わる重要な課題でありながら、その解決へ向けた研究がほとんど行われていない。

2. 研究の目的

本研究は、単一の量子（電荷、スピン）と相関を高精度に制御し、その結果発現する現象を観測・解明、その延長として量子情報の物理と技術に貢献することを目的とする。

(1) 量子ドット中の単一電子の磁気共鳴制御法と量子ビット操作、量子もつれ操作を実現し、量子コヒーレンスの物理を探求する。

(2) 量子ドットのスピン-軌道相互作用を明らかにするとともに、超伝導・強磁性と近藤状態という代表的な多体効果の競合の物理を解明する。

(3) 局所的にデコヒーレンスを与えることができ、観測問題の解決に適した系として、新たに開発する飛行電荷量子ビットと近藤状態にある量子ドットに焦点を当て、量子状態の“観測”の影響を解明する。

3. 研究の方法

(1) 単一スピンの量子コヒーレンスでは、傾斜磁場を利用した ESR を実現し、さらに、そのパルス制御により独立の 1, 2 量子ビットを実現する。2 量子ビットのスピン回転とスピン交換結合の組み合わせにより、量子もつれ操作を実現し、量子ゲートの基本性能を評価する。また、同様な傾斜磁場の応用として、新型のスピン読み出し、量子ゲート操作を開発する。これらのスピン量子操作実験、また結合ドットの AB 効果実験などを通して、量子コヒーレンスを評価し、制限要因を調べる。

(2) 近藤コヒーレンスと超伝導・強磁性の競合では、まず通常金属電極を有する InAs 量子ドットについてスピン-軌道相互作用と近藤効果の関係を明らかにする。次に超伝導電極または強磁性電極に試料について、前者は、近藤効果と超伝導効果の競合や多重アンドレーエフ反射の実証、後者では、近藤共鳴の分裂や局在スピン遮蔽の不足による近藤効果の抑制など理論予測の検証を行う。

(3) 観測による電荷状態の量子コヒーレンスの破れに関しては、結合量子細線における飛行電荷量子ビットの制御技術を開発する。その上で、隣接した量子細線による観測の影響を調べる。電子スピン状態の量子コヒーレンスに関しては、近藤状態にある量子ドットに注目し、これに近接して配置された量子ポ

イントコンタクトによる観測の電子スピン状態への影響を評価する。

4. 研究成果

(1) 電子スピン回転の基本概念は ESR であるが、問題は局在する 1 個の電子を操作する点にある。本研究では、その解決策として微小磁石を用いる方法を提案し、確認実験に成功した。この方法では、量子ドットの近傍に配置した微小磁石が作る傾斜型の洩れ磁場の中で、電子位置を微小に振動させることにより電子 1 個の ESR を行う (図 1 ab)。2 次元電子ガス中に表面ゲートで閉じ込めた 2 重量子ドットを作成し、その直上に微小 Co 磁石を置く。洩れ磁場は、ドットの中心を原点として、面内 z 方向正 (負) の向きに行くにつれて面直 x 方向の磁場成分が線形に増大 (減少) する (磁場勾配は約 $0.7\text{T}/\mu\text{m}$)。このドット横に設けた高周波専用電極に高周波電圧を加えるとドット中の電子は振幅 10nm 程度で x 方向に振動する。図 1c は実験結果で、明瞭な 2 本の ESR ピークが観測されている。

(Nature Phys. 2008, 日経産業・日刊工業新聞掲載) なお、ESR 観測には、2 重ドットのスピンプロケードを利用した。また、実験では他の方法に比べて小さな振動電場でスピン回転が可能である事、試料構成を工夫することで、多ビット化にも適することを確認した。(Appl. Phys. Lett. 2010) この磁石法は画期的な方法として世界的に評価されている。

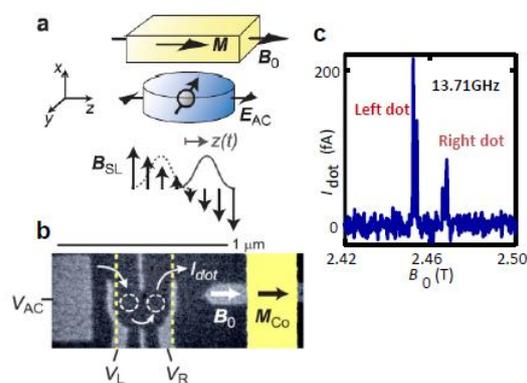


図 1a 量子ドット ESR の動作原理 b デバイス写真 c 各ドットの電子に対する ESR 信号 I_{dot} .

(2) (1) に続いて、電子振動をパルス操作することにより、スピン回転 (ラビ回転) の制御に成功した。これにより独立 2 量子ビットを初めて実現した。スピン回転と交換操作を組み合わせる量子もつれ状態を変調、検出する方法を提案、実証した (図 2)。(Phys. Rev. B 2010, Phys. Rev. Lett. 2011, 日経産業・日刊工業新聞掲載) この操作におけるスピン回転のゲート忠実度は 50% 、SWAP 忠実

度は 98%程度であることを評価した．この実験により、量子ドットスピンを用いた量子演算の有効性を初めて実証できた．

また、同様なゲート操作を利用してラムゼー、エコー測定を行い、デフェーシング時間 $T_2^* \approx 100\text{ nsec}$ 、デコヒーレンス時間 $T_2 \approx 3\text{ }\mu\text{sec}$ を得た．これらは、従来の報告値より 5~10 倍大きい．

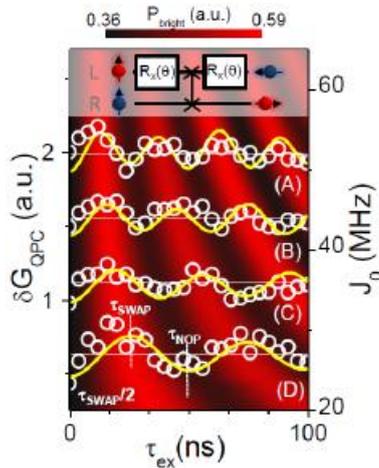


図2 スピン回転とスピン交換の組み合わせによる2ビットゲート実験．交換結合の操作時間 τ_{ex} に対してコンダクタンス信号 δG_{QPC} が周期的に変わるのは、もつれ状態の程度が周期的に変わっていることに対応する．その周期は交換結合 J_0 が大きくなるほど短い．いずれも理論予測に合致する結果である．

(3) 微小磁石を利用した、非破壊的で、両方の向きを判定できるスピン読み出し法を開発した．原理としては、微小磁石を利用して、2つのドットにかかるゼーマン磁場に差を付けておき、ここにマイクロ波を印可してドット間でスピンを保存する共鳴トンネルを誘起する．ゼーマン磁場の差を反映して、上向きスピンと下向きスピンの共鳴周波数が異なるので、この周波数差によってスピンの向きを判定できる．また、共鳴トンネルではスピンの向きが変わらないので、非破壊的にスピンを読み出すことができる．実験は、この原理に沿って行い、両方のスピンを読み出すことに成功した (図3)．(Phys. Rev. Lett. 2010) 従来にない強力なスピン読み出し法の実現であり、今後の発展が見込まれる．

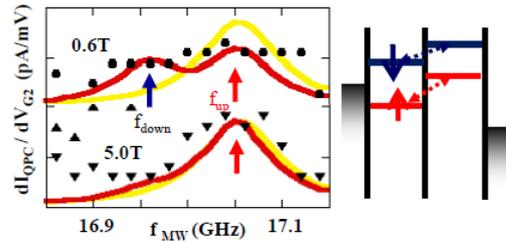


図3 非破壊両向きスピンの読み出し実験．各ドットのゼーマンエネルギーの差を反映して上向き、下向きスピンのドット間遷移エネルギーが異なる (右図 赤と青)．実験では、低磁場では、ゼーマンエネルギーの差が小さく両方の向きのスピン占有が起こるので、それぞれの ESR ピークが見られる．高磁場では、低エネルギーの上向きスピンが主に占有するのでそれに対応する ESR ピークが見られる．

(4) 電子スピンのデフェーシングの要因である、核スピンの問題に関して、動的核スピン偏極の電気的な制御法を実現した．核スピン偏極は、電子スピン1重項と3重項の縮退点でスピンフリップ速度が増大することにより加速される．この縮退をドット間のポテンシャル差 (= 離調) を電圧で調整する方式を開発し、電気的手法としては最大となる 40-50% の偏極率を達成した．(Phys. Rev. Lett. 2010) さらに、この知見、及びスピン交換結合エネルギーと上記の離調との関係に基づき、核スピン揺らぎの抑制について 1重項-3重項共鳴の近傍に適当な領域があることを指摘した．(Phys. Rev. Lett. 2009)

また、上記縮退点には、3重項のスピン z 成分が $+1$ 、 -1 の2種類ある．これを適当に選択することにより、核スピン偏極の向を正負に変えられることを実証した．これにより新しい核スピン偏極の制御法を提供できた．(Phys. Rev. Lett. 2007)

(5) InAs ドットを用いてジョセフソン接合を作製し、初めて超伝導電流を観測した．臨界電流は、ゲート電圧つまり伝導度に依存して増減し、特に奇数電子数領域で強く抑制されるというパリティ効果を見出した．

また、サイドゲートを近傍に持つ同ジョセフソン接合を開発し、近藤効果の電気的制御に成功した．これを利用して近藤温度と超伝導電流特性の関係の詳細を調べ、近藤温度が低く、超伝導ギャップとの比が 1.1 以下の場合には、超伝導電流は強く抑制されることを観測した．これは磁気的二重項基底状態により接合が π 的であることを示唆する．一方、同比が 1.1 以上の場合には超伝導電流が回復し、接合が 0 的になることを観測した．これからの結果は定量的にも理論と一致する．(Phys. Rev. B, 2010)

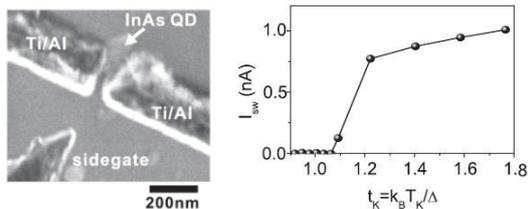


図 4 (上) サイドゲートを有する InAs 自己形成量子ドットの電子顕微鏡写真. サイドゲートが設置されており、近藤温度を制御できる。(下) 超伝導臨界電流に対応するスイッチ電流の近藤温度依存性. $t_k=1.1$ 程度で、 $0-\pi$ 接合転移が観測される。

(6) 超伝導電極と量子ドット中の離散準位の混成で形成されるアンドレーエフ束縛状態を、弱く結合した常伝導電極を介した非平衡伝導度測定により観測した。さらに、そのゲート電圧依存性から基底状態が BCS 一重項状態から磁氣的二重項状態へと量子相転移を起こすことを数値繰り込み群の計算結果との比較から明らかにした。また超伝導電極との結合が十分強く、近藤相関が存在する領域では、近藤共鳴状態が共存することも観測した。(Phys. Rev. Lett. 2010 ; Phys. Rev. B 2010)

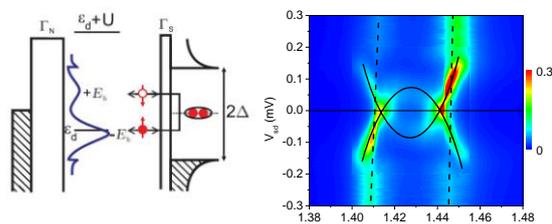


図 5 (上) 常伝導/量子ドット/超伝導接合の模式図. 超伝導体と離散準位の混成により、アンドレーエフ共鳴状態 ($\pm E_b$) が形成される。(下) アンドレーエフ共鳴状態エネルギーを示すギャップ内ピーク (黒細破線)。

(7) スピン軌道相互作用は、半導体ナノ構造でスピン物性を支配する重要な性質である。常伝導電極と弱く結合した InAs 量子ドットを用いて、基底状態の磁場遷移点における基底-励起状態の反交差を観測し、その大きさからスピン軌道相互作用のエネルギーが $100 \mu\text{eV}$ 前後であることを明らかにした。さらにそのエネルギーの面内磁場角度依存性からラシュバ型スピン軌道相互作用の普遍的な性質を明らかにした。(Phys. Rev. Lett. 2010) この結果はスピン軌道相互作用の重要な性質として認められ、いくつかの論文で利用されている。

(8) (7) と並んで、スピン軌道相互作用の大きさを近藤効果の分裂から決定する方法を提案実証した。これを利用し、InAs 量子ドットに近接したサイドゲート電圧の関数としてスピン軌道相互作用エネルギーを評価した。これは、量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の電氣的制御の初めての実現例であり、スピン量子ビットの高性能化を目指す上で重要な成果と考えられる。(Nature Nano. 2011 日経新聞掲載)

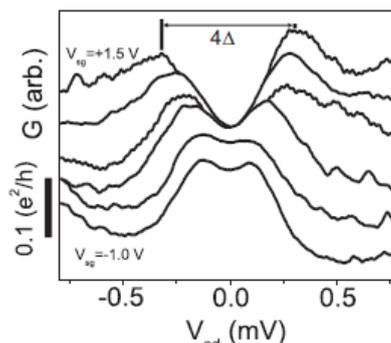


図 6 異なるサイドゲートでの近藤ゼロバイアス図 近藤ゼロバイアス以上に現れる分裂. 磁場下での起動交差点で測定. Δ はスピン軌道相互作用エネルギーを表す。

(9) g 因子は電子スピンの磁場応答を表すパラメータで、その解明と制御は電子スピン操作につながる。我々は量子ドットにおける 3 次元的な g 因子の異方性を初めて実験的に観測した。さらサイドゲートを用いて、InAs ドットの電子 g 因子 (テンソル) の異方性の電氣的制御に成功した。 g テンソルの変化はスピン歳差回転軸の変化を与える。上記結果は g テンソル変調による電子スピン共鳴、それを原理とする新型スピン量子ビットへの応用が有用であることを示す。(Phys Rev. B 2011)

(10) 電荷量子コヒーレンスの観測問題に関して、それを行うのに適した飛行電荷量子ビットの開発を行った。トンネル結合量子細線とアハロノフボームリング (AB リング) からの干渉計を用いて、飛行量子ビットの電氣的な制御に成功した。飛行量子ビットの制御は、量子ビット (量子情報) を持った量子を伝播させながらその量子情報を制御する新しい技術であり、固体で集積可能な飛行量子ビットを実現した例はこれまでなかった。この技術は、量子情報の伝送や集積化に向けた重要な一歩である。(Nature Nano. 2012 日経・日刊工業新聞掲載)

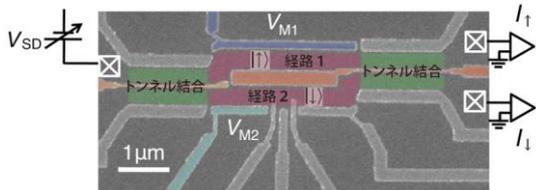


図7 飛行量子ビットの制御に用いた干渉計の電子顕微鏡写真と測定系。アハロノフボームリングをトンネル結合細線で挟んだ形になっている。オレンジ色のゲート電極の電圧を変えることによって経路間のトンネル結合を、ゲート電圧 V_{M1} や V_{M2} によって電子が経路間で獲得する位相差を制御することができる。左側から、経路1（上の経路）へと電子を注入する。右側のトンネル結合領域の出口付近の量子情報は、電流値 I_1 、 I_2 を測定することによって読み出すことができる。

(11) (10)の研究に基づいて、量子ビットの制御系に近接して置かれた量子細線（観測系）との電流相関を測定したが、十分な相関が得られなかった。これは、伝導チャンネル数が多く、遮蔽効果が想定以上に大きくなってしまったことなどによる。そこで、単一モードでの伝導にし、且つ伝導速度を落とすことによって実効的な結合時間を長くするために、表面弾性波を利用した単一電子伝導を組み合わせることを検討し、その技術開発を行った。具体的には、離れた量子ドット間で単一電子を単一チャンネルを通して周囲の電子と混じることなく運ぶ技術の開発を行った。表面弾性波を利用することにより、90%以上の精度で単一電子を移送・捕獲することができた。移送に要する時間が電子スピンの T_2^* に比べて短いことから、この技術は電子スピンのコヒーレント移送にも利用できる。こうした単一電子移送技術は、特に非局所な量子もつれを生成、制御するために不可欠な技術である。(Nature 2011 朝日・日経産業・日刊工業・科学新聞、時事通信掲載)

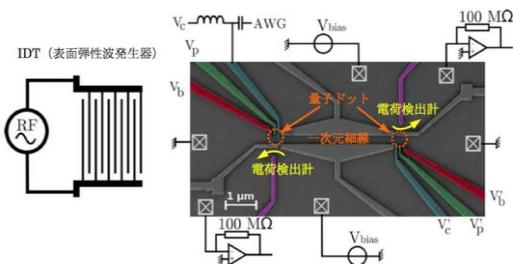


図8 単一電子移送に用いた試料の構造。半導体表面にゲート電極を配することにより、二つの量子ドットとそれらを結ぶ次元細線が形成されている。また、試料の中心から2 mm離れた場所にIDTを置き、表面弾性波を送ることができるようにした。電荷検出計によって、量子ドット中に閉じ込めた電子の数を数えることができる。

(12) 電子スピンの観測問題に関しては、近藤状態にある量子ドットに近接して置かれた量子ポイントコンタクト (QPC) による電荷観測の影響を調べた。QPC に大きな電流を流すことによって近藤効果の抑制が見られたが、これは単に発熱による影響であり、電子スピンは直接乱されないことが明らかになった。これにより、電子スピンは電荷の観測によっては影響を受けないことが確認できた。

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10件)

- ① M. Yamamoto, S. Takada, C. Bauerle, K. Watanabe, A. D. Wieck, S. Tarucha, “Electrical control of a solid-state flying qubit”, *Nature Nano.* 7, 247 (2012).
- ② R. Brunner, Y.-S. Shin, T. Obata, M. Pioro-Ladrière, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama, Y. Tokura, S. Tarucha, “Two-Qubit Gate of Combined Single-Spin Rotation and Interdot Spin Exchange in a Double Quantum Dot”, *Phys. Rev. Lett.* 107, 1468011-13 (2011).
- ③ 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 nano.* 6, 511 (2011).
- ④ 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, 2468011-4 (2010).
- ⑤ T. Takakura, M. Pioro-Ladrière, T. Obata, Y.S. Shin, R. Brunner, K. Yoshida, T. Taniyama, S. Tarucha, “Triple quantum dot device designed for three spin qubits”, *Appl. Phys. Lett.* 97, 212104 (2010).
- ⑥ R.S. Deacon, Y. Tanaka, A. Oiwa, R. Sakano, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, “Tunneling Spectroscopy of Andreev Energy Levels in a Quantum Dot Coupled to a Superconductor”, *Phys. Rev. Lett.* 104, 076805 (2010).
- ⑦ R.S. Deacon, Y. Tanaka, A. Oiwa, R. Sakano, K. Yoshida, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, “Kondo-enhanced Andreev transport in single self-assembled InAs quantum dots contacted with normal and

superconducting leads”, Phys. Rev. B 81, 121308 (R) (2010).

⑧ T. Koderu, K. Ono, Y. Kitamura, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, “Quantitative Estimation of Exchange Interaction Energy Using Two-Electron Vertical Double Quantum Dots”, Phys. Rev. Lett. 102, 146802 (2009).

⑨ M. Pioro-Ladriere, T. Obata, Y. Tokura, Y-S. Shin, T. Kubo, K. Yoshida, T. Taniyama, and S. Tarucha, “Electrically driven single-electron spin resonance in a slanting Zeeman field”, Nat. Phys. 4, 776 (2008).

⑩ J. Baugh, Y. Kitamura, K. Ono, and S. Tarucha, “Large nuclear Overhauser fields detected in vertically coupled double quantum dots”, Phys. Rev. Lett. 99, 096804 (2007).

[学会発表] (計 5 件)

① S. Tarucha (Invited), “Spin Qubits and Qubit Gates with Quantum Dots”, 26th Int. Conf. on Low Temperature Physics (LT26), 2011/08/13, Beijing, China.

② S. Tarucha (Invited), “Micro-magnet technique for implementing multiple spin qubits, qubit gates, and readout with quantum dots”, 30th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (ICPS2010), 2010/07/26, Seoul, Korea.

③ M. Yamamoto, C. Bauerle, and S. Tarucha, “Full control of a flying charge qubit: detection and control of transmission phase shift by Ramsey interference”, The 18th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), 2009/07/23, Kobe Japan.

④ S. Tarucha (Invited), “Kondo Effect and Superconductivity Observed in Single InAs Quantum Dots Coupled to Superconducting Leads”, ISQM-Tokyo'08, 2008/08/28, Saitama, Japan.

⑤ 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), 2007/07/17, Genova, Italy.

[産業財産権]

○取得状況 (計 3 件)

名称: ELECTRONIC DEVICE USING QUANTUM DOT
発明者: ピオロラドリエル・ミシエル、小幡利顕、申潤錫、久保敏弘、樽茶清悟
権利者: J S T
種類: 特許
番号: PCT /JP2008/072035
取得年月日: 2010. 10. 28 (公報発行日)
国内外の別: 国外

名称: 二重量子ドット帯電型整流器
発明者: 天羽真一、久保敏弘、羽田野剛司、寺岡総一郎、柴富昭洋、樽茶清悟
権利者: J S T
種類: 特許
番号: 特願 2008-160932
取得年月日: 2012. 03. 14 (発行日)
国内外の別: 国内

名称: 量子ドットを用いた電子装置
発明者: ミシエル・ピオロラドリエル、小幡利顕、申潤錫、久保敏弘、樽茶清悟
権利者: J S T (科学技術振興機構)
種類: 特許
番号: 特願 2007-316648
取得年月日: 2011. 04. 28 (発行日)
国内外の別: 国内

[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

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

(2) 研究分担者

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
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