

令和元年6月19日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220710

研究課題名(和文)量子対の空間制御による新規固体電子物性の研究

研究課題名(英文) Exploring the novel quantum electronic physics in solid state using spatial control of paired quantum states

研究代表者

樽茶 清悟 (Tarucha, Seigo)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：40302799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 150,000,000円

研究成果の概要(和文)：(1)多重GaAs量子ドットを用いて最多のスピン量子ビットと空間非局所性を利用した新しい量子もつれの制御法、及びSi量子ドットを用いた超高精度の量子操作法を開発した。(2)電子対を空間分離してコヒーレントに伝搬させることに成功した。非電荷自由度伝送の制御原理を確認した。(3)二重量子ドット、ナノ細線におけるクーパ対分離のコヒーレンス性を初めて観測した。トポロジカル絶縁体HgTeを用いてマヨラナ粒子を初めて観測した。(4)光子もつれ対から光子-電子スピン対への状態転写に成功した。フォトリソグラフィによる量子効率の改善法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)開発した量子技術は全てスピン量子コンピュータの基盤技術として重要である。また、量子コンピュータの主概念である量子コヒーレンス・量子もつれの有用な知見を得た。(2)電子対の制御を原理とする量子電子光学の基盤技術を開発し、量子操作に空間的な制御を初めて取り入れることができるようになった。(3)二重細線でのクーパ対分離の観測により、安定な非可換工ニオンを生成するための指針を得た。また、クーパ対分岐における空間非局所性を初めて実証した。(4)もつれ対の状態転写の原理を確認し、さらにその転写効率向上の指針を得たことで、本手法が量子中継に有用であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：(1) We developed novel quantum technologies of implementing the largest number spin qubits and controlling the local and nonlocal quantum entanglement in various ways with GaAs multiple quantum dots and operating the high-fidelity quantum gates with Si quantum dots. (2) We realized spatial separation of an electron pair and their coherent transport. We also controlled charge neutral current generated based on electron pair splitting. (3) We for the first time observed coherent Cooper pair splitting for double InAs quantum dots or nanowires contacted to a superconductor. We revealed Majorana signatures using topological insulators HgTe. (4) We for the first time demonstrated the state projection of a photon polarization pair to a photon-electron spin pair. We also proposed that significant improvement of the quantum efficiency in this state projection process can be achieved by combining with photonic nano-structures.

研究分野：a半導体物性、量子物理、スピン量子計算、半導体ナノ構造、量子技術

キーワード：量子もつれ 量子情報 表面弾性波 クーパ対分離 マヨラナ粒子 量子中継 光-スピンインターフェース

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノ構造の電子の量子状態を制御する技術を用いて、量子ドット・細線などの相関電子系、異種の粒子からなる複合系、量子凝縮系などの研究が可能になり、また、量子情報処理への応用が研究されている。代表者らは早くから当該研究に参入し、多くの成果を上げてきた。とくに最近では結合ドットの電子相関、スピン操作、光子からスピンへの量子変換の研究に集中してきた。その中で、電子対、光子-スピン対などの対相関に空間の自由度(空間的配置や分離)を導入し、加えて量子情報の技術を活用すれば、量子制御の研究分野は格段に広がり、量子電子物性の新しい研究分野・手法を開拓できると着想した。

2. 研究の目的

本研究は、単一の粒子、及び異種の粒子の対状態(電子-電子、超伝導-電子、光子-スピン)を空間的に制御することを原理として、固体量子電子系の新しい研究手法を開拓し、その応用として、スピン量子情報に新原理を提供することを目指す。主たる研究項目として、(1)多重ドット列の電子相関、(2)スピン対の量子電子光学、(3)超伝導-量子ドット(細線)接合の非局所電子対、(4)光子-スピン対の相関を取り上げる。各項目の具体的な目標は以下の通り。

(1)三 - 五以上の多重量子ドットを作り、電子状態の検出と制御、スピン操作を行う。次に同様な多重量子ドットを用いて、基本の量子ゲートを実現する。

(2)表面弾性波の作る「動くドット」中にスピン1重項を実現し、導波路回路上で2電子のスピン対を分離、制御する。これを基に「量子電子光学」の分野を開拓する。

(3)超伝導-電子対では、並列ドットのジョセフソン接合についてドット状態を電圧制御することにより、クーパ対分離の高効率化、及び分離電子対のコヒーレンスの確認と制御を行う。マヨラナ状態に関しては細線接合の高品質化と1次元性制御による検証実験に集中する。

(4)もつれ光子対源を用いて、もつれ光子対から光子-スピン対への状態転写を実現する。これを基に量子中継への応用を議論する。

3. 研究の方法

(1)現有の微小磁石法によるスピン量子ビット技術を基盤として、3-5個のドットから成る多重量子ドットを作り、その基底・励起電子状態の磁氣的性質を解明する。多重量子ドットを用いて多量子ビットを実装し、また量子計算の基本アルゴリズムを実証する。この項目の研究は期間中に著しく、かつ急速に進展した。そこで、量子情報技術への時宜を得た貢献を拡大すべく、新たなテーマとして、量子もつれ対状態の新しい応用(新原理の量子位相制御、量子非破壊測定)の開発、Si量子ドットを用いた量子操作の高忠実度化を加えた。

(2)単一量子ドット中の電子対の基底状態は量子もつれ(一重項)である。代表者らが開発した、表面弾性波による単一電子のドット間移送を発展させて、表面弾性波中のスピン対を分岐伝送路で分離し、片方の伝送路の電子スピンをスピン軌道相互作用を利用して制御する。これを基盤として、非局所量子もつれのベル測定による検証を試みる。なお、研究期間中に、超伝導体とグラフェンの量子ドットを接合させた系において、高効率で電子対を分離できることや、グラフェン中で非電荷自由度を長距離伝送できる目処がついた。そこで、グラフェンを用いた量子電子光学実験も並行して進めた。

(3)独自に開発した並列2重ドットを含むジョセフソン接合を改良して、両ドットへのクーパ対分離の高効率化と、それによる超伝導電流の増大を確認する。これにより固体系で初となる、分離量子もつれの検証を達成する。また、理論予測されているマヨラナ粒子について、従来の実験の問題点を解消し、真偽を確認する。途中同粒子に関する実験の重要性が増したので、当初予定の単一細線に加えて二重ナノ細線、及びトポロジカル絶縁体を用いた研究を追加した。

(4)まず単一光子から単一スピンへの情報転写を、次に、パラメトリック下方変換を用いたもつれ光子対を導入して、一つの光子から生成したスピンと残りの光子の空間分離状態を生成し、その間の相関を検証する。これらの結果をもとに、量子中継への応用の有用性を議論する。なお、計画遂行中に問題となった、光子-電子変換の量子効率改善に向けて、(110)上量子ドットの実現や表面プラズモンアンテナなどのフォトニックナノ構造の導入を試み、それらの変換効率を算出して有用性を評価することをテーマに加えた。

4. 研究成果

(1)多重ドット列の電子相関

三、四重 GaAs 量子ドットに微小磁石法を適用し、各ドットの独立なスピン操作を達成した。ここで実現したスピン量子ビットの数は世界最多である。また、五重 GaAs 量子ドットを作製し、電子状態を検出、制御した。さらに、この手法が、より多重の量子ドットに拡張できることを確認した。三重 GaAs 量子ドットを用いて、様々な量子もつれ操作法(非隣接量子もつれの生成、世界最高速の制御位相ゲート)を初めて実現した。非隣接もつれは、基底-励起状態の断熱的遷移と量子もつれの空間的非局所性を利用したもので、本主題(空間自由度の制御)に合致する。さらに、電子スピンの量子非破壊測定に初めて成功した。ここでは、データビットと補助ビッ

トの量子もつれを作り、後者を測定することでデータビットを判定する。これは、量子コンピュータの誤り訂正の原理を与える重要な技術である。量子もつれの成果については、いずれもプレス発表を行った（プレス発表、他3件）。また、基本アルゴリズムに関してはスピン系で未達成であったテレポーテーションの原理を確認した。

量子操作の高忠実度化を図るには Si のドットが GaAs のドットより優れている。そこで、上記と並行して、Si/SiGe 量子ドットの研究を進めた。天然の Si/SiGe、同位体制御 Si/SiGe の二重量子ドットを用いた量子ビット操作を実現し、前者では忠実度 99.6%、後者では 99.93% の世界最高値を達成した（プレス発表2件）。また、コヒーレント振動に対する雑音パワースペクトル密度を求め、前者では核スピン環境雑音、後者では電荷雑音が忠実度の制限要因になっていることを突き止めた。これらの結果は世界的な注目を集めており、会議、論文で頻繁に引用されている。続けて、二重量子ドットを用いて、制御位相ゲートを実装し、未発表ながら、忠実度として 95% 以上（最高値）を見積もった。

は当初目的を大きく超える進捗であり、量子もつれ制御の新原理を提供する。は予定にはなかったものの、大きく進捗した。この結果は、Si 量子コンピュータの開発に大きいインパクトを与えており、関連論文は高頻度引用になっている。

(2) スピン対の量子電子光学

表面弾性波の作る「動く量子ドット」に電子対を入れて伝導させ、分岐路において2電子を 90% 近い効率で分離することに成功した（図3，論文投稿予定）。また、この量子ドット中のスピンを1個単位で長距離伝送させる実験（プレス発表）、同ドット中の単一電子のコヒーレンスの確認にも成功した（論文投稿予定）。これらの結果を基にしてベル測定の手法を提案した（論文投稿予定）。

グラフェンを用いた実験では、グラフェンの近接超伝導状態にグラフェンの量子ドット2つを接続し、その帯電エネルギーを利用してクーパ対を分離した。分離後の電子スピン操作が可能な二次元系としては世界最高の分離効率を実現した。また、磁場の印加によって電子が試料端に沿って一方向にのみ進むグラフェンの量子ホール状態を弱接合とするジョセフソン接合において、クーパ対の 100% 分離に成功した。なお、量子ホール状態と超伝導体との界面では、理想的には電荷中性のマヨラナモードが流れ、これが接合における超伝導流を媒介することから、同実験はマヨラナ状態の検証の意味でも大きな注目を浴びた。また、同様にクーパ対分離に利用できるバレー自由度に着目し、電流と垂直な方向に電荷中性のバレー流が流れるバレーホール効果の検証に成功した（プレス発表）。

は項目(2)の目的に沿ったもので、ほぼ予定通りの進捗である。新たに追加したのバレー自由度、グラフェン量子状態によるクーパ対分離は、空間自由度の新しい制御法を提供する

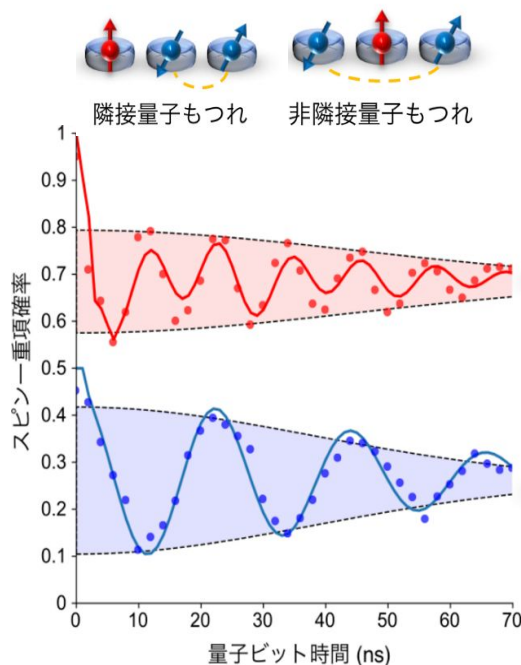


図1 隣接（左）および非隣接（右）量子ドット間の量子もつれ状態のコヒーレント振動。この振動は一重項と三重項の周期的入れ替わりを表わし、非隣接の場合には周期が半分になる。

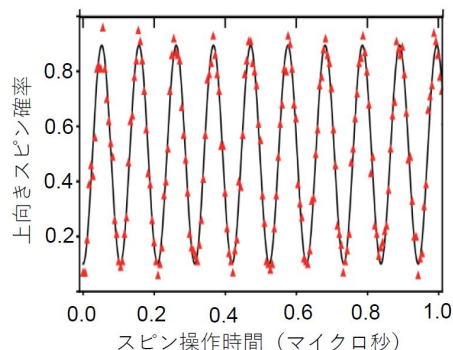
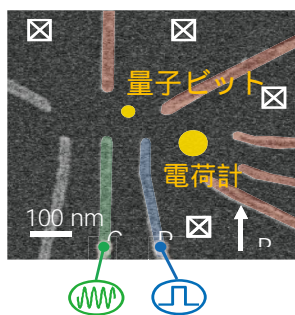


図2 同位体制御の Si/SiGe 量子ドット(左)で実現した、超高精度量子ビット操作(右)。スピン上向き、下向きが入れ替わることを反映して、上向きを見出す確率が周期的に振動する。この振動が高精度であることを反映して、振幅がほとんど変わらない。

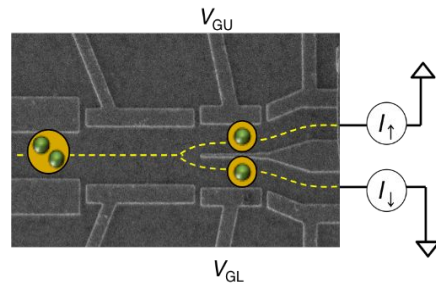


図3 表面弾性波の作る「動く量子ドット」中の電子対の分離。

もので大きい注目を集めている。この成果をまとめた論文は高頻度引用になっている。

(3) 超伝導-量子ドット(細線) 接合の非局所電子対

超伝導接合によるクーパ対分離機構とマヨラナ粒子の探索を行った。まず並列二重自己形成 InAs 量子ドットのジョセフソン接合において、クーパ対のコヒーレント分離を示す超伝導電流成分を観測した(プレス発表)。これはスピン量子もつれの非局所性を示す初の実験であり、重要な意義をもつ。単一のナノ細線のジョセフソン接合では、基板上的超伝導体とナノ細線上の超伝導体の臨界磁場の違いに起因する、スイッチング電流の異常な磁場依存性を観測した。この結果はマヨラナ粒子探索によく使われる、超伝導電流の磁場依存性が、必ずしもマヨラナ粒子の発現を意味しないことを示しており、重要な知見である。そこで、我々は新たに、無磁場での同粒子の生成を可能にする二重ナノ細線の超伝導接合を取り上げた。二重 InAs ナノ細線のジョセフソン接合において、細線中にドットがある場合と、細線が弾道輸送領域にある場合のそれぞれでクーパ対分離を観測した。特に後者は、1次元電子系のクーパ対分離を初めて観測したもので、クーパ対分離が局所的な対トンネルよりも支配的になり得ることが分かった(図4)。これは無磁場で安定なマヨラナ粒子が発現する条件が満たされることを意味する重要な結果である。さらに、1次元電子系のクーパ対分離の主要因である InAs 細線中の電子相関をスケール解析から評価した。その結果、スピン軌道相互作用の影響は無視できるほど小さいこと、また InAs では電子相関が大きくなる領域まで朝永ラッティンジャー液体としてゲート制御可能であることが分かった。

トポロジカル絶縁体-超伝導体接合におけるマヨラナ粒子発現を目指して、HgTe のジョセフソン接合を作製し、交流ジョセフソン電流を調べた。これにより、マヨラナ粒子の明瞭な兆候(シャピロステップとジョセフソン放射の異常)を初めて観測した(図5、プレス発表)。トポロジカル絶縁体で初の明瞭な観測例として世界の注目を集めている。また、同実験を、より一般的なトポロジカル絶縁体である BiSbTe 薄膜に適用し、交流ジョセフソン電流を観測した。また、マヨラナ粒子の観測に至っていないが、鏡面アンドレーエフ反射の兆候を見出し、また、ディラック電子性が接合の超伝導特性を支配していることを示唆する結果を得た。

以上は(3)のスピン対の空間分離とマヨラナ粒子探索の当初目的を大きく上回る進捗である。後者に関する論文2件は高頻度引用になっている。また、の二重細線の結果は、無磁場で安定なマヨラナ粒子発現の可能性を示すもので、非可換工ニオンの新しい研究の端緒を開いた点で価値が高い。

(4) 光子-スピン対の相関

単一光子対から単一光子-電子スピン対への量子もつれ相関の転写(図6)の実験を、各要素に分けて順に行い、原理確認に至った。単一光子による量子ドット中の単一電子の生成、単一光子円偏光から量子ドット中の単一電子スピンへの角運動量転写に初めて成功した(プレス発表予定)。さらに、量子ドット中の軽い正孔を共鳴光励起して生成した電子スピンを光スピン閉塞効果と通常のスピン閉塞効果で読み出し、量子状態転写から予想通りに起きていることを確かめた(もつれ相関の転写では

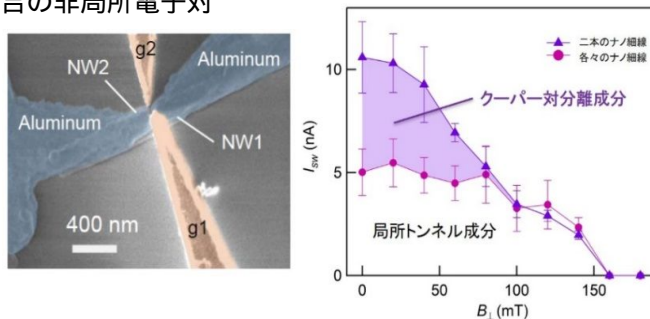


図4 二重ナノ細線のジョセフソン接合(左)と各細線に独立に流れる超伝導スイッチ電流 I_{sw} (局所トンネル) と両細線に跨って流れる I_{sw} (クーパ対分離) の磁場依存性(右)。各細線(NW1,2)は弾道伝導領域にあり、伝搬モード数はゲート電圧($g_1, 2$)で独立に変えられる。2つの成分の割合はスイッチ電流の大きさで与えられる。

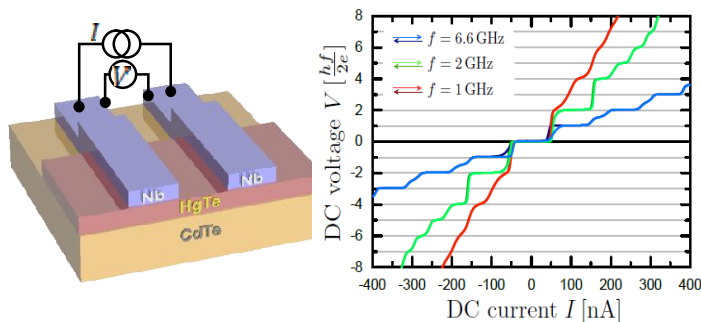


図5 HgTe ジョセフソン接合(左)とマイクロ波照射による交流ジョセフソン電流のシャピロステップ(右)。マイクロ波の周波数が高いときに奇数番目のステップ(原点から数えて1, 3番目)が消失している。これはジョセフソン過程にマヨラナ粒子が関与していることを示す。

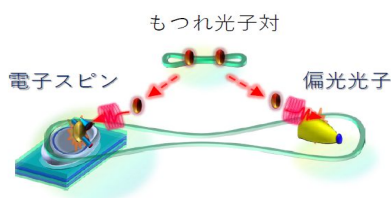


図6 もつれ光子対による光子-電子スピン対生成の模式図。

軽い正孔の選択的な励起が必要)。以上により、偏光からスピンへの量子状態転写を確認した。続いて、もつれ光子対を作り、その一方の光子により量子ドット中に生成された電子と残りの光子とが同時検出されることを実証した(図7)(プレス発表)。以上一連の結果は、実質的に単一の光子対から単一の光子偏光-電子スピンへもつれ相関が転写されること意味する。

重い正孔からの光子-電子スピン量子状態変換が可能で、しかも量子効率の3倍増が見込める、(110)GaAs量子ドットの動作を初めて実現した。さらに表面プラズモンアンテナを量子ドット上に作製すると、電磁界シミュレーションにより光子-電子変換効率を70倍向上できることを示した。

のスピンの判定に関連して、スピン閉塞状態の安定性を長時間測定し、その結果からスピン反転の統計的な特性を解明した。これにより、スピン判定の信頼性を評価するとともに、フォノン照射による新たなスピン反転機構を見出した。これらの結果は今後のスピンを用いた非平衡物理の研究へとつながると期待される。

は(4)の状態転写の目的を達成し、は量子中継器への応用の有用性を示す、という目的を達している。はに追加したものであり、実験手法の信頼性とスピン状態の安定性に関する重要な知見を提供する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計79件)(*は高頻度引用論文、Web of Scienceから)

A. Noiri, T. Nakajima, J. Yoneda, M.R. Delbecq, P. Stano, T. Otsuka, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, K. Kawasaki, Y. Kojima, A. Ludwig, A.D. Wieck, D. Loss, and S. Tarucha, "A fast quantum interface between different spin qubit encodings", Nat. Commun. 9, 5066 (2018), DOI:10.1038/s41467-018-07522-1 査読有

T. Nakajima, M.R. Delbecq, T. Otsuka, S. Amaha, J. Yoneda, A. Noiri, K. Takeda, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, X. Hu, F. Nori, and S. Tarucha, "Coherent transfer of electron spin correlations assisted by dephasing noise", Nat. Commun. 9, 2133 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-04544-7 査読有

K. Kuroyama, M. Larsson, S. Matsuo, T. Fujita, S.R. Valentin, A. Ludwig, A.D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, "Single electron-photon pair creation from a single polarization-entangled photon pair", Sci. Rep. 7, 16968 (2017). DOI:10.1038/s41598-017-16899-w 査読有

*K. Wiedermann, E. Bocquillon, R.S. Deacon, S. Hartinger, O. Herrmann, T.M. Klapwijk, L. Maier, C. Ames, C. Bru "ne, C. Gould, A. Oiwa, K. Ishibashi, S. Tarucha, H. Buhmann, and L.W. Molenkamp, "4 π -periodic Josephson supercurrent in HgTe-based topological Josephson junctions", Nat. Commun.7, 10303 (2016).DOI:10.1038/ncomms10303 査読有

*Y. Shimazaki, M. Yamamoto, I.V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. Tarucha, "Generation and detection of pure valley current by electrically induced Berry curvature in bilayer graphene", Nat. Phys. 11, 1032 (2015). DOI: 10.1038/NPHYS3551 査読有

R.S. Deacon, A. Oiwa, J. Sailer, S. Baba, Y. Kanai, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Cooper pair splitting in parallel quantum dot Josephson junctions", Nat. Commun. 6, 7446 (2015). DOI: 10.1038/ncomms8446 査読有

[学会発表](計476件、うち招待講演126件)

S. Matsuo, "Observation of Cooper pair splitting in a ballistic Josephson junction through double InAs nanowires", 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018) (2018). (招待)

A. Oiwa, "Photon-spin conversion using gate-defined GaAs quantum dots", Quantum Dot Conference 2018 (2018). (招待)

S. Tarucha, "Charge Noise Limited Gate Fidelity > 99.9% of Spin Qubits with Si/SiGe Quantum Dots, APS March Meeting 2018 (2018). (招待)

M. Yamamoto, "A localized spin in an electron wave cavity: measurement on the Kondo cloud length", International Workshop on Hybrid Quantum Systems(2018). (招待)

S. Tarucha, "QND spin measurement and CPHASE with exchange-coupled two qubits of different kinds: a spin-1/2 qubit and a singlet-triplet qubit", 28th International Conference on Low Temperature Physics (2017). (招待)

[図書](計2件)

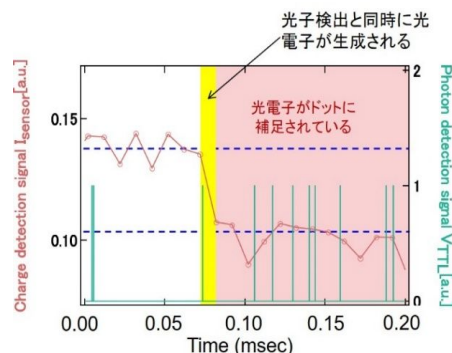


図7 もつれ光子対から生成した、光子と量子ドット中の電子の同時検出。単一光子は単一光子計数器で検出される(緑線)。電子は電荷計で検出される(赤線の変化部分(黄色))。

山本倫久 (藤田静雄 編著) 丸善プラネット、カーボンが創る未来社会、2017、141-156
S. Tarucha, M. Yamamoto, A. Oiwa, and B.S. Choi, and Y. Tokura, "Spin Qubits with semiconductor quantum dots", in PRINCIPLES AND METHODS OF QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGIES ed. Y. Yamamoto and K. Semba, Lecture Notes in Physics 911, 541-567 (2016). DOI: 10.1007/978-4-431-55756-2_25 (Book)

〔その他〕

ホームページ

<http://qfsrg.riken.jp/index.html>

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qse/index.html>

プレス発表 (計 11 件)

隣り合わないスピン量子ビット間の量子もつれ生成に成功 2018/05/31

http://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_201805311040130145134944.html

もつれ光子対を用いて相関をもつ光子と電子の対を生成、検出することに成功 2017/12/06

http://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_201712061344229028752093.html

トポロジカル絶縁体による 4 周期の超伝導状態を世界で初めて観測 2016/01/22

http://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_20160122165601903470694830.html

電氣的に制御したグラフェンでバレー流の生成、検出に初めて成功 2015/11/17

http://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_20151116180644989504432763.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 山本 倫久

ローマ字氏名: (YAMAMOTO, michihisa)

所属研究機関名: 国立研究開発法人理化学研究所

部局名: 創発物性科学研究センター

職名: ユニットリーダー

研究者番号 (8 桁): 00376493

研究分担者氏名: 大岩 顕

ローマ字氏名: (OIWA, akira)

所属研究機関名: 大阪大学

部局名: 産業科学研究所

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 10321902

研究分担者氏名: 松尾 貞茂

ローマ字氏名: (MATSUO, sadashige)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 大学院工学系研究科 (工学部)

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 90743980

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: DEACON, Russell, Dr. (理化学研究所)

ローマ字氏名: (DIHKON, RASSERU)

研究協力者氏名: MOLENKAMP, Laurens, Prof. (ヴェルツブルク大学)

ローマ字氏名: (MOHREKANPU, ROHRENSU)

研究協力者氏名: WIECK, Andreas, Prof. (ボーフム大学)

ローマ字氏名: (BIHKU, ANDOREASU)

研究協力者氏名: STANO, Peter, Prof. (理化学研究所)

ローマ字氏名: (SUTANO, PIHTA)

研究協力者氏名: FINKELSTEIN, Gleb, Prof. (デューク大学)

ローマ字氏名: (FINKERUSHUTAIN, GUREBU)

研究協力者氏名: BAUERLE, Christopher, Prof. (ネール研究所)

ローマ字氏名: (BOIYARE, KURISUTOFAH)

研究協力者氏名: Xu, Hongqi, Prof. (北京大学)

ローマ字氏名: (SHU, HONKI)

研究協力者氏名: 中島 峻, Dr. (理化学研究所)

ローマ字氏名: (NAKAJIMA, takashi)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。