

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247050

研究課題名(和文)量子電子光学実験による多体電子相関の解明

研究課題名(英文) Investigation of electronic correlation effects using quantum electron optics

研究代表者

山本 倫久 (Yamamoto, Michihisa)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・講師

研究者番号：00376493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,700,000円

研究成果の概要(和文)：伝搬する電子の量子状態を制御する量子電子光学実験を用いて単一電子単位での電子相関の検証・制御を行った。まず、干渉計に埋め込んだ量子ドットに局在スピンを閉じ込め、単一スピンの近藤効果(周囲の電子がスピンを遮蔽する効果)の微視的な性質と空間的な広がりを明らかにした。また、空乏化した経路中でスピンを保存したまま伝搬する電子を制御する技術に加え、経路中で量子力学に相関した電子対を空間的に分離する技術(非局所量子もつれの生成技術)を開発した。

研究成果の概要(英文)：We detected and controlled correlated states of electrons in units of a single electron, using quantum electron optics, where quantum states of propagating electrons are manipulated. Employing a single localized electron spin confined in a quantum dot embedded in an interferometer, we revealed microscopic natures and spatial extension of the Kondo state, where the localized spin is screened by its surrounding conducting electrons. We also developed technologies for transferring a single electron spin through a depleted channel and for splitting spatially a quantum mechanically correlated electron pair, to generate a non-local spin entangled state.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子相関 量子ドット 近藤効果 量子情報

### 1. 研究開始当初の背景

固体中の電子は、電子間相互作用や環境との強い相互作用により、その量子状態を容易に失ってしまう。そこで、単一電子を半導体微細構造中に閉じ込めて周囲から孤立させることによって高いコヒーレンスを維持し、その量子状態を制御して量子情報処理に応用する試みが世界中で行われている。

一方で、研究代表者らは、ここ数年、コヒーレントに伝播する電子の量子状態を制御する量子光学的な実験（量子電子光学実験）に取り込み、その要素技術の開発に成功してきた。2012年に発表した固体の2経路干渉計（Nature Nano. 7, 247 (2012)）は、電子がどちらの経路に存在するかで定義される量子ビット状態が、伝播する単一電子の進行方向の位置の関数として定義されるものである。これによって、量子状態制御を、空間軸で集積可能な構造で行うことが可能になった。また、表面弾性波を用いて、単一電子を離れた量子ドット間で周囲から孤立させたまま伝送する技術（Nature 477, 435 (2011)）を開発した。この技術により、電子間相互作用によるデコヒーレンスを抑えながら、単一電子を任意の経路で伝搬させることが可能になった。

### 2. 研究の目的

本研究では、空間軸での量子状態制御や孤立電子の伝送技術を利用して、量子もつれが空間的に広がった電子相関状態を単一量子単位で明らかにすることを目的とした。具体的には、(1) 単一スピン不純物を単位とする近藤雲の空間スケールの検出、(2) 電荷量子ビットを用いた観測問題と量子もつれ伝導の解明、(3) 量子もつれスピン対の分離と非局所量子もつれ状態の検出・制御を主な目標とした。

### 3. 研究の方法

(1) 単一スピン不純物を単位とする近藤雲の空間スケールの検出

図1のように干渉計の中に量子ドットを埋め込み、量子ドット中に局在スピン（奇数個の電子）を閉じ込めて電極との結合を制御することによって単一スピン単位の近藤状態を実現する。このような複合系において、まず、量子ドットを伝搬する電子波の位相測定

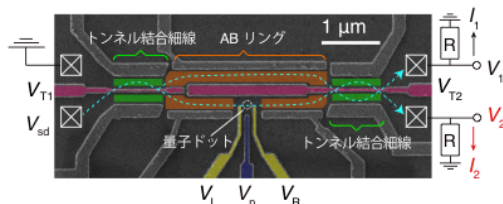


図1 近藤雲の実験に利用した、量子ドットが埋め込まれた2経路干渉計。出力電流  $I_1$ 、 $I_2$  が逆位相で振動する場合に限って正しい位相測定ができる。

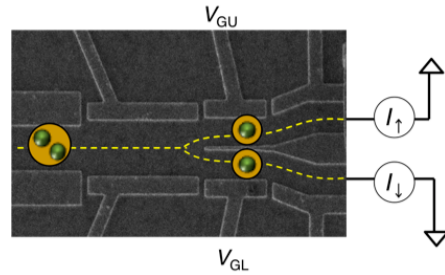


図2 電子対分離実験の試料と概念図。表面弾性波によって動く量子ドット中の2電子を、経路の分岐において別の経路中の動く量子ドットへと分離する。動く量子ドット中のクーロン相互作用によって、2電子が同時にひとつの量子ドットへと入ることを抑制している。これは、 $V_{GL}$ 、 $V_{GR}$ の関数として出力電流を観察することによって確認できた。

によって近藤状態密度の形状を明らかにするとともに、近藤雲の広がりや記述する最も重要なパラメータである近藤温度を精密に測定する。その上で、近藤温度を離れたゲート電極によって変調する実験によって近藤雲の広がりを調べる。

(2) 電荷量子ビットを用いた観測問題と量子もつれ伝導の解明

空乏化したトンネル結合量子細線（2経路干渉計）において、表面弾性波によって駆動される電荷量子ビットの制御方法の確立を目指す。これによって、電子間相互作用によるデコヒーレンスに加え、多チャンネル伝導による干渉の可視度の低下を抑えることができる。その技術を基に観測問題や量子もつれ伝導の解明に取り組む。

(3) 量子もつれスピン対の分離と非局所量子もつれ状態の検出・制御

まず、表面弾性波によって動く単一量子ドット中の2電子を離れた動く量子ドットへと分離する技術（図2）を開発する。これは非局所な量子もつれ状態の生成に相当する。並行して、表面弾性波による単一電子伝送と単一電子スピン読み出しの技術を用いて、単一電子伝送におけるスピンの保存を調べる。また、量子もつれ状態の更なる確認のために、電流雑音測定に取り組む。

### 4. 研究成果

(1) 単一スピン不純物を単位とする近藤雲の空間スケールの検出

近藤雲検出のために、架橋ゲート構造を用いた2経路干渉計を開発し、それを用いて近藤相関のある量子ドットを伝搬する電子の位相測定を行った。その結果、近藤効果が生じる（と言われている）状況でも、量子ドット中の局在電子数に揺らぎがある場合が多く、その場合には近藤谷の中心（近藤共鳴準

位が2つの局在準位の真ん中に位置する場合)を除いては位相シフトが $\pi/2$ からずれることが明らかになった。一方で、そのような場合でも、近藤温度に相当するエネルギーよりも温度が低ければ、電子スピンの遮蔽による共鳴準位が伝導において支配的であり、そのエネルギースケールを位相測定から精密に評価できることがわかった。

続いて、近藤雲の大きさを評価するための実験として、量子ドットから離れたゲート電極に印加する電圧による近藤温度の変調を観測する実験を行った。その結果、初期的な結果ながら、近藤温度が離れたゲート電極電圧によって変調されており、その変調具合が量子ドットとゲート電極との間の距離によって異なる様子が観測された。これは、近藤雲が広がっている証拠のひとつであり、近藤温度の変調の距離依存性が近藤雲の大きさを反映していると考えられる。

## (2) 電荷量子ビットを用いた観測問題と量子もつれ伝導の解明

空乏化したトンネル結合細線に、表面弾性波によって電子を1個単位で注入して量子干渉を観測する実験を行った。実験では、単一電子の高可視度の干渉の測定に初めて成功した。また、このようにして観測された干渉は、電子間相互作用によるデコヒーレンスを受けないために、比較的高い温度でも残ることを確認した。ただし、観測された干渉は、表面弾性波のポテンシャルの底に閉じ込められたままの電子ではなく、同ポテンシャルの底(動く量子ドット)から出て経路を伝搬するホットエレクトロンによって担われていることがわかった。ホットエレクトロンは伝搬速度が速く(したがって電子間相互作用が弱く)、隣接した干渉計間でのクーロン相互作用を利用した量子もつれ生成には向かないことから、量子もつれ伝導の解明には至らなかった。

その後、表面弾性波によって動く量子ドットに単一電子を閉じ込めたまま伝送させることが可能になり、その伝送特性は計算機による計算とも概ね一致した。

## (3) 量子もつれスピン対の分離と非局所量子もつれ状態の検出・制御

表面弾性波によって動く単一量子ドット中の2電子を離れた動く量子ドットへと分離する実験(図2)では、量子もつれを検証するベル測定に必要な71%を超える87%程度の分離効率を達成した。

また、表面弾性波による離れた量子ドット間の単一電子伝送におけるスピンの保存を確認した。更に、表面弾性波によって電子を移送できる準安定状態において、スピンの状態を制御できることを示した。これらの成果は、量子ドット中の電子スピンの量子操作とスピンの長距離伝送を組み合わせた「単一スピントロニクス」技術への道を拓くものとし

て注目されている。

上記の成果によって非局所量子もつれ状態を生成・制御できることがわかったが、その量子もつれを厳密に証明すべく、電流雑音測定系の構築などにも取り組んだ。

## 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. S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, K. Watanabe, A. Ludwig, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Mesoscopic phase behavior in a quantum dot around crossover between single-level and multi-level transport regimes”, Phys. Rev. B (RC), in press.
2. S. Hermelin, B. Bertrand, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle, T. Meunier, “Classical information transfer between distant quantum dots using individual electrons in fast moving quantum dots”, Physica Status Solidi(b) 254, 1600673 (2017).
3. B. Bertrand, S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle, T. Meunier, “Injection of a single electron from static to moving quantum dots”, Nanotechnology 27, 204001 (2016).
4. B. Bertrand, S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle, and T. Meunier, “Fast spin information transfer between distant quantum dots using individual electrons”, Nature Nanotechnology 11, 672-676 (2016).
5. S. Tarucha, M. Yamamoto, A. Oiwa, B.-S. Choi, and Y. Tokura, “Spin Qubits with Semiconductor Quantum Dots”, In: Principles and Methods of Quantum Information Technologies, Lecture Notes in Physics (Springer) 911, 541-567 (2016).
6. B. Bertrand, H. Flentje, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle, and T. Meunier, “Quantum manipulation of two-electron spin states in isolated double quantum dots”, Phys. Rev. Lett. 115, 096801 (2015).
7. S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, K. Watanabe, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Measurement of the Transmission Phase of an Electron in a Quantum Two-Path Interferometer”, Appl. Phys. Lett. 107, 063101 (2015). (cover of the issue)

8. M. Yamamoto, Y. Tokura, Y. Hirayama, and S. Tarucha, “Band Shift, Band Filling and Electron Localization in a Quantum Wire Detected by Tunneling between Parallel Quantum Wires”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 033710 (2015).
  9. S. Takada, C. Bäuerle, M. Yamamoto, K. Watanabe, S. Hermelin, T. Meunier, A. Alex, A. Weichselbaum, J. von Delft, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Transmission phase in the Kondo regime revealed in a two-path interferometer”, *Phys. Rev. Lett.* 113, 126601 (2014).
  10. A. Aharony, S. Takada, O. Entin-Wohlman, M. Yamamoto, and S. Tarucha, “Aharonov-Bohm interferometry with a tunnel-coupled wire”, *New Journal of Physics*, 16, 083015 (2014).
- [学会発表] (計 14 件)
1. R. Ito, S. Takada, M. Yamamoto, C. Bauerle, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Coherent electron transport driven by surface acoustic waves”, 22<sup>nd</sup> International conference on electronic properties of two-dimensional systems, Penn State University, Pennsylvania, 2017/7/31-2017/8/4 (予定) .
  2. Chen C.-S. Jason, M. Yamamoto, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Modifications to Kondo effect by distant quantum point contacts”, 第 6 回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会, ホテルサンバレー那須, 那須, 栃木県, 2016/9/22.
  3. R. Ito, S. Takada, M. Yamamoto, C. Bauerle, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Interference of single electrons in depleted channels driven by surface acoustic waves”, 第 6 回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会, ホテルサンバレー那須, 那須, 栃木県, 2016/9/22.
  4. 伊藤諒, 高田真太郎, 山本倫久, C. Bauerle, A. D. Wieck, 樽茶清悟, “表面弾性波に誘導された単一電子の二経路間量子振動”, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年) 東北学院大学 (泉キャンパス), 宮城県 (2016) 2016. 03. 22
  5. M. Yamamoto (invited) and S. Tarucha, “Manipulation of Single Flying Electrons for Quantum Electron Optics”, International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, Jan. 13 (2016).
  6. 樽茶清悟 (招待講演), “量子ドットにおける近藤位相の検出”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 大阪 (2015) 2015/9/16
  7. R. Ito, S. Takada, M. Yamamoto, C. Bauerle, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Splitting electron pairs into separate depleted channels using a surface acoustic waves”, 第 5 回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会, ホテルサンバレー那須, 那須, 栃木県, 2015/9/10.
  8. Benoit Bertrand, Sylvain Hermelin, Shintaro Takada, Michihisa Yamamoto, Seigo Tarucha, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Christopher Bäuerle, and Tristan Meunier, “Long-range spin transfer using individual electrons” EP2DS-21, 仙台国際センター, Sendai, Japan (2015) 2015/7/28.
  9. Ryo Ito, Shintaro Takada, Michihisa Yamamoto, Christopher Bauerle, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha, “Electron pair splitting into separate depleted channels using a surface acoustic wave”, EP2DS-21, 仙台国際センター, Sendai, Japan (2015) 2015/7/27.
  10. 伊藤諒, 高田真太郎, 山本倫久, Christopher Bauerle, Andreas D. Wieck, 樽茶清悟, “表面弾性波を用いた飛行量子ドットにおける電子対分離”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, Tokyo, Japan (2015) 2015/3/21.
  11. R. Ito, S. Takada, M. Yamamoto, C. Bauerle, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Splitting electron pairs into separate depleted channels using a surface acoustic wave”, 1st International Workshop on Topological Electronics (Topotronics2015), OIST, Okinawa, Japan (2015) 2015/3/9.
  12. 山本倫久 (招待講演), “半導体量子電子光学実験の進展”, 日本学術振興会, 先端ナノデバイス・材料テクノロジー第 151 委員会 研究会「量子ハイブリッドシステム」 2015/1/23.
  13. Michihisa Yamamoto, Shintaro Takada, Christopher Bauerle, Andreas Wieck, Seigo Tarucha, “Transmission Phase through a Quantum Dot Near Crossover from Single-Level to Multi-Level Transport”, 32<sup>nd</sup> International Conference on The Physics of Semiconductors (ICPS) Austin Convention Center, Texas, USA (2014) 2014/8/11.
  14. S. Takada, C. Bäuerle, M. Yamamoto, K.

Watanabe, S. Hermelin, T. Meunier, A. Alex, A. Weichselbaum, J. von Delft, A. D. Wieck, and S. Tarucha, "Transmission phase in the Kondo regime revealed in a two-path interferometer", 27<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics (LT27), Buenos Aires, Argentina (2014) 2014.8.12

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ

<http://www.meso.t.u-tokyo.ac.jp/>

受賞

第16回船井学術賞（山本 倫久）

「固体中の電子相関と量子力学的自由度の制御と伝送の研究」

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 倫久 (YAMAMOTO, Michihisa)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：00376493

### (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