

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684019

研究課題名(和文)量子状態の高速移送と非局所量子もつれ状態の生成

研究課題名(英文)Rapid quantum states transfer and generation of non-local entangled states

研究代表者

山本 倫久(YAMAMOTO, Michihisa)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00376493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,400,000円、(間接経費) 5,820,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、遠く離れた量子ドット間のコヒーレントな単一電子輸送、飛行電荷量子ビットの多量子ビット化、電子スピンの非局所な量子もつれ状態の生成と検出を目指した。まず、表面弾性波を用いてデコヒーレンス時間よりも遥かに短い時間で遠く離れた量子ドット間で単一電子を移送させることに成功した。また、この技術に応用した単一電子単位の干渉実験に成功し、多量子ビット化への足かかりを得た。さらに、同技術によって量子もつれた2電子の分離、すなわち非局所量子もつれ状態の生成に成功した。また、干渉計を用いた位相測定をテーマとして加え、近藤状態にある量子ドットの伝播位相が $\pi/2$ になることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we aimed for realizing coherent single electron transfer between distant quantum dots, multiplication of the flying charge qubit and generation of a non-local electron spin entangled state. We first succeeded in realizing a single electron transfer between distant dots in a time scale much shorter than the decoherence time using a surface acoustic wave (SAW). Employing this technique, we then realized an interference experiment in a single electron unit, which is an important step towards qubit multiplication. We also employed this SAW transfer technique for generation of a non-local entangled state by splitting two entangled electrons. In addition, we employed a two-path interferometer for the phase measurement and found that transmission phase through a Kondo correlated quantum dot becomes $\pi/2$.

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：半導体物性 メゾスコピック系 量子細線 量子ドット 量子情報

1. 研究開始当初の背景

近年、量子細線や量子ドットなどのナノ構造において、量子サイズや電子相関に起因する現象が捉えられるようになってきた。同時に、電子の量子としての性質に着目し、その性質を積極的に利用する量子情報処理の研究も急速に進展している。次のステップとして最重要な課題は、量子間の相関、つまり2電子以上の量子力学的な相関を積極的に利用したデバイスへと展開することである。こうしたデバイスの開発には、量子相関を持つ2電子を空間的に分離する技術、或いは電子間の距離を保ったまま量子相関を生成する技術(=非局所な量子相関の生成技術)、そして、離れた2電子の量子相関を確認する技術(=量子もつれの検出技術)が必要とされることがわかってきた。しかし、これらの技術の開発はいずれも難関として知られ、量子情報処理への応用に向けた決定的な解決方法は見つかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、“電子をコヒーレントに長距離移送する”(=量子状態の高速移送)というプロトコルを新たな技術基盤とする従来にないアプローチにより、非局所量子相関の生成と制御への道を拓くことを目的とした。具体的には、以下の3つの研究目標を柱とした。

1. 遠く離れた量子ドット間のコヒーレントな単一電子輸送

これは、2つの電子スピン間の距離を自在に変化させる技術の開発に相当する。ここでは、遠く離れた量子ドット間で単一電子をコヒーレントに移送する。

2. 飛行電荷量子ビットの多量子ビット化

これは、飛行電荷量子ビットの前プロジェクトを継続して行うものである。飛行電荷量子ビットでは、量子もつれの生成にクーロン相互作用を用いるため、量子間の直接的なやり取り(トンネル結合)が必要なく、非局所な量子もつれ状態を作りやすい。このような非局所な量子もつれ状態を高精度で生成し、確認することが最終的な目標となるが、その過程において、デコヒーレンスのメカニズムの解明や単一電子レベルでの量子ビット制御にも取り組む。

3. 電子スピンの非局所な量子もつれ状態の生成と検出

これは、単一電子スピンの移送技術と移送される電子の空間的な制御技術とを基盤として、2電子スピンの非局所な量子もつれ状態を創り出す新しい技術を開発するものである。量子ドット中のスピン-重項状態にある2電子を分離し、分離後の干渉効果の測定(電流雑音相関測定)によって電子スピンの量子もつれを確認することが最終的な目標となる。

3. 研究の方法

(1) 遠く離れた量子ドット間のコヒーレン

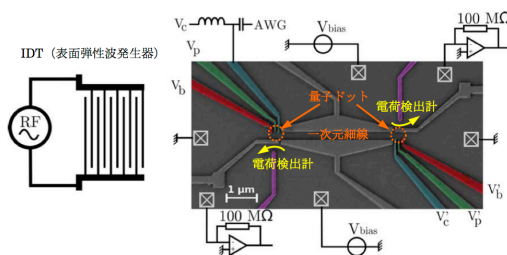


図1: 単一電子移送に用いた試料の構造。半導体表面にゲート電極を配することにより、二つの量子ドットとそれらを結ぶ一次元チャンネルが形成されている。また、試料の中心から2 mm離れた場所にIDTを置き、表面弾性波を送ることができるようにした。電荷検出計によって、量子ドット中に閉じ込めた電子の数を数えることができる。

トな単一電子輸送

図1のように二つの離れた量子ドットを空乏化した一次元チャンネルで結び、表面弾性波のパルスによって単一電子を量子ドット間で移送する実験を行った。これにより、単一電子を周囲の電子から孤立させたまま、コヒーレンスを保って短時間で送ることが可能になる。

(2) 飛行電荷量子ビットの多量子ビット化

電子波の2経路干渉計において、電子がどちらの経路に存在するかを飛行電荷量子ビットとして定義することができる。2経路干渉を上記のような表面弾性波によって単一電子単位で制御することにより、電子ビット間の同期が容易、且つ電子-電子相互作用によるデコヒーレンスのない飛行量子ビットを形成できる。

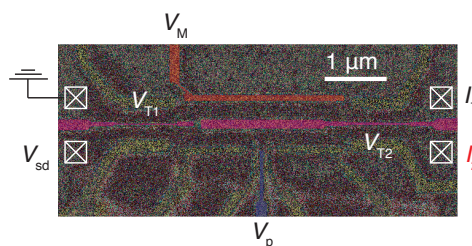


図2: 量子ドットを埋め込んだ二経路干渉計の電子顕微鏡写真。半導体表面にゲート電極を配することにより、トンネル結合細線で挟まれたアハロノフボームリングが形成されている。下の経路の中央に量子ドットが埋め込まれている。各結合量子細線のトンネル結合をゲート電圧 V_{T1} 、 V_{T2} によって制御し、ビームスプリッターとして動作させると、干渉がリングの上下の位相差のみに依存するようになり、位相測定が可能である。量子ドットのゲート電圧 V_p によって量子ドットのエネルギー準位を調整できる。

(3) 電子スピンの非局所な量子もつれ状態の生成と検出

図1のような試料において、左の量子ドットに電子を2つ閉じ込めて量子もつれ状態を用意して、そのうちの1つだけを右の量子ドットへと移送することによって非局所な量子もつれ状態の生成を行った。

(4) 量子ドットを伝播する電子の位相測定

(1) から (3) の当初から予定していた研究課題に加え、2 経路干渉計が表面弾性波を用いなくても想定よりよく動作したことから、2 年目からこの干渉計を用いた電子の伝達位相の測定を研究課題に加えた。

図2に示されるように、新たに開発された2 経路干渉計中に量子ドットを埋め込み、量子ドットを伝播する電子の伝達位相の測定を行った。これは、干渉計で形成される飛行量子ビットと量子ドットで形成される固定量子ビットとの間の結合にも関連した課題である。特に、量子もつれ状態として知られる近藤基底状態を伝播位相の観点から明らかにするべく実験を進めた。

4. 研究成果

(1) 遠く離れた量子ドット間のコヒーレントな単一電子輸送

表面弾性波によって、離れた量子ドット間で単一電子を約 90%の効率で移送することに成功した。更に、図1のゲート電圧 V_G によって、伝送のタイミングを1ナノ秒以下で制御することができた。電子の移送時間(距離/伝播速度)が約1ナノ秒なので、合わせて2ナノ秒以下というデコヒーレンス時間よりも遥かに短い時間で電子移送を完了できる。この結果は Nature に掲載された。

(2) 飛行電荷量子ビットの多量子ビット化

(1) と並行して開発を進めた2 経路干渉計(2012年に Nature Nanotechnology に掲載)に表面弾性波発生器を組み合わせ、空乏化した干渉計で2 経路干渉を制御した。まだ忠実度は低いものの、一量子干渉が任意に電氣的に制御できている。また、この量子ビットが非常に長いコヒーレンス時間を持つことも確認された。これは、従来の量子干渉計のデコヒーレンスの主要原因である電子-電子相互作用の影響が回避できるからである。セットアップと試料デザインの改良によって確実に忠実度の向上が見込めることから、多量子ビット化への重要な足がかりが得られている。(投稿準備中)

(3) 電子スピンの非局所な量子もつれ状態の生成と検出

図1の試料において、量子もつれした2 電子を約 90%の効率で別々の量子ドットへと分離することに成功した。また、(1) と同様に、この分離がデコヒーレンス時間よりも遥かに短い時間で実行できることが確認され

た。この結果は(1)の結果と合わせて Nature に掲載された。

ただし、非局所な量子もつれ状態を確認するところまでは至らなかった。これは、表面弾性波とスピン軌道相互作用によって、量子ドットに捕獲された電子のスピンが検出前に回ってしまうためである。

この影響を回避するために、プロジェクトの後半では、表面弾性波によって動く量子ドット中の2 電子を別々の動く量子ドットへと分離する技術の開発を進めた。また、分離後の2 電子の量子もつれをベル測定によって検出する方法を検討、提案した。(投稿準備中)

(4) 量子ドットを伝播する電子の位相測定

量子ドットが近藤状態にない場合には、ドットを通過する電子が獲得する位相が、クーロンピーク毎に π だけ変化する様子を観測した。一方で、量子ドットが近藤状態にある場合には、各クーロンピークにおいて位相が $\pi/2$ ずつシフトする様子が観測された。この結果は、近藤基底状態がスピン-重項であり、共鳴がフェルミ面において起きていることの重要な証拠である。(投稿中)

また、各クーロンピークに対応する軌道のパリティ関係に依存して、隣り合うクーロンピーク間で位相が π 跳ぶ場合と跳ばない場合があることが理論的に知られている。ところが先行研究では、比較的電子数が多くなる(電子数 >15) と、クーロンピーク間で位相が必ず跳ぶという結果が報告されている。本研究では、電子数がより多い領域で、信頼性の高い位相測定を実現した。そして、位相の π の跳びは、電子数が比較的多くて(電子数 >20) ドットと電極との結合エネルギーがドット内のエネルギー準位間隔よりも少し大きくなった状態でも、依然として軌道のパリティを反映するという先行研究に反する結果を得た。(投稿準備中)

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8件)

1. Tobias Bautze, Christoph Süssmeier, Shintaro Takada, Christoph Groth, Tristan Meunier, Michihisa Yamamoto, Seigo Tarucha, Xavier Waintal and Christopher Bäuerle, “Theoretical, numerical, and experimental study of a flying qubit electronic interferometer”, Phys. Rev. B 89, 125432 (2014).
2. 樽茶清悟、大岩頭、山本倫久、“電気制御電子スピンを用いた量子情報システムの現状と将来展望”, 固体物理 48, 557-573 (2013).
3. S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto,

- S. Tarucha, A. D. Wieck, L. Saminadayar, C. Bäuerle and T. Meunier, “Fast and efficient single electron transfer between distant quantum dots”, *Journal of Applied Physics* 113, 136508 (2013).
4. 山本倫久、高田真太郎、樽茶清悟、“固体量子情報の長距離移送と量子電子光学実験への挑戦”(解説), *日本物理学会誌* 68, 288-295 (2013).
 5. 山本倫久、高田真太郎、樽茶清悟、Sylvain Hermelin、Christopher Bäuerle、Tristan Meunier、“表面弾性波を用いた単一電子移送: 飛行電子の量子光学実験に向けて”, *固体物理* 47, 163-169 (2012).
 6. Michihisa Yamamoto, Shintaro Takada, Christopher Bäuerle, Kenta Watanabe, Andreas D. Wieck and Seigo Tarucha, “Electrical control of a solid-state flying qubit”, *Nature Nanotechnology* 7, 247-251 (2012).
 7. M. Yamamoto, H. Takagi, M. Stopa and S. Tarucha, “Hydrodynamic Rectified Drag Current in a Quantum Wire Induced by Wigner Crystallization”, *Phys. Rev. B* 85, 041308(RC) (2012).
 8. Sylvain Hermelin, Shintaro Takada, Michihisa Yamamoto, Seigo Tarucha, Andreas D. Wieck, Laurent Saminadayar, Christopher Bäuerle and Tristan Meunier, “Electron surfing on a sound wave as a platform for quantum optics with flying electrons”, *Nature* 477, 435-438 (2011).
- [学会発表] (計22件)
1. M. Yamamoto, S. Takada, C. Bäuerle, J. von Delft, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Electron flying qubit and measurement of the Kondo phase shift”, *FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology*, The University of Tokyo, Japan, Jan. 29, 2014.
 2. M. Yamamoto, S. Takada, C. Bäuerle, J. von Delft, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Electron flying qubit and measurement of phase shift through a Kondo state”, *Swiss-Japanese Nanoscience Workshop: Materials Phenomena at Small Scale*, NIMS, Tsukuba, Japan, Oct. 9, 2013. (invited)
 3. 高田真太郎, 山本倫久, 中村隼也, 渡辺健太, C. Buerle, A. D. Wieck, 樽茶清悟, “表面弾性波を用いた単一電子のコヒーレント制御”, *日本物理学会 2013年秋季大会*, 2013/9/25, 徳島, 徳島大学.
 4. M. Yamamoto, “Quantum electron optics on depleted channels”, 第3回 半導体量子効果と量子情報の夏期研修会, 2013/9/5, 那須, ホテルサンバレー那須.
 5. Shintaro Takada, Michihisa Yamamoto, Shunya Nakamura, Kenta Watanabe, Christopher Bäuerle, Andreas D. Wieck and Seigo Tarucha, “Coherent control of single electron in a tunnel-coupled wire driven by surface acoustic wave”, *16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS 16)*, ThOM14, Wroclow, Poland, Jul. 1-5, 2013.
 6. Michihisa Yamamoto, Shintaro Takada, Christopher Bauerle, Kenta Watanabe, Sylvain Hermelin, Tristan Meunier, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha, “Measurement of phase shift through a quantum dot using a solid-state flying qubit”, *The 40th International Symposium on Compound Semiconductors*, Kobe Convention Center, Kobe, Japan, May 23, 2013. (invited)
 7. 高田真太郎, 山本倫久, Christopher Bauerle, 渡辺健太, Andreas D. Wieck, 樽茶清悟, “多電子領域における量子ドットの伝達位相測定”, *日本物理学会第68回年次大会*, 2013/3/29, 広島, 広島大学.
 8. 山本倫久, 領域4 若手奨励賞記念講演 “飛行量子ビットを用いた量子情報科学の研究”, *日本物理学会第68回年次大会*, 2013/3/27, 広島, 広島大学. (招待講演)
 9. 山本倫久, “表面弾性波による単一電子輸送”, *日本物理学会第68回年次大会*, 2013/3/27, 広島, 広島大学. (招待講演)
 10. M. Yamamoto, “Measurement of Kondo scattering phase with a true two-path interferometer”, *3rd Japan-Israel binational workshop on quantum phenomena*, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate School, Japan, Mar. 10-13 (2013). (invited)
 11. 渡辺健太, 高田真太郎, 山本倫久, Andreas D. Wieck, 樽茶清悟, “電子ポンプによる非平衡単一電子輸送”, *日本物理学会 2015年秋季大会*, 2013/9/21, 神奈川, 横浜国立大学.
 12. M. Yamamoto, “Experimental platform for quantum optics with flying electrons: flying qubit and single electron transfer”, *Quantum Transport through Nanostructures (APCTP-ICTP Joint conference)*, Pohang,

- Korea, Sep. 2 (2012).
- 1 3. S. Takada, C. Bäuerle, M. Yamamoto, K. Watanabe, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Transmission Phase in the Kondo Regime Revealed in a True Two-Path Interferometer”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich Switzerland, Aug. 3 (2012). (invited)
- 1 4. S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. D. Wieck, L. Saminadayar, C. Bäuerle, and T. Meunier, “Fast and efficient transfer of a single electron between distant quantum dots”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich Switzerland, Aug. 2 (2012). (invited)
- 1 5. S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. D. Wieck, L. Saminadayar, C. Bäuerle, and T. Meunier, “Fast and efficient transfer of a single electron between distant quantum dots”, 7th international Conference on Quantum Dots, Santa Fe Convention Center, Santa Fe, New Mexico, USA, May 18 (2012). (invited)
- 1 6. 山本倫久, Sylvain Hermelin, 高田真太郎, 樽茶清悟, Andreas D. Wieck, Laurent Saminadayar, Christopher Baeuerle, Tristan Meunier, “表面弾性波を用いた離れた量子ドット間の単一電子移送”, 日本物理学会第67回年会, 2012/3/27, 大阪, 関西大学.
- 1 7. 高田真太郎, 渡辺健太, 山本倫久, C. Bauerle, A. D. Wieck, 樽茶清悟, “結合量子細線・ABリング複合系を用いた量子ドットにおける電子の伝達位相の測定”, 日本物理学会第67回年会, 2012/3/24, 大阪, 関西大学.
- 1 8. M. Yamamoto, S. Takada, K. Watanabe, C. Baeuerle, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Electrical Control of a Flying Charge Qubit”, LT26, 16P-D025, Beijing, China, Aug. 16 (2011).
- 1 9. S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Wieck, L. Saminadayar, C. Bauerle and T. Meunier, “Single Electron Transfer Between Distant Quantum Dots”, LT26, 16m-D23, Beijing, China, Aug. 16 (2011).
- 2 0. S. Hermelin, S. Takada, A. D. Wieck, M. Yamamoto, S. Tarucha, L. Saminadayar, C. Bäuerle and T. Meunier, “Single electron transport between two distant lateral few electron quantum dots”, EP2DS19, Tu-P-48,

Tallahassee, Florida, USA, July 26 (2011).

- 2 1. K. Watanabe, S. Takada, M. Yamamoto, C. Bauerle, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Quantum coherence in an Aharonov-Bohm ring with tunnel-coupled wires”, EP2DS 19, Tu-P-76, Tallahassee, Florida, USA, July 26 (2011).
- 2 2. S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Non-adiabatic quantum interference in an Aharonov-Bohm ring with a tunnel-coupled wire”, EP2DS19, Th4-4, Tallahassee, Florida, USA, July 28 (2011).

[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]

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

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・助教
研究者番号：00376493