

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20684011

研究課題名 (和文) 電流相関測定による量子相関の解明と制御

研究課題名 (英文) Investigation of quantum correlation via current cross correlation measurement

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

研究成果の概要 (和文)：非局所量子もつれ状態の生成に適した集積可能な飛行電荷量子ビットを初めて開発した。また、飛行量子ビットの単一電子単位での制御を目指し、表面弾性波を用いて単一電子を周囲の電子から孤立させたまま離れた量子ドット間を移送する技術を立ち上げた。これらの技術により、量子計算に不可欠とされる非局所量子もつれを生成、利用するための基盤技術が整った。また、超伝導-常伝導接合において、クーパー対を分離することを目指した研究を行った。その準備として、常伝導体として使用されるグラフェンの電子物性について基礎的な研究を進めて大きな成果を得た。

研究成果の概要 (英文)：We developed a flying charge qubit device on semiconductor, which is suitable for generation of non-local entanglement and qubit multiplication. We also developed a technology to transfer a single electron between distant quantum dots through a depleted 1D wire. Combining these technologies should allow for creation of a non-local entangled state in a single electron unit, which is essential for quantum computation.

We also aimed for splitting Cooper pairs in superconductor-normal metal junctions. For preparation, we investigated and revealed basic electronic properties of graphene used as a normal metal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

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：半導体、量子相関、電流相関、量子雑音、表面弾性波

## 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。これらの研究は、閉じ込めエネルギーを精

密に制御し、これを光や電流でプローブすることによって進展してきた。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。これらに続くステッ

プとして最重要な課題は、量子間の相関、つまり2電子の量子力学的な相関を直接的に捉えて利用することであった。また、こうした量子相関を生成する固体系の設計技術の確立も重大な課題として残されていた。

## 2. 研究の目的

上記を踏まえ、電流相関の測定を通して量子力学的な電子相関を明らかにし、その応用、特に量子情報処理へと繋げることを最終的な目的とした。具体的には、(1) 飛行電荷量子ビットの量子もつれ検出と制御と、(2) 超伝導体-低次元常伝導接合の量子もつれ生成と検出を目指して研究を進めた。いずれも非局所量子もつれの生成に適し、従来は研究が進められていなかったユニークな系である。

## 3. 研究の方法

### (1) 飛行電荷量子ビット

GaAs/AlGaAs 界面の二次元電子系にゲート電極を配して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) の結合干渉計 (図1参照) を形成し、伝播する電子がどちらの細線に存在するかを量子ビットとして制御した。更に、量子ビット間の量子もつれ生成を目指して、表面弾性波を用いた単一電子移送の技術開発を行った。

### (2) 超伝導体-低次元常伝導接合

InAs 量子ドットやグラフェンを超伝導電極と接合させ、クーパ対を分離することによって非局所量子もつれを生成する技術の開発を目指した。将来的な応用も視野に入れ、特にデバイス加工の自由度が大きいグラフ

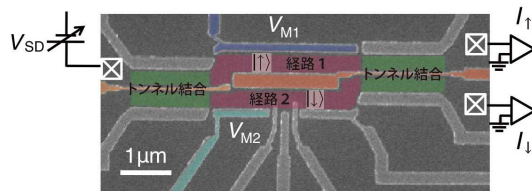


図1: 飛行量子ビットの制御に用いた干渉計の電子顕微鏡写真と測定系。アハロノフボームリングをトンネル結合細線で挟んだ形になっている。オレンジ色のゲート電極の電圧を変えることによって経路間のトンネル結合を、ゲート電圧  $V_{M1}$  や  $V_{M2}$  によって電子が経路間で獲得する位相差を制御することができる。左側から、経路1 (上の経路) へと電子を注入する。右側のトンネル結合領域の出口付近の量子情報は、電流値  $I_1$ 、 $I_2$  を測定することによって読み出すことができる。

ェンを中心に研究を進めた。本研究では、まだ理解が不十分であったグラフェンの電気的特性についての基礎的な研究も進めた。

## 4. 研究成果

### (1) 飛行電荷量子ビット

まず、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) からなる干渉計において、飛行量子ビットの電気的な制御に成功した。飛行量子ビットは、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。飛行量子ビットにおいては、量子間の距離や相互作用を自由に変えることができることから、量子ドット内に固定された量子ビットに比べて非局所的な量子もつれ状態の生成や利用が容易であるという利点がある。また、この量子ビットのコヒーレンス長が非常に長いことも確認された。この結果は内外で高く評価され、研究期間終了後の2011年度に Nature Nanotechnology に論文掲載された。

次に、量子ビット間のクーロン相互作用を利用して量子もつれを生成する実験を行うための準備として、クーロン相関の強さを評価した。具体的には、量子ビットの出力電流と隣接した量子細線との間の電流雑音相関の測定を行った。その結果、現状のデザインのままでは相互作用の大きさが不十分であることが確認された。これは、当初の予定よりも伝導チャンネルの数が多くなってしまったことと遮蔽効果が大きいことに由来している。そこで、実効的なクーロン相互作用を大きくすることと単一電子単位での制御を目的として、表面弾性波による単一電子伝導を干渉計に適用するべく研究を進めた。

具体的には、単一電子を単一チャンネルを通

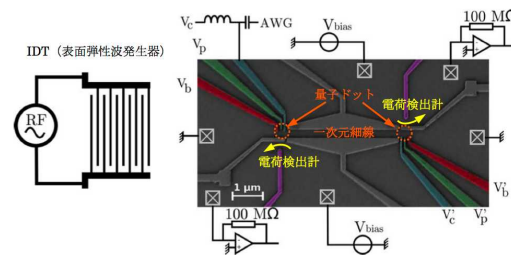


図2: 単一電子移送に用いた試料の構造。半導体表面にゲート電極を配することにより、二つの量子ドットとそれらを結ぶ一次元チャンネルが形成されている。また、試料の中心から2 mm離れた場所にIDTを置き、表面弾性波を送ることができるようにした。電荷検出計によって、量子ドット中に閉じ込めた電子の数を数えることができる。

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。ここでは、図2のように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、単一量子ドットを量子ドット間で

移送する実験を行った。表面弾性波を送ることにより、90%以上の精度で単一電子を移送・捕獲することができた。この結果も、量子もつれを生成する量子ネットワークを形成するために不可欠な高度な技術として高く評価され、研究期間終了後の2011年度にNatureに掲載された。

現在は、飛行量子ビットの制御技術と単一電子移送の技術とを融合し、量子もつれの生成と検出に取り組んでいる。

## (2) 超伝導体-低次元常伝導接合

InAs量子ドットに関しては、クーパー対の分離後の量子もつれの利用方法が明確でないことがわかったので、長いスピンコヒーレンスを有し、且つ加工によって多彩なナノ構造を作り出せるグラフェンを用いた研究に専念した。

まずは、グラフェンの基本的な電子物性の研究を行った。特に、バンドギャップを電界によって誘起できる数層グラフェンをトップゲートとバックゲートで挟んだ二重ゲート構造を用いて、そのバンド構造を調べた。その結果、2層グラフェンやABC積層3層グラフェンは垂直電場の印加によってバンドギャップを生じること、ABA積層3層グラフェンではバンドギャップではなく伝導帯と価電子帯との重なりが電場によって増大されることなどが確認された。特に、ABA積層3層グラフェンがバンドの重なりを電場によって調整できる半金属であるという結果は、Nature Nanotechnologyに掲載されるなどして注目を集めた。

また、グラフェンと良質な金属接合を得るために接触抵抗を調べ、Ti/Au電極の場合には接触抵抗が電荷密度にあまり依存しないことがわかった。そして、超伝導体(Al)電極を取り付ける場合には、Pdを接触金属として利用すると良質なコンタクトが取れることがわかった。

一方で、グラフェン中のキャリアは、電荷不純物によってかなりの散乱を受けることもわかった。その様子は、垂直電場下の2層グラフェンにおいて、フェルミ面がバンドギャップ中にあるにも関わらず、不純物準位を介したホッピング伝導によって電流が流れる様子からも確認できた。

このような不純物準位は、数meV程度のエネルギースケールを持ち、これが超伝導ギャップを超えるとグラフェンに特有の伝導特性が失われてしまう。従って、清浄なグラフェン上に超伝導転移温度が高い超伝導材料を接続することが現在の課題である。

## 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7件)

1. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto and S. Tarucha, "Physics and applications of double gated graphene devices", Nano today **6**, 42-60 (2011).
2. 山本 倫久, Monica F. Craciun, Saverio Russo, Alberto F. Morpurgo, 樽茶 清悟, "3層グラフェンの電気伝導とバンド構造", 固体物理特集号 **45**, 581-588 (2010).
3. P. A. Maksym, M. Roy, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha and H. Aoki, "Proposal for a magnetic field induced graphene dot", Journal of Physics: Conference Series **245**, 012030 (2010).
4. S. Russo, M. F. Craciun, M. Yamamoto, A. F. Morpurgo, and S. Tarucha, "Contact resistance in graphene-based devices", Physica E **42**, 677-680 (2010).
5. S. Russo, M. F. Craciun, M. Yamamoto, S. Tarucha, and A. F. Morpurgo, "Transport through double-gated graphene-based devices", New Journal of Physics **11**, 095018 (2009).
6. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. F. Morpurgo and S. Tarucha, "Trilayer graphene is a semimetal with a gate-tunable band overlap", Nature Nanotechnology **4**, 383 - 388 (2009).
7. K. Hitachi, A. Inoue, A. Oiwa, M. Yamamoto, M. Pioro-Ladriere, Y. Tokura and S. Tarucha, "Negative differential conductance in a quantum dot and possible application to ESR detection", Journal of Physics: Conference Series **150**, 022026 (2009).

[学会発表] (計41件)

1. S. Tarucha, M. Yamamoto, S. Takada, C. Bäuerle, and A. D. Wieck, "Flying Charge Qubit using Dynamic Phase Control in a Coupled Quantum Wire", The Third International Workshop on Dynamics and Manipulation of Quantum Systems (invited), 2011.02.14-16, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
2. R. Sakano, R. Yoshii, M. Eto, N. Kawakami, M. Yamamoto, and S. Tarucha, "An exact approach for the Kondo

- state of a quantum dot embedded in an Aharonov-Bohm ring”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2011.01.12, NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.
3. S. Tarucha, M. Yamamoto, S. Takada, C. Bäuerle, and A. D. Wieck, “Non-adiabatic Interferometer of an Aharonov-Bohm Ring with a Tunnel-coupled Wire”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 2011.01.12, NTT Atsugi R&D Center, Atsugi, Kanagawa, Japan.
  4. M. Yamamoto, “Electrical Control of a Flying Charge Qubit and Geometric Phase of an Aharonov-Bohm Ring”, Frontiers in Nanoscale Science and Technology Workshop (invited), 2011.01.05, RIKEN, Japan.
  5. 塩谷広樹, 山本倫久, 徳光晋太郎, Saverio Russo, Monica F. Craciun, 樽茶清悟, “2層グラフェンPN接合における電気伝導”, 日本物理学会平成22年度秋季大会, 2010.09.24, 大阪.
  6. 高田真太郎, 山本倫久, C. Bauerle A. D. Wieck, 樽茶清悟, “非断熱状態変化を用いた量子干渉計”, 日本物理学会平成22年度秋季大会, 2010.09.23, 大阪.
  7. Y. Kondo, K. Kimura, M. Yamamoto, K. Ono, S. Tarucha, “Electron spin-nuclear spin coupling dynamics in double quantum dot”, 6th international Conference on the Physics and Applications of Spin related Phenomena in Semiconductors, 2010.08.02, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
  8. S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, A. D. Wieck, S. Tarucha, “Distinct interferences in adiabatic and non-adiabatic interferometers: breakdown of Onsager’s law by a quantum unitary operation”, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2010.07.29, Seoul, Korea.
  9. M. Yamamoto, H. Shioya, S. Russo, M. F. Craciun, K. Takeda, S. Tokumitsu, and S. Tarucha, “Non-linear transport through a trilayer graphene PN junction”, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2010.07.29, Seoul, Korea.
  10. A. Inoue, M. Yamamoto, A. Oiwa, and S. Tarucha, “Detection of back-action by a quantum point contact on the spin dependent transport through a quantum dot”, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2010.07.27, Seoul, Korea.
  11. P. A. Maksym, M. Roy, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha, and H. Aoki, “Proposal for a magnetic field induced graphene dot”, Quantum Dot 2010, 2010.04.27, Nottingham UK.
  12. M. Yamamoto, M. F. Craciun, S. Russo, A. F. Morpurgo and S. Tarucha, “Electron Transport and Band Structure of Trilayer Graphene”, 2010 MRS Spring Meeting (invited), 2010.04.07, San Francisco, CA, USA.
  13. 井上敦文, 山本倫久, 大岩頭, 樽茶清悟, “高電圧を印加した近接量子ポイントコンタクトによる量子ドットのスピンの依存したクーロンピークの変化”, 日本物理学会, 2010.03.21, 岡山大学.
  14. M. Yamamoto, C. Baeuerle, and S. Tarucha, “Electrical control of a flying charge qubit and Aharonov-Bohm phase”, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), 2010.03.10, 東京大学駒場キャンパス.
  15. A. Inoue, M. Yamamoto, A. Oiwa, S. Tarucha, “Detection of back-action to a quantum dot caused by a nearby quantum point contact”, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), 2010.03.10, 東京大学駒場キャンパス.
  16. Y. Kondo, K. Kimura, M. Yamamoto, K. Ono, S. Tarucha, “Detection of back-action to a quantum dot caused by a nearby quantum point contact”, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), 2010.03.10, 東京大学駒場キャンパス.
  17. M. Yamamoto, T. Kodera, Y. Kondo, K. Kimura, K. Ono, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, “Hyperfine interaction in a vertical double quantum dot”, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), 2010.03.09, 東京大学駒場キャンパス.
  18. 山本倫久, “3層グラフェンの電気伝導とバンド構造”, 物性研短期研究会 (招待講演), 2009.10.24, 東京大学物性研究所.
  19. 近藤裕佑, 木村啓太, 山本倫久, 大野圭司, 樽茶清悟, “縦型二重量子ドットに

- おける電子スピン-核スピン結合ダイナミクス, 日本物理学会, 2009. 09. 25, 熊本大学.
20. S. Russo, M.F. Craciun, M. Yamamoto and S. Tarucha, “Shot noise in graphene devices”, Graphene Tokyo 2009, 2009. 07. 25, 東京大学.
  21. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. F. Morpurgo and S. Tarucha, “Trilayer graphene: a semimetal with gate - tunable band overlap”, Graphene Tokyo 2009, 2009. 07. 25, 東京大学.
  22. S. Russo, M. F. Craciun, M. Yamamoto, A. F. Morpurgo, and S. Tarucha, “Contact resistance in graphene - based devices”, Graphene Tokyo 2009, 2009. 07. 25, 東京大学.
  23. Michihisa Yamamoto, Christopher Bauerle, and Seigo Tarucha, “Full control of a flying charge qubit: detection and control of transmission phase shift by Ramsey interference”, The 18th Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), 2009. 07. 23. 神戸.
  24. S. Russo, M. F. Craciun, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. F. Morpurgo, and S. Tarucha, “Trilayer graphene: a semimetal with gate-tunable band overlap”, The 18th Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), 2009. 07. 23. 神戸.
  25. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, A. F. Morpurgo, and S. Tarucha, “Contact resistance in graphene-based devices”, The 18th Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), 2009. 07. 20. 神戸.
  26. M. Yamamoto, C. Bäuerle, S. Tarucha, “Gate Voltage Control of a Flying Charge Qubit and Observation of Transmission Phase Shift in an Aharonov-Bohm Ring”, FRONTIERS IN NANOSCALE SCIENCE AND TECHNOLOGY 2009, 2009. 05. 29, Harvard University, USA.
  27. 山本倫久, Christopher Bäuerle, 樽茶清悟, “飛行電荷量子ビットを用いた AB リングにおける位相シフト観測”, 日本物理学会 2009 年年次大会, 2009. 03. 28, 立教大学.
  28. S. Russo, M. Yamamoto, M. Craciun, and S. Tarucha, “Shot noise in graphene based devices”, 日本物理学会 2009 年年次大会, 2009. 03. 27, 立教大学.
  29. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, and S. Tarucha, “Contact resistance in graphene-based devices”, 日本物理学会 2009 年年次大会, 2009. 03. 27, 立教大学.
  30. M. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J. Oostinga, A. Morpurgo, and S. Tarucha, “Tunable band structure in double gated trilayer graphene”, 2009 APS March Meeting, 2009. 03. 18, Pittsburgh, Pennsylvania UAS.
  31. M. Yamamoto, C. Bäuerle, and S. Tarucha, “Observation of quantum phase shift in an Aharonov-Bohm ring with a fully controlled flying charge qubit”, 2009 APS March Meeting, 2009. 03. 16, Pittsburgh, Pennsylvania UAS.
  32. K. Kimura, K. Ono, M. Yamamoto, and S. Tarucha, “Electron-nuclear spin dynamics in vertical double quantum dot”, International symposium on nanoscale science and quantum physics (nanoPHYS'09), 2009. 02. 24, 国際文化会館、東京.
  33. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, S. Tarucha, J. B. Oostinga, and A. F. Morpurgo, “Transport in double-gated few-layer graphene devices”, International symposium on nanoscale science and quantum physics (nanoPHYS'09), 2009. 02. 23, 国際文化会館、東京.
  34. S. Russo, M. Craciun, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. Morpurgo, and S. Tarucha, “Tunable-band structure in double-gated trilayer graphene”, International Symposium on nanoscale transport and technology”, 2009. 01. 24, NTT 基礎研究所.
  35. M. Yamamoto, C. Bäuerle, and S. Tarucha, “Observation of quantum phase shift in an Aharonov-Bohm ring with a fully controlled flying qubit”, International Symposium on nanoscale transport and technology”, 2009. 01. 22, NTT 基礎研究所.
  36. M.F.Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. F. Morpurgo, S. Tarucha, “Tunable Band-structure in Double-Gated Graphene Trilayer”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008. 09. 22, 岩手大学.
  37. 山本倫久, 小田穰, 樽茶清悟, “量子細線-AB リング結合系における 2 電子干渉効果”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008. 09. 22, 岩手大学.

38. 木村啓太, 財津光一郎, Jonathan Baugh, 吉田勝治, 山本倫久, 樽茶清悟, “電荷計による縦型単一, 二重量子ドットの電子数検出”, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008.09.20, 岩手大学.
39. T. Matsui, H. Kojima, N. Kawai, K. Kawabata, M. Yamamoto, R. Deacon, S. Tarucha, and H. Fukuyama, “Scanning tunneling microscopy and spectroscopy observation of graphene”, 25th International Conference on Physics of Low temperature (LT25), 2008.08.08, Amsterdam, Holland.
40. M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. F. Morpurgo, and S. Tarucha, “Tunable band-structure in Double-Gated Graphene Trilayer”, 25th International Conference on Physics of Low temperature (LT25), 2008.08.07, Amsterdam, Holland.
41. K. Hitachi, A. Inoue, A. Oiwa, M. Yamamoto, and S. Tarucha, “Negative differential conductance in a quantum dot and possible application to ESR detection”, 25th International Conference on Physics of Low temperature (LT25), 2008.08.05, Amsterdam, Holland.

[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]

ホームページ等

<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

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし