

研究報告書

「単一電子量子回路の集積化に向けた基盤技術の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成25年10月～平成29年3月

研究者: 山本 倫久

1. 研究のねらい

現代の電子機器を支える演算回路では、電流に伴って発生するジュール発熱とエネルギー散逸が大きな問題となっている。この問題に対処すべく、シリコンのトランジスタデバイスとは異なる動作原理を持つデバイスの開発が世界中で進められている。例えば、スピンエレクトロニクス、マルチフェロイクスなどは、電荷とは異なる新しい自由度を利用する試みである。しかし、こうしたデバイスの動作概念のほとんどは、依然として古典力学的な自由度を用いたものであり、状態の緩和に伴う熱へのエネルギー散逸が避けられない。一方、エネルギー散逸のない量子力学的な自由度の処理によって従来の計算機では不可能な高速並列処理を行う「量子計算機」の開発が、最近、様々な物理系で行われるようになった。しかし、高度な技術が必要な量子計算機では、量子系のエネルギー散逸はないものの、現状ではその制御系(高周波エレクトロニクス)で大きなエネルギー消費と大掛かりなインフラストラクチャの構築が避けられない構成となっている。

本研究では、半導体中を伝搬する電子の量子状態(量子情報)を制御することによって構成され、電子あるいは量子力学的な情報の伝搬に原理的にエネルギー散逸を伴わない「量子回路」の開発を将来的な目標に定め、その集積化のための基盤技術を開発することを目的とした。この量子回路では、トランジスタ構造に近い半導体回路で、ゲート電圧を操作しながら電流を注入するだけで量子情報処理を実行できる。また、伝搬する電子が電子間相互作用によってその量子状態を失うことを避けるために、空乏化したチャンネル中を伝搬する単一電子の量子状態を制御する新しい量子回路を提案し、単一電子の量子状態(単一量子ビット)が定義される「単一電子干渉」の高い精度での制御を目指した。それに加え、2 電子の干渉が関与する 2 量子ビット演算の実現も目標とし、それに必要な技術の開発を行った。ここでは、これらの量子ビット制御を 90%程度の精度で行うことを具体的な目標とした。こうした技術の開発は、大型計算機サーバーなどへの使用が見込まれる量子回路を用いた低消費電力システムの開発に留まらず、現在開発が進められているものに比べて圧倒的に小さなインフラストラクチャーで構成される新しいタイプの量子計算機を実現するための指針や要素技術の開発に繋がるものである。

2. 研究成果

(1) 概要

伝搬する電子の量子状態として、電子が 2 経路干渉計のどちらの経路に存在するかで定義される電荷状態(飛行電荷量子ビット)と、電子の自転に対応する量子 2 準位系であるスピン(飛行スピン量子ビット)を対象として、これらを高い精度で制御・伝送するための要素技術を開発した。目標値には至らなかったが、空乏化した量子回路を用いることにより、単一飛行

電荷量子ビットの制御精度を、従来の 8%から 60-80%程度まで高めることができた(投稿予定)。一方で、飛行電荷量子ビットの 2 量子ビット演算は達成できなかった。飛行スピン量子ビットに関しては、2 量子ビット操作に関連して、スピン量子もつれ対の空間的な分離を 90%近い効率で達成することができた(投稿予定)。これは、量子計算に不可欠な非局所量子もつれ状態の生成に相当する。既存の技術として確立されつつある単一電子スピン量子ビットの制御やそのコヒーレントな長距離伝送技術(成果リスト 2)、スピン読み出し技術などと合わせることで、電子系では未だに達成されていないベル測定(量子もつれの厳密な証明、投稿準備中)やユニバーサルな量子計算が可能になる。

また、これらの主要な成果を得る過程で、飛行量子ビット集積化に必要な技術や知見が多く得られた。飛行電荷量子ビットに関しては、伝搬する電子の波動関数の位相を伝達できることが飛行量子ビットを制御できることと等価である。本研究では、位相の制御・検出が可能な条件を実験・理論両面から詳細に明らかにした(成果リスト 3,5)。また、位相測定技術を利用して量子ドットを介した伝導に関して成果を挙げるとともに、高い位相検出精度を確認した(成果リスト 1,4)。空乏化した干渉計における実験では、表面弾性波を利用して空乏化したチャンネル中を電子を伝送する技術が大きく改善された。将来的に電子を 1 個ずつ伝送することを想定し、単一電子を離れた量子ドット間で断熱的に、従って高い効率で伝送できた。スピン量子ビットに関しては、表面弾性波で電子を伝送する直前に、電極から孤立した準安定状態にある電子スピンを操作できることを示した。また、両方に共通して、干渉計を伝搬して出力端子に到達した電子を 1 個単位で捉えることを将来的な目標にし、電流を増幅する雪崩式増幅器の開発を行い、電流が充分小さい場合に増幅率 9(目標値 10)を達成した(投稿準備中)。

(2) 詳細

研究テーマ A「飛行電荷量子ビットの制御」

(a) 波動関数の位相の制御と検出

飛行電荷量子ビットは、2 経路干渉計を伝搬する電子の各経路における存在確率と電子波の経路間の相対的な「位相」によって定義される。波動関数の位相情報を有効に制御・利用することによって、情報を非散逸に伝送できることがこの系の特徴である。まず、開発した干渉計においてこの位相情報を精密に制

御・測定するための条件(=2 経路干渉を実現する条件)の詳細を、理論計算と実験の両面から明らかにした(PRB2014、NJP2014)。過去にも波動関数の位相を取り出す試みは行われてきたが、現状では本研究の手法によってのみ信頼性のある位相制御が可能であることが示された(APL2015)。また、位相制御のデモとして、電子波が量子ドットを通過する際に得る位相の変化を精密に制御・検出できることを示した。特に、超伝導と並んで電子間相互作用効果の代表例として知られる近藤効果が量子ドット中の局在スピンと伝導電子との相互作用によって生じている場合の位相変化を調べた。この場合の位相変化が $\pi/2$ になる「近藤の位

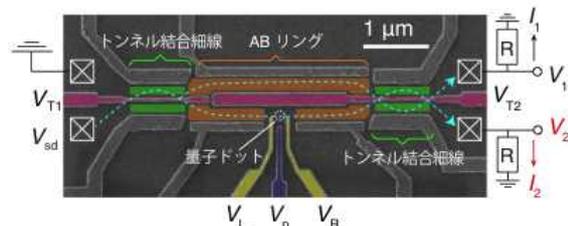


図1 量子ドットを伝搬する電子波の位相測定に利用した干渉計。出力電流 I_1, I_2 が逆位相で振動する場合に限って正しい位相測定ができる。

相シフト」の検証は、理論予測から 40 年に渡って世界中の挑戦を跳ね返してきた難題として有名である。本研究ではその検証実験に初めて成功した(PRL2014, PRB2016)。これは、電子相関の物理の歴史的な成果のひとつとして位置づけられる。

(b) 空乏化した干渉計を伝搬する単一電荷量子ビットの制御

本課題は、本研究の中心的な課題である。空乏化したチャネルへの電流の注入には、二次元電子に対して動く静電ポテンシャルの波として働く、表面を伝わる結晶の歪の波(表面弾性波)を用いた。表面弾性波によってつくられる動くポテンシャルの底にフェルミ面の下から電子を 1 個ずつ引き上げて空乏化したチャネル中に注入した。注入された単電子は、チャネル中のポテンシャル勾配において表面弾性波の動く閉じ込めポテンシャルから逃れ、単一ホットエレクトロンとして干渉しながら干渉計を伝導する。空乏化していない 2 経路干渉計における干渉の可視度(干渉に寄与する電流成分/全電流)が最大 8%程度だったのに対し、空乏化した干渉計では、目標の 90%には少し及ばないものの 60-80%程度の可視度で干渉を観測することができた(投稿予定)。また、空乏化していない干渉計における干渉信号が温度 1K 程度でほぼ消失するのに対し、空乏化した干渉計では、電子間相互作用による量子状態の損失がないことを反映して、温度 2K まで可視度の低下が見られなかった。一方で、単一電子を表面

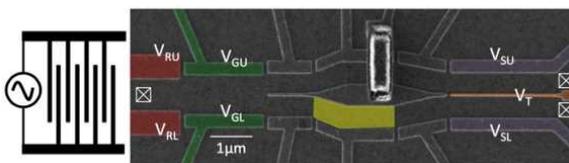


図2 空乏化した干渉計試料。ゲート電圧 V_{RU} , V_{RL} , V_{GU} , V_{GL} によって干渉計に注入する電子数を、 V_{SU} , V_{SL} , V_T によって 2 経路間のトンネル結合とポテンシャル差を調整できる。

弾性波のポテンシャル中に閉じ込めたまま干渉を捉えることはできなかった。本研究では、隣接した干渉計間のクーロン相互作用を利用して 2 量子ビット演算を実現することを提案していたが、高速のホットエレクトロンではクーロン相互作用が弱くなってしまったためにこれが難しい。2 量子ビット演算は今後の課題として残された。

(c) 単一電子単位の状態の読み出しに向けて

飛行量子ビットの操作と読み出しでは、表面弾性波の底に電子を 1 個ずつ入れて干渉させた後に平均的な電流値を測定するのではなく、1 個ずつ干渉計に注入された電子を干渉後に 1 個ずつ観測(検出)することが最終的な目標になる。そのための方法として、干渉計を量子ドットで結んで電子を純粋に 1 個ずつ伝送・検出する方法と、電子を次々に送るものの、検出を 1 個ずつ行う方法がある。

前者では、量子ドットから空乏化した経路へと単一電子を移す際に、基底状態に電子を留まらせることができるかどうかの問題である。本研究では、表面弾性波のパワーが強い場合に、それが可能であることを示した(Nanotechnology2016)。また、断熱的な場合には、電子注入のタイミングを表面弾性波のポテンシャルの底 1 個のレベルで合わせることができると、2 量子ビット演算においても有用である。

後者は、演算データを高速で集められるため、実現した場合にはより強いインパクトがある。干渉計を通過した電荷を 1 個ずつ高速(100MHz 程度)で読み取る技術の実現に向け、電子間相互作用による電子のエネルギー緩和を利用した雪崩式電流増幅器の開発を行い、増幅率 9(目標値 10)を得た(投稿準備中)。

<飛行電荷量子ビット 課題達成状況>

- ・単一電子を空乏チャンネル中を伝送させる技術の開発・改良 (SAWによる電子伝送): ◎
安定な量子化電流、99%を超える単一電子移送効率(断熱的移送)
Nanotechnology **27**, 204001 (2016).
- ・電子波の波動関数の位相制御 (数値計算との対応、電子波位相測定): ◎
高精度制御、コヒーレント伝導の評価(伝搬する電子波の位相を測る唯一の方法)
Phys. Rev. Lett. **113**, 126601 (2014); Phys. Rev. B **89**, 125432 (2014);
New Journal of Physics **16**, 083015 (2014); Appl. Phys. Lett. **107**, 063101 (2015) (cover);
Phys. Rev. B **94**, 081303 (RC) (2016) など
- ・単一電荷量子ビットの高忠実度制御 (目標:90%): ○ (8% → 60-80%に改善: 投稿予定)
- ・電流増幅器の開発(目標増幅率:10): ○ (増幅率: ~9)
- ・並列干渉計のクーロン相互作用を用いた2量子ビット演算: × 未達成

研究テーマB「飛行スピン量子ビットの制御」

環境との相互作用が弱いスピンは、一般的に電荷に比べて高いコヒーレンス(量子状態を失にくい性質)を持つことが知られている。また、飛行スピン量子ビットは、量子ドットに閉じ込められたスピン量子ビットと融合させることができる。電荷量子ビットの場合と同様に表面弾性波を用いれば、空乏化したチャンネル中を、単一電子スピンを周囲の電子スピンから孤立させたまま伝送できる。

本研究では、まず、遠く離れた量子ドット間を空乏化したチャンネルを介して伝送する単一電子のスピンの保存を確認した(Nature Nano.2016)。これにスピン軌道相互作用や電子スピン操作を合わせれば、任意の飛行スピン量子ビットを伝送、制御することが可能になる。更に2量子ビット操作を行うために、表面弾性波の動くポテンシャル(動く量子ドット)中に閉じ込められた2電子を伝送経路のクーロン斥力を利用して別々の経路へと分離する技術を開発した(図3参照、投稿予定)。量子ドット中の2電子の基底状態はスピン一重項という量子もつれ状態であり、その分離は非局所量子もつれ状態の生成に相当する。分離効率は約87%であり、電子系では未踏のベル測定(量子もつれの厳密な証明)を行うのに充分である。

<飛行スピン量子ビット 課題達成状況>

- ・SAWで電子移送ができる準安定状態における電子スピン状態制御: ◎
Phys. Rev. Lett. **115**, 096801 (2015).
- ・単一電子スピンの伝送と検出: ◎ Nature Nanotechnology **11**, 672-676 (2016)
- ・分岐回路における電子対の分離(予定外、非局所量子もつれ生成): ◎ 分離効率: ~87%
- ・電子対分離を利用した非局所量子もつれ状態の検証実験提案(予定外): ◎

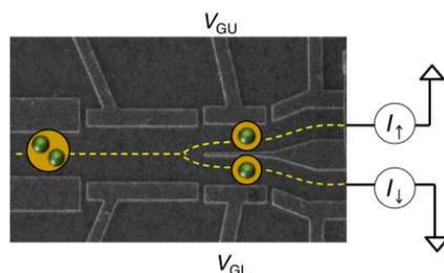


図3 電子対分離実験の試料と概念図。表面弾性波によって動く量子ドット中の2電子を、経路の分岐において別の経路中の動く量子ドットへと分離する。動く量子ドット中のクーロン相互作用によって、2電子が同時にひとつの量子ドットへと入ることを抑制している。これは、 V_{GL} , V_{GR} の関数として出力電流を観察することによって確認できる。

3. 今後の展開

本研究は、空乏化した経路を伝搬する電子の状態を制御する世界でも例のない取り組みである。本研究成果により、伝搬する電子の量子状態を制御して演算を実行する量子回路を構成するための技術要素が多く得られた。開発された量子状態制御の原理に基づいて、将来、量子計算機の全く新しいアーキテクチャが実現する可能性がある。一方で、本研究で開発された技術や知見はまだ初期段階にあり、制御精度には大きな改善の余地が残されている。

飛行電荷量子ビットに関しては、1 量子ビット演算の精度を更に高め、2 量子ビット演算を実現する必要がある。実用へと導くためには、現行のエラー訂正方法では 99%以上の精度が必要とされており、そのためには何段かの技術的、学術的なブレークスルーが必要である。ただし、飛行電荷量子ビットは、磁場掃引によってコヒーレントな信号成分(量子力学的な干渉成分)だけを抜き出すことが可能であるという特徴を有しており、それを利用すれば量子操作の要求精度の閾値は大きく下がる可能性がある。これに関しては、より理論的な検討が必要である。飛行スピン量子ビットに関しては、電子対分離の精度を高めると同時に、スピン軌道相互作用を利用した電子スピンの制御や、場合によっては量子ドットに閉じ込められた電子スピンを制御する技術と融合しながら技術開発を進める必要がある。直近の目標としては、ベル測定による非局所量子もつれの証明が挙げられる。それをステップとして、各技術要素の精度を高め、エラー訂正を含めて集積化へ向けたシステム設計を注意深く行う必要があるであろう。最近、インテル、グーグル、マイクロソフトなども量子情報処理研究に取り組み始めており、世界的に研究が行われている物理系と比較して優位性が得られる系を設計する必要がある。ここでは、設計自由度の高さ、制御速度の高さ、長距離相関の制御の容易さという飛行量子ビットの長所を積極的に利用する必要がある。

量子情報処理の実現に向けた大きな目標に加え、これらの技術開発の途中では量子もつれなどの固体の量子の性質に関する知見が多く得られるはずである。また、現在のトランジスタ動作に基づいた情報処理における発熱の問題から、大型サーバーなどでシステム全体の冷却の必要性が更に高まれば、量子計算機の開発を待たずして、低温で動作する本研究の非散逸な干渉計の出番が先に来る可能性もある。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究は、集積可能な 2 経路干渉計と高効率の単一電子移送という、世界でも私たちしか有していない技術を用いて全く新しい量子回路を作り出そうという試みである。研究目的の達成状況として、電荷量子ビットの 2 量子ビット演算を達成できていないことは非常に残念であるが、その他については概ね予定通りに進められた。一方で、位相シフトの測定に関する物理的な概念の構築や電子対の空間分離、それを利用した現実的なベル測定の提案など、予想を越えた成果を出せた部分もあった。全体として、研究を開始した当初と比べると全く違う新しい世界が見えているという感覚があり、それに関しては評価できる。具体的な反省点としては、空乏化している従来とは全く異なる系において、不純物散乱の予想外に大きな影響を早い段階で十分に予測、評価できていなかったこと、これらの問題が浮かび上がったからの対処法がすぐに見つけられず、一部足踏み状態になってしまったことが挙げられる。

本研究は、私の他に大学院生 2 人(後半は 1 人)という小さな研究体制で行われた。一方で、

私が長く共同研究を行っている仏ニール研究所とは強い共同研究体制を維持し、これが技術的な支えの一部になった。特に、単一スピンの長距離伝送は、実は8年にも及ぶ共同研究テーマである。当初は量子ドットに閉じ込められたスピン量子ビット情報の移送方法として、仏グループが多数のゲート電極に順次電圧をかけていく、或いは表面弾性波の定在波に電子を閉じ込めて定在波の位相をずらしていく、というスキームを提案し、共同研究を持ちかけてきたことがきっかけになっている。しかし、その後、私自身が表面弾性波のパルスで電子を伝送する現行の方法を提案し、それに合わせた試料設計を行ったことで現在の研究の流れができた。そして、技術要素の開発は長く共同で行っている。また、本さがけ研究テーマである伝搬する電子の干渉を制御する「量子電子光学実験」では、私自身の提案に彼らを巻き込んだ体制になっている。その意味で、本さがけの研究テーマ全般に渡り、共同研究も含めて私が主体的な役割を果たしてきたと言える。また、2経路干渉の制御や位相変化に関しては、多くの著名な理論家との共同研究によって大きな進展があった。

本研究の課題設定に関しては、世界でも全く初の試みであり、極めて先進性の高いものである。しかし、開発された技術はまだ初期段階のもので、改善の余地が非常に大きい。また、主要な成果の多くが未発表であり、それを論文発表するなどして、その意義を世に問うことが次の重要なステップになる。将来、飛行量子ビットのスキームが社会的に波及し、役に立つかどうかは、今後の技術開発と将来多くの研究者・技術者が同スキームに注目して開発に参加するかどうかにかかっている。現段階での評価は難しいが、今後数10年かけて本研究の成果が役に立つ可能性があり、それに向けて先陣を切ったことは自己評価できる。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

山本研究者は、電子波導波路での微弱な干渉電流を測定する高い技術を持っている。これを用いて本プロジェクトでは当初、空乏化したチャンネルでの単一電子の電子輸送を用いて、1および2量子ビットの精密操作を実現し将来の量子コンピュータの基礎を形成するという高い目標に挑戦した。ところが、実験を進めるうちに、空乏化したチャンネルでは、電子の不純物散乱が顕著に現れること、表面弾性波による電子輸送でホットキャリアの問題が生じることなどが、分かって来た。

そこでデバイスの改良を進める一方、電子のスピンを利用するなどの別の方向でもレベルの高い成果を模索した。この結果、80%に近いホットエレクトロンの干渉を実現し、電子の増幅率も9を実現した。更に90%に近い非局所的スピンもつれ2電子の形成に成功したと思われる。また飛行量子ビットとしての電子スピンが長距離保存されることがわかった。特に空乏化チャンネルでの電子波干渉に成功したことは評価できる。これらは直ちに量子コンピュータの実現に結びつくデータではないが、スピンを用いた飛行量子ビット型量子コンピュータの姿が見えかけて来たとも言える。

この研究テーマは3年余りで顕著な成果を期待するものではなく十年オーダーの長い視点での評価が必要なものである。実験データを理論解析することに加え、ネガティブな知見も集積することが将来の量子デバイス実現に寄与すると期待されるので、研究目的を達成したとは言いがたいが、基礎物理的知見が多く得られたので、期間内では十分な成果を達成したと言

える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. S. Takada, M. Yamamoto, C. Bäuerle, K. Watanabe, A. Ludwig, A. D. Wieck and S. Tarucha, “Low temperature behavior of the transmission phase shift across a Kondo correlated quantum dot”, *Phys. Rev. B* **94**, 081303 (RC) (2016).
2. 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).
3. 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)
4. 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).
5. 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).

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 平成 28 年度 船井学術賞「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」
2. 電子1個のスピン情報の長距離伝送・検出に初めて成功 ～単一電子スピントロニクスの実現へ～ (プレスリリース)
http://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_20160603125005959539852247.html
(日刊工業新聞などで紹介される)
3. M. Yamamoto 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) (招待講演)
4. 山本倫久, “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 年 1 月 23 日 (招待講演).
5. 近藤状態によって散乱される電子波の位相のずれを初めて観測 - 40 年前の予言を初めて実証 - (プレスリリース)
http://www.t.u-tokyo.ac.jp/foe/press/setnws_e8c60028f0bb_20140922003_jpn.html

(東京新聞、中日新聞、OPTRONICSなどで紹介される)