

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14082

研究課題名（和文）表面弾性波を用いた単一飛行電子のコヒーレント制御

研究課題名（英文）Coherent control of single flying electrons transferred by surface acoustic wave

研究代表者

高田 真太郎（Takada, Shintaro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：90805144

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、表面弾性波と呼ばれる物質表面を伝播する音波を用いて固体中の単一電子を移送し、その量子状態を制御する研究に取り組んだ。その結果、単一電子の移送効率を従来の90%程度から99%以上に向上させること、異なる単一電子源を同期させる技術の実証、単一飛行電子に対する方向性結合器操作の実証に成功した。また、理論による実験結果の詳細な解析から、表面弾性波の強度を3倍程度強化することにより、ビームスプリッタを実現できるという示唆を得た。これらの成果は、単一飛行電子に対する単発測定によって様々な量子電子光学実験を行うための重要な要素技術となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、いくつかの系で単一電子源が実現され、単一電子レベルで量子電子光学実験が行われ始めている。その中で、本研究の表面弾性波を用いた手法は単一電子検出器も実装され、単発測定で実験が行えるという大きな特色を持つ。本研究の成果は、表面弾性波によって運ばれる単一飛行電子のコヒーレントな制御の実現に向けた重要な要素技術であり、単一飛行電子に対する単発測定によって非局所な量子もつれ状態の生成確認実験を行うなど、学術的に重要な実験に繋がるだけでなく、将来的には単一電子で動作する大規模な量子電子回路の実現に繋がり、量子情報処理の分野を通じて大きく社会に貢献していくものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this project we worked on research, where we control a quantum state of a single-flying electron transferred by surface acoustic wave (SAW). SAW is a sound wave propagating near a surface of materials. Throughout the project, we succeeded in increasing the efficiency of single-electron transfer from about 90 % to above 99 %, demonstration of a technique to synchronize different single-electron sources, and demonstration of a directional coupler for single flying electrons. In addition, we obtained a result, which suggests that a coherent beam-splitter for single flying electrons can be realized by increasing the amplitude of SAW about 3 times. These results are important elements to perform various electron quantum optics experiments with single flying electrons by single-shot measurement.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：飛行量子ビット 表面弾性波 量子ドット 量子電子光学

1. 研究開始当初の背景

先行研究において、表面弾性波に付随する動的なポテンシャルの波を用い、離れた2つの量子ドットの間で単一電子を任意のタイミングで移送できることが示されていた [1, 2]。その技術は、量子電子光学においては、単一電子源、及び単一電子検出器として用いることができる。そこで、さらに表面弾性波によって運ばれる単一飛行電子の量子状態を操作することができる素子を実現すれば、単一電子に対する単発測定で様々な量子電子光学実験が可能となる。一方で、フォノンや他の電子と強く相互作用する固体中の飛行電子を可干渉性を保持しながら制御することは大きな挑戦であり、どのように外部との相互作用を抑えた安定な量子状態を用意し、コヒーレントな制御を実現するかということが大きな課題であった。

[1] S. Hermelin *et al.*, *Nature* **477**, 435 (2011).

[2] R. P. G. McNeil *et al.*, *Nature* **477**, 439 (2011).

2. 研究の目的

本研究の目的は、表面弾性波によって運ばれる単一飛行電子を用いた様々な量子電子光学実験の実現を見据え、飛行電子の量子状態の安定化を図り、単一飛行電子の量子状態をコヒーレントに制御する素子を実現することであった。

3. 研究の方法

本研究では、GaAs/AlGaAs ヘテロ接合界面に形成される二次元電子系を、基板表面に蒸着したショットキーゲート電極に与える負電圧により局所的に空乏化させ、単一電子制御の基盤となる量子ドットや飛行電子の導波路となる量子細線を形成した。また、GaAs は圧電体であるため、基板表面に IDT と呼ばれる楕円電極を作製し、そこに楕円の周期と GaAs の音速で決まる共鳴周波数に相当する高周波電圧を印加することで表面弾性波を発生させた。表面弾性波は GaAs 基板の圧電効果によって電気的なポテンシャルの波を伴って基板表面を伝播する。本研究ではその動的なポテンシャルの波を用いて電子の移送を行った。実験は、熱ゆらぎの影響を抑えるため、極低温（数十から数百ミリケルビン）における微小電流計測によって行った。

4. 研究成果

本研究では、図1のように飛行電子の量子状態の制御を行うための結合量子細線と呼ばれる2本の平行な量子細線が量子力学的なトンネル障壁を介して結ばれた構造が中央に配置され、その各出入口が電子の導波路となる量子細線を通して、単一電子源、及び単一電子検出器となる量子ドットに繋がれた構造を用いて実験を行い、その結果として下記の成果を得た。

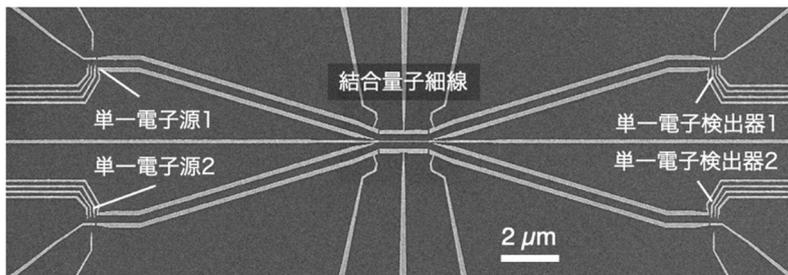


図 1：実験に用いた試料の電子顕微鏡写真

(1) 複数の単一電子源と単一電子検出器が繋がれたこの複合系の試料において、約 22 μm の距離を 99 %を超える非常に高い効率で単一電子の移送を行うことに成功した。この結果は表面弾性波を用いた単一電子移送の拡張性の高さを示す重要な結果である。

(2) 単一電子源となる量子ドットにおいて、表面弾性波の周期の4分の1である約 90 ps の超短電圧パルスを用いて電子移送のタイミングを制御することに成功した。図2は実験結果であり、表面弾性波パルスに対する電圧パルスの遅延時間に対して電子の移送確率をプロットしている。移送確率の包絡線は表面弾性波パルスの形状を反映したものととなっている。また、包絡線の内部でも移送確率は大きく振動しており、この1つ1つの移送確率の山は表面弾性波の1つ1つの波に対応している。このうちの1つの山に対応する電圧パルスの遅延時間を選び、電子の移送を行うことで、表面弾性波の任意の波の1つに電子を載せて移送することが可能である。そのため、この技術を用いることで異なる単一電子源から放出される電子を同期させることが可能となる。

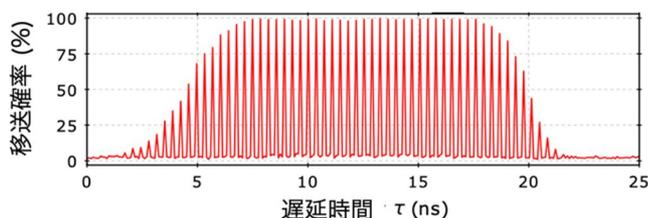


図 2：電圧パルスによる電子移送のタイミング制御

(3) 結合量子細線における閉じ込めポテンシャルの勾配を電圧制御することで、電子の移送方向を上から下へと滑らかに変化させることに成功した。この技術は単一飛行電子に対する方向性結合器として用いることができる。

(4) 結合量子細線の片方の入口から電子を入射させると、電子は上下の細線の間をコヒーレントに振動することが予想された。一方で、本実験で得られた結果ではそのようなコヒーレントな振動を観測することができなかった。そのため、実験データを理論的に詳細に解析し、その原因の究明を行った。その結果、結合量子細線の入口付近で急激な閉じ込めポテンシャルの変化が生じており、その部分で電子が励起され、コヒーレントな振動を観測するための適切な初期状態が用意できていないことが原因であることがわかった。

また、表面弾性波の強度を現在の3倍程度に強化することで、電子の励起を抑制することができ、図3に示されるようなコヒーレントな振動を観測することが可能であるという結果も得られた。実験に用いた希釈冷凍機の高周波ラインの最適化や表面弾性波の発生機構であるIDT構造の最適化などで表面弾性波の強度を数倍程度向上させることが可能であると考えられ、今後、表面弾性波の強度の強化による閉じ込めポテンシャルの向上により、単一飛行電子のコヒーレントな制御が実現可能であると考えられる。

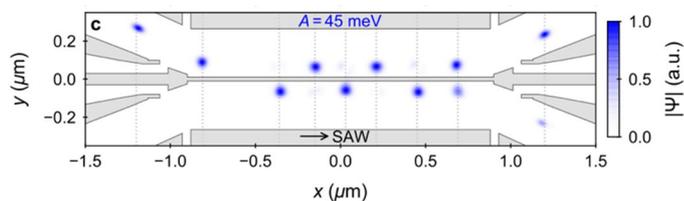


図3：結合量子細線における単一飛行電子のコヒーレントな振動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Roussely Gregoire, Arrighi Everton, Georgiou Giorgos, Takada Shintaro, Schalk Martin, Urdampilleta Matias, Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Armagnat Pacome, Kloss Thomas, Waintal Xavier, Meunier Tristan, Bauerle Christopher	4. 巻 9
2. 論文標題 Unveiling the bosonic nature of an ultrashort few-electron pulse	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2811 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-018-05203-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Takada Shintaro, Edlbauer Hermann, Lepage Hugo V., Wang Junliang, Mortemousque Pierre-Andr?, Georgiou Giorgos, Barnes Crispin H. W., Ford Christopher J. B., Yuan Mingyun, Santos Paulo V., Waintal Xavier, Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Urdampilleta Matias, Meunier Tristan, Bauerle Christopher	4. 巻 10
2. 論文標題 Sound-driven single-electron transfer in a circuit of coupled quantum rails	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4557
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-019-12514-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高田真太郎, Hermann Edlbauer, Jun-Liang, Wang, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, 金子晋久, Tristan Meunier, Christopher Bauerle
2. 発表標題 結合量子細線における単一飛行電子の制御
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡崎雄馬, 大江武彦, 川村稔, 吉見龍太郎, 中村秀司, 高田真太郎, 茂木将孝, 高橋圭, 塚崎敦, 川崎雅司, 十倉好紀, 金子晋久
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体Cr(Bi,Sb)2Te3における量子異常ホール効果の精密抵抗測定
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. Rousselet, E. Arrighi, G. Georgiou, 高田真太郎, M. Schalk, M. Urdampilleta, A. Ludwig, A. D. Wieck, P. Armagnat, T. Kloss, X. Waintal, T. Meunier, C. Bauerle
2. 発表標題 超短少数電子パルスのボソンの振る舞い
3. 学会等名 日本物理学会 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田俊輔、高田真太郎、中村秀司、岡崎雄馬、金子晋久、小寺哲夫
2. 発表標題 表面弾性波を用いた高精度量子電流源実現に向けたSplit-52型IDTの評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----