

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06090

研究課題名(和文)国際単位系改訂に向けた電気素量の絶対測定と高速超精密電流測定への展開

研究課題名(英文)Quantum metrology triangle, determination of elementary charge and the development of tiny current measurement technology

研究代表者

中村 秀司 (Shuji, Nakamura)

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・主任研究員

研究者番号：70613991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では量子メトロロジートライアングルの検証、電気素量の絶対測定、新しい微小電流計測技術の開発に向け研究を行った。まず超伝導、半導体単一電子素子を用いた研究を行い、電子転送のエラー要因の解明と解決方法の提示(超伝導素子)、さらに5 ppm以下の不確かさを持つ量子化電流の発生に成功した(半導体素子)。次に量子メトロロジートライアングルの検証に必要な抵抗・電圧・電流の物理量を現示する3つの量子素子を希釈冷凍機中で駆動するセットアップを構築し、ジョセフソン電圧標準の動作確認と単一電子素子の並列駆動等の実験を行った。また電気素量の絶対測定に必要な単一電子の実時間測定セットアップを構築し測定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り組む量子メトロロジートライアングルの研究は、新しい国際単位系における組み立て量間の整合性検証を行うものであり、産業、文化、科学活動にとって欠くことのできない社会基盤の実現に資するものである。また本研究で取り組む単一電子転送を用いた量子化電流発生は、放射線医療、ガス検出、半導体産業などで重要性の増しているfAからpAまで電流計測の信頼性を担保する電流標準の実現に貢献するものである。さらに本研究で対象とする超伝導体、半導体を用いた単一電子素子はそれぞれ逆近接効果や動的に形成される量子ドットといった基礎物理と大きく結びついており、基礎科学的知見の獲得にも貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：We researched on the quantum metrology triangle experiment, the determination of the elementary charge of an electron and the development of a tiny-current measurement technique. First superconducting hybrid-single-electron device and the semiconductor single-electron device were investigated. In the superconducting hybrid-single-electron device, we found a new mechanism of transfer error and proposed its solution. On the other hand, in silicon device, we succeeded to generate electric current with 5 ppm uncertainty. Next, we built up a measurement setup in a dilution refrigerator for quantum metrology triangle experiment with quantum Hall resistor, Josephson voltage standard, and single electron device. Finally, for the determination of the elementary charge, we succeeded to perform real-time detection of single electron movement inside a semiconductor double quantum dot system.

研究分野：精密計測、メソスコピック物理

キーワード：単一電子素子 量子電流標準 量子メトロロジートライアングル 二重量子ドット マイクロ波反射測定 超伝導ハイブリッド素子 シリコン量子ドット 単一電子転送

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国際単位系は7つの基本単位と組み立て量によって構成されている。国際単位系は1960年に制定され、産業、文化、科学活動にとって欠くことのできない共通の社会基盤として万人にとって平等で普遍的な基準を定めてきた。これまでの国際単位系は、メートル、秒といった「物理定数を定義値として定義し、そこから実現される基本単位」と、アンペア、ケルビン、モルなどの「定義によって単位を定め、それに基づいて関係する物理定数が測定量となる基本単位」が混在してきた。さらに従来の国際単位系では原器という人工物に頼った重さの単位キログラムが存在し、経年変化とともにわずかながら値が変化していることがわかった。これを契機に国際単位系の改定が議論されるようになり2018年11月国際単位系の改定が行われることとなった。改定された国際単位系では7つの基本単位全てが物理定数から定義されることとなり、キログラムもプランク定数を介して定義されることとなった。一方でSI単位系では7つの基本単位以外に多数の組み立て量が存在しているが、ここで一つ疑問が残る。それは「7つの単位だけを特別視し、その組み立て量として単位を構築した際、組み立て量同士は定量的に相矛盾することなく単位系を構築することができるか?」という疑問である。もちろんこれら組み立て量の間には物理法則が成立しており“ある程度”の不確かさで成立していることは明らかであるが、人間の営みの根本的社会基盤である単位系を実現するには“ある程度”では不十分である。この疑問を抵抗、電圧、電流を持つ電気標準の中で検証する試みがメトロロジートライアングルの研究である。現在の電気標準は独立な3つの量子力学的な現象(量子ホール効果、ジョセフソン効果、単一電子トンネル効果)に基づいており、関連する組み立て量を小さな不確かさで実現できる。このメトロロジートライアングルの研究は30年以上の歴史を持っているが、これまで十分に小さな不確かさでの検証は行われていない。この検証を妨げている主な原因は、量子化電流の不確かさが大きいこと、さらに電流量が小さい事にある。量子メトロロジートライアングでは 10^{-7} 桁以下での検証を目指しているが、長年その要求を満たす量子化電流を実現することはできなかった。しかしながら近年、この量子化電流発生に関して様々な新手法が検討されるようになり 10^{-7} 桁にせまる不確かさでの量子化電流発生が可能となりつつある。

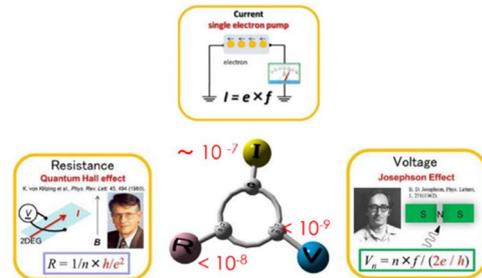


図1. 量子メトロロジートライアングルで用いる3つの量子標準とその不確かさ

2. 研究の目的

本研究では、量子メトロロジートライアングルの検証を目指す。さらに単一電子転送の実時間測定システムを構築し、電子数の計数によって電気素量の絶対測定の端緒を開く。この研究によって、放射線、ガス、絶縁試験などで今後重要性を増してくるfAからnAといった微小電流校正の不確かさを逡減し、未踏領域での微小電流計測の信頼性を担保する量子電流標準の実現へと歩みを進める。

3. 研究の方法

本研究では以下の手法で研究を進める。まず「単一電子素子を用いた量子化電流の発生」を行い、十分小さな不確かさを持つ電流発生に必要な最適な素子構造を検討する。最適な素子構造を検討した後、微小電流計測技術に資する量子電流標準の実現に向けて量子化電流の不確かさ評価を行う。量子化電流発生とその不確かさ評価を終えたのち、同一希釈冷凍機中に「量子ホールアレイによる量子抵抗標準」「ジョセフソン電圧標準」「並列化量子化電流源」を実装し、量子メトロロジートライアングルの検証を行う。並行してRF反射測定を利用した単一電子トンネルの実時間測定の研究を進め、電気素量の絶対測定に向けた研究に歩みを進める。

4. 研究成果

本研究では、以下の実験を行った。

- 超伝導・常伝導ハイブリッド単一電子素子の新規転送エラー要因の発見とその解決法の実現
- シリコン単一電子素子を用いた量子化電流の発生と精密測定
- 量子メトロロジートライアングル検証に向けた研究
- 単一電子トンネルの実時間測のためのRF反射測定
- 人工分子系における量子干渉効果(Fano効果)の観測

に関しては超伝導と常伝導界面における逆近接効果が、準粒子の拡散を抑制し単一電子転送のエラー要因になることを実験、理論から初めて示した。さらに、この逆近接効果による準粒子拡散の阻害を磁場の印加によって解消できることを示した。 に関しては、シリコン単一電子素子を用いて1GHzで単一電子転送を行い量子化電流の発生に成功した。さらにUltra-stable current amplifier(ULCA)を用いて精密評価を行いその量子化電流が5ppm以下で理論的な電流

値と一致していることを確かめた。 に関してはシリコン単一電子素子の並列化による電流通倍、ジョセフソン電圧標準の希釈冷凍機への実装を行い、量子メトロロジートライアングル実現に向けて歩みを進めた。 に関しては電気素量の絶対測定、および新しい微小電流計測に必要な単一電子トンネルの実時間測定系を構築し、数百 ns 程度の時間分解能での検出に成功した。 に関しては、GaAs 二次元電子系上に作製した二重量子ドットで初めて Fano 効果を観測した。

以下、具体的にこれらの成果に関して記載する。

超伝導・常伝導ハイブリッド単一電子素子の転送エラー要因の発見とその解決法の実現

本研究では、超伝導・常伝導単一電子トランジスタ (SINIS ターンスタイル) を用いて単一電子転送を行い、超伝導、常伝導界面における逆近接効果が転送エラーに与える影響を初めて明らかにした。SINIS ターンスタイルは超伝導電極と常伝導の島電極をもつ単一電子トランジスタである。この SINIS ターンスタイルでは、ソース-ドレイン間にバイアス電圧を、島電極に隣接したゲート電極に交流電圧を引加することで超伝導電極中の準粒子をソース電極からドレイン電極へと転送することができる。この時、交流電圧の周波数が f Hz であると $I = ef$ の電流が発生する (図 2)。これまで SINIS ターンスタイルをもちいた準粒子の転送エラーは理論、実験から調査され、アンドレエフ反射、クーパーペア-電子コトンネリングなどが主要因となることが明らかにされていた。本研究では、超伝導電極と常伝導島電極の界面抵抗を酸化膜形成条件により系統的に変化させ、超伝導・常伝導界面で起きる近接効果、逆近接効果の大きさを制御した。その結果、界面抵抗が低い素子では量子化電流に加え余剰電流が流れる一方で、高抵抗素子では余剰電流が抑制されることを実験的に見出した。さらに理論的な考察により、界面抵抗の低下に伴い生じる逆近接効果が超伝導・常伝導界面付近の超伝導体オーダーパラメータの空間変化を誘起し、準粒子蓄積とそれに伴う超伝導・常伝導界面の温度上昇、余剰電流の発生が引き起こされることを明らかにした (図 3)。さらに本研究では、この逆近接効果による純粒子蓄積と余剰電流を超伝導薄膜への磁場印加によって抑制できることも明らかにした (図 4)。磁場による逆近接効果の抑制がオーダーパラメータの空間変化を減少させ、準粒子蓄積が解消される。この余剰電流の磁場依存性は超伝導電極の空間変化を取り入れた数値計算によって定量的に再現された。本研究で示した逆近接効果に伴う余剰電流の磁場による抑制は、低抵抗化による高周波駆動と余剰電流発生とのトレードオフを解消する一つの解決策となることが期待される。

シリコン単一電子素子を用いた量子化電流の発生と精密測定

本研究では SOI 基板上二次元電子系に作製した単一電子転送素子 (Tunable barrier pump 素子) による量子化電流発生に取り組んだ。半導体二次元電子系上に作製したゲート電極に負電圧を印加すると電子をゼロ次元的に閉じた量子ドットが形成される。近年この量子ドットを形成するポテンシャルを交流電流によって変調することで、高速かつ不確かさの小さな単一電子転送が実現できることが実験的に示されている。この Tunable barrier pump 素子ではまず量子ドットを形成する。さらにソース側の電極に交流電圧を印加することで電子を量子ドットの中を導入する。電子を導入後、捉えた電子がソース側に逆戻りする前に高速にポテンシャル障壁を上昇させ、ドレイン側のゲート電極によって作られる静電ポテンシャルを乗り越えさせると電子をソース電極からドレイン電極へと転送することが可能となる。さらに、このソース電極、ドレイン電極に印加する交流・直流電圧を適切に制御することで電子を一粒ずつ転送することも可能となる。この Tunable barrier pump による単一電子転送の研究はこれまでシリコン、GaAs などを用いて研究が進

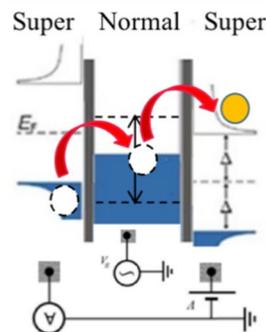


図 2 . SINIS を用いた単一電子転送

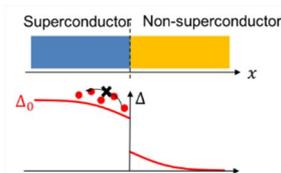


図 3 . 逆近接効果による純粒子拡散の阻害

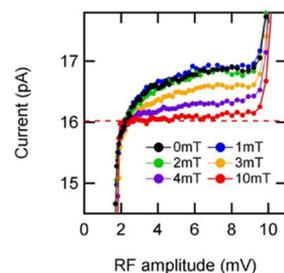


図 4 . 余剰電流の磁場依存性

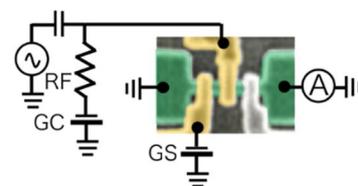


図 5 .シリコン単一電子素子を用いた単一電子転送の測定系

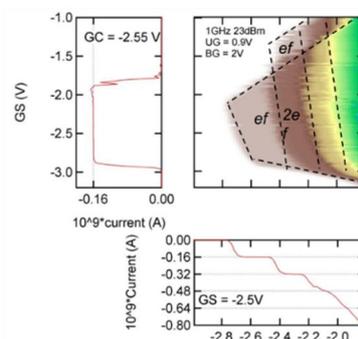


図 6 .量子化電流のゲート電圧依存性

められてきた。申請者は NTT と共同してシリコン MOS 構造を持つ素子を利用し単一電子転送の実験をおこなった。素子はリンドープ層を持つ SOI 基板上にポリシリコンを用いたゲート電極、その上部に酸化シリコンを介したトップゲート電極を作製した。実験では素子を希釈冷凍機で 100 mK 程度まで冷却し、発生した電流は電流アンプを用いて測定した。図 6 は 1GHz の周波数で単一電子転送を行った際に発生した電流をソース、ドレイン各電極に印加するゲート電圧に対してイメージプロットした結果である。各ゲート電圧に沿って電流をプロットすると発生した電流が $I = ef$ を単位として階段状に変化し、このシリコン単一電子素子を用いて量子化電流が発生していることがわかる。さらにこの量子化電流の不確かさ評価をおこなった結果 5×10^{-6} 以下の不確かさで $I = ef$ @1 GHz の理論値と一致していることを確かめた。この値はシリコン単一電子転送素子を用いた量子化電流の研究の中で最高精度とほぼ同程度である。この成果は放射線、ガス、絶縁試験、半導体産業での利用される fA から nA 程度の微小電流計測校正の不確かさを大きく低減できる可能性を示唆するものである。現状の電流校正は電圧標準と抵抗標準をオームの法則を介して組み合わせることで実現されており、その不確かさは 1 μ A から 1 A の範囲で 10^{-5} から 10^{-6} 程度の不確かさを持っている。一方で、1 μ A 以下の電流では電流値が小さくなるに従い大きくなり 1 pA では 10 パーセント程度の不確かさを持つ。本研究結果はこの微小電流領域における不確かさを劇的に低減し、将来的により微小な電流計測を実現させる大きな一歩となった。

③量子メトロロジートライアングル検証に向けた研究

本研究では、量子メトロロジートライアングルに向け、希釈冷凍機中に「並列化量子化電流源」「量子ホールアレイによる量子抵抗標準」「ジョセフソン電圧標準」の3つの量子標準を導入した。量子メトロロジートライアングルでは単一電子転送によって発生した $I = ef$ の量子化電流を $R = h/2e^2$ の量子ホール素子に流し、そこに発生する「 $V = hf/2e$ のホール電圧」と「ジョセフソン電圧標準で発生する $V = hf'/2e$ 」との差電圧をゼロになるよう f' を調整する。この時、単一電子素子に印加する交流電圧の周波数 f とジョセフソン電圧標準に印加する周波数 f' を比較し、その一致の程度を評価する。従来の量子メトロロジートライアングルの研究では単一電子ポンプの駆動周波数は 100 MHz 程度であった。この時、発生する電流値は約 16 pA と小さいため、量子化電流を 12.906...kohm の量子ホール素子に印加して発生するホール電圧はおよそ 200 nV 程度となり、比較するジョセフソン電圧標準の不確かさの最も小さな値 1V、10V と比べ7桁以上電圧値が小さい。これが要因となって不確かさの小さな評価を行うことが難しかった。そこで本研究では「高周波駆動可能なシリコン単一電子素子の並列化(量子化電流の過倍化)」「アレイ化による高抵抗集積量子ホール素子」を組み合わせることで従来のホール電圧に比べ4桁から5桁大きなホール電圧を実現し、ジョセフソン電圧標準との比較を行う。本研究では、まず複数の量子化電流源を並列化するために必要なサンプルホルダの設計を行った。図10左はそのサンプルホルダの写真である。直流配線、交流配線を含めて縦にスタックできる構造になっており最大4素子の並列駆動が可能となっている。本研究ではこのサンプルホルダを実際に利用し、単一電子ポンプの測定をおこない単一電子素子としての基本的な動作確認を行った。次に、ジョセフソン電圧標準の希釈冷凍機中への実装を行った。ジョセフ電圧標準は 12K での駆動に最適化されているため、希釈冷凍機 4K プレート上にステージを導入し温調を行うことで温度を 12K に安定化した(図10右) この温調下で実際にジョセフソン電圧標準素子を駆動し交流ジョセフソン効果によるシャピロステップを観測した。今後はこのシャピロステップの値を精密測定し不確かさを評価する予定である。また量子ホールアレイ素子を希釈冷凍機中磁場中心で測定するための測定プローブを作製、実装し、量子

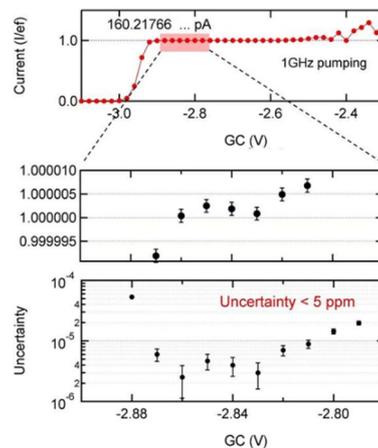


図7. 量子化電流の精密測定

現状の電流校正は電圧標準と抵抗標準をオームの法則を介して組み合わせることで実現されており、その不確かさは 1 μ A から 1 A の範囲で 10^{-5} から 10^{-6} 程度の不確かさを持っている。一方で、1 μ A 以下の電流では電流値が小さくなるに従い大きくなり 1 pA では 10 パーセント程度の不確かさを持つ。本研究結果はこの微小電流領域における不確かさを劇的に低減し、将来的により微小な電流計測を実現させる大きな一歩となった。

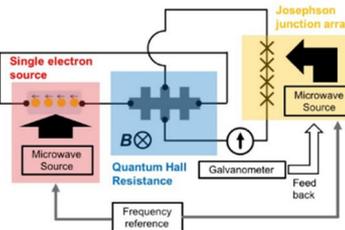


図8. 量子メトロロジートライアングルの概念図



図10. 希釈冷凍機に実装したジョセフソン素子

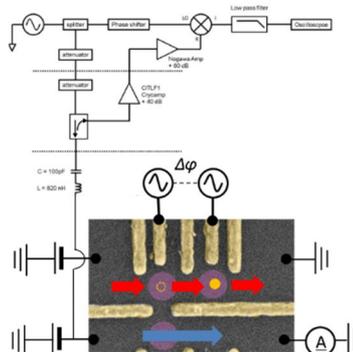


図11. RF 反射測定系と二重量子ドットと結合した電荷計

メトロロジートライアングルに必要な電流、電圧、抵抗の量子標準を単一の希釈冷凍機中で測定できる測定環境を構築している。今後、引き続いてこれらの量子標準を組み合わせることで7桁以下の不確かさをもつ量子メトロロジートライアングルの検証を世界に先駆けて行う予定である。

単一電子転送の実時間測定のためのRF反射測定

上記、量子メトロロジートライアングルの研究では電流・抵抗・電圧をオームの法則によって結びつけることで物理量間の整合性の検証を目指した。本研究では、さらに電気素量の絶対測定に必要な「マイクロ波(RF)反射測定を利用した単一電子トンネルの実時間測定」の研究を行った。量子ドットなどの高抵抗の素子をマイクロ波で測定する際、希釈冷凍機中の同軸ケーブルの静電容量や素子自身の持つ浮遊容量の影響によって、高周波の信号を希釈冷凍機の外へ取り出すことが難しい。そこで希釈冷凍機同軸ケーブルの静電容量、ゲート電極の浮遊容量、素子抵抗を考慮した上でマッチング回路を作製する。マッチング条件は素子抵抗 R_{sample} が特定の値をとる時だけ満たされ、それ以外の抵抗値ではマッチング条件から外れる。これにより素子抵抗の時間変化をマイクロ波の反射信号強度の時間変化として測定することができる。本研究ではマッチング回路を素子に対して並列に配置した回路、直列にした回路を作製し比較した。その結果、並列と直列で測定感度の高い素子抵抗が異なることがわかった。さらに電圧によって静電容量を外部から変化できるバラクタダイオードをマッチング回路に用いることで希釈冷凍機外部からマッチング条件を変化させることに成功した。

本研究ではさらに実際の量子ドット中の電子の動きをRF反射測定によって実時間測定することにも成功した。素子はGaAs半導体二次元電子系上にAuとTiによってスプリットゲートを蒸着し、二重量子ドット、および電荷計が静電的に結合した素子を作製した。図12は、反射信号の微分強度を二重量子ドットに印加する二つのゲート電圧に対してプロットしたものであるが、反射測定によって明瞭な二重量子ドット由来の電荷遷移線が測定されていることがわかる。さらにゲート電圧を適切な値に制御することで二重量子ドットを電子がトンネルし移動していく様子を実時間で測定することに成功した。(図13)以上、マイクロ波反射測定技術は単一電子転送の実時間測定と量子メトロロジートライアングルの組み合わせた電気素量の絶対測定を行うために必須な技術であり、今後の研究の進展に大きく貢献したと考えられる。

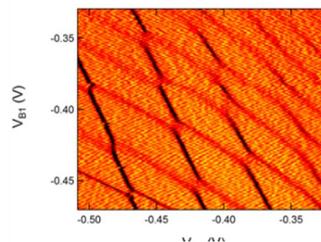


図12. 二重量子ドットの電荷安定ダイアグラム

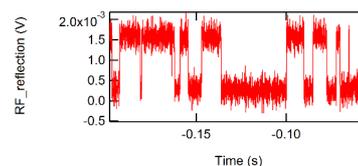


図13. 単一電子計を用いた単一電子トンネルの実時間測定

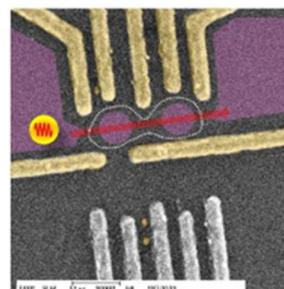


図14. 人工分子によるFano効果

人工分子系における量子干渉効果(Fano効果)の観測

ファノ効果は光と原子・分子などによる光の散乱過程によって引き起こされる現象で、離散準位の共鳴励起と連続準位を介した散乱過程が量子干渉することで通常のローレンツ型の共鳴吸収から非対称な共鳴吸収へと変調を受ける現象である。これまでファノ効果は原子による光の散乱・メタマテリアルによる光の散乱・原子による原子の散乱などで測定されてきた。本研究では、単一電子転送素子としても利用されるGaAs半導体二次元電子系上に作製した二重量子ドットにおいてファノ効果と呼ばれる量子干渉効果を初めて観測した。二重量子ドットは離散化されたエネルギー準位をもち、それに伴って二重量子ドットを介した輸送測定ではクーロン振動が観測される。本研究では二重量子ドットを形成するゲート電圧を適切に制御し、二重量子ドットが形成される場所に二つの量子ドットにまたがる連続準位を形成することで、世界に先駆けて二重量子ドットでのファノ効果を観測した。さらに理論的な考察を行いこのファノ効果による二重量子ドット間のトンネル振幅が磁場等によって変調可能であることをしめた。

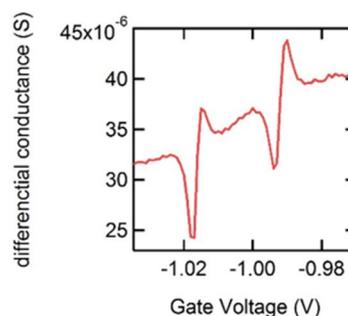


図15. 人工分子におけるファノ効果の観測

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tetsuro Misawa, Shuji Nakamura, Yuma Okazaki, Yasuhiro Fukuyama, Nariaki Nasaka, Hiroki Ezure, Chiharu Urano, Nobu-Hisa Kaneko and Takao Sasagawa	4. 巻 発刊中
2. 論文標題 Dual-gate control of the surface carrier of the highly-bulk-resistive topological insulator Sn _{0.02} Bi _{1.08} Sb _{0.9} Te ₂ S	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics; Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 発刊中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuma Okazaki, Takehiko Oe, Minoru Kawamura, Ryutaro Yoshimi, Shuji Nakamura, Shintaro Takada, Masataka Mogi, Kei S. Takahashi, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Yoshinori Tokura and Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 116
2. 論文標題 Precise resistance measurement of quantum anomalous Hall effect in magnetic heterostructure film of topological insulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letter	6. 最初と最後の頁 143101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5145172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中村秀司	4. 巻 139
2. 論文標題 アンペアの定義改定と単電子素子	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会誌 特集号	6. 最初と最後の頁 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjournal.139.360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuma Okazaki, Imran Mahboob, Koji Onomitsu, Satoshi Sasaki, Shuji Nakamura, Nobu-Hisa Kaneko and Hiroshi Yamaguchi	4. 巻 9
2. 論文標題 Dynamical coupling between a nuclear spin ensemble and electromechanical phonons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41467-018-05463-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shota Norimoto, Shuji Nakamura, Yuma Okazaki, Tomonori Arakawa, Kenichi Asano, Koji Onomitsu, Kensuke Kobayashi and Nobu-hisa Kaneko	4. 巻 97
2. 論文標題 Fano effect in the transport of an artificial molecule	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.195313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuma Okazaki, Shuji Nakamura, Koji Onomitsu, Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 11
2. 論文標題 Digital processing with single-electrons for arbitrary waveform generation of current	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 036701 (1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/APEX.11.036701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shuji Nakamura, Yuri A. Pashkin, Mathieu Taupin, Ville F. Maisi, Ivan M. Khaymovich, Alexander S. Mel'nikov, Joonas T. Peltonen, Jukka P. Pekola, Yuma Okazaki, Satoshi Kashiwaya, Shiro Kawabata, Andrey S. Vasenko, Jaw-Shen Tsai, and Nobu-hisa Kaneko	4. 巻 7
2. 論文標題 Interplay of the inverse proximity effect and magnetic field in out-of-equilibrium single-electron devices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 54021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.054021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ngoc Thanh Mai Tran, Yuma Okazaki, Shuji Nakamura, Massimo Ortolan and Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 56
2. 論文標題 Low-noise and wide-bandwidth current readout at low temperatures using a Superconducting-quantum-interference device amplifier	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 04CK10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.04CK10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tetsuro Misawa, Yasuhiro Fukuyama, Yuma Okazaki, Shuji Nakamura, Nariaki Nasaka, Takao Sasagawa, and Nobu-Hisa Kaneko	4. 巻 66
2. 論文標題 Preparation and characterization of Sn-BSTS topological insulator for universality test of the quantum Hall effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Instrumentation and Measurement	6. 最初と最後の頁 1489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIM.2017.2650658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 N.H.Kaneko, S.Nakamura, Y. Okazaki	4. 巻 27
2. 論文標題 A review of Quantum Current Standards	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Review of Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 32001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0957-0233/27/3/032001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 中村秀司, 岡崎雄馬, 高田真太郎, 金子晋久
2. 発表標題 非線形超伝導共振器をもちいたパラメトリック増幅
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuji Nakamura, Okazaki Yuma, Shintaro Takada, and Nobuhisa Kaneko
2. 発表標題 Towards coherent coupling between magnetic vortex gyration and microwave photon
3. 学会等名 半導体/超伝導体量子効果と量子情報の夏期研修会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三澤哲郎, 福山康弘, 中村秀司, 岡崎雄馬, 名坂成昭, 江連大貴, 金子晋久, 浦野千春, 笹川崇男
2. 発表標題 コルビノ型電極配置による高絶縁性トポロジカル絶縁体の単一表面伝導特性評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村秀司
2. 発表標題 量子メトロロジートライアングルの検証と量子素子を用いた計測技術の開発
3. 学会等名 理研-産総研 第5回 量子技術イノベーションコアWorkshop
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村秀司, 岡崎雄馬, 高田真太郎, 金子晋久
2. 発表標題 電子スピン共鳴を用いたシリコン酸化膜中欠陥準位の測定
3. 学会等名 日本物理学会 2019秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡崎雄馬, 大江武彦, 中村秀司, 高田真太郎, 金子晋久
2. 発表標題 ホイートストンブリッジ回路による量子ホール抵抗値の精密比較測定系の構築
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三澤哲郎, 福山康弘, 中村秀司, 岡崎雄馬, 名坂成昭, 江連大貴, 金子晋久, 浦野千春, 笹川崇男
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体Sn0.02Bi1.08Sb0.9Te2Sにおける表面電子輸送特性のゲート制御
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村秀司
2. 発表標題 メソスコピックな超伝導、半導体、磁性体を舞台とする量子現象
3. 学会等名 メソスコピック系における非平衡スピン微視的理解とその制御
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Norimoto Shota, Nakamura Shuji, Okazaki Yuma, Arakawa Tomonori, Asano Kenichi, Onomitsu Koji, Kobayashi Kensuke and Nobu-Hisa
2. 発表標題 Fano effect in the transport of an artificial molecule
3. 学会等名 ICPS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuji Nakamura, Shuji Nakamura, Yuri A. Pashkin, Mathieu Taupin, Ville F. Maisi, Ivan M. Khaymovich, Alexander S. Mel'nikov, Joonas T. Peltonen, Jukka P. Pekola, Yuma Okazaki, Satoshi Kashiwaya, Shiro Kawabata, Andrey S. Vasenko, Jaw-Shen Tsai, and Nobu-hisa Kaneko
2. 発表標題 Interplay of the inverse proximity effect and magnetic field in outof-equilibrium singleelectron devices
3. 学会等名 28 International Conference on Low Temperature Physics, 14th August, Gothenburg Sweden (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村秀司
2. 発表標題 ナノ構造と単一電子制御技術を用いた量子計測技術の開発
3. 学会等名 国際計量シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 則元将太, 中村秀司, 岡崎雄馬, 金子晋久, 浅野建一, 小林研介
2. 発表標題 二重量子ドットにおけるファノ効果の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2017秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡崎雄馬, 中村秀司, 小野満恒二, 佐々木智, 金子晋久
2. 発表標題 単一電子制御による交流電流波形の生成と計測応用
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 則元将太, 中村秀司, 岡崎雄馬, 小林研介, 金子晋久
2. 発表標題 単電子計数とフィードバック制御による単電子源安定化の試み
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村秀司, 岡崎勇馬, 金子晋久
2. 発表標題 高周波反射・透過測定を用いた単一電子ポンプの実時間測定
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ngoc Thanh Mai TranA, 岡崎雄馬, 中村秀司, 金子晋久
2. 発表標題 超伝導量子干渉素子を用いた希釈冷凍機における微小電流計測
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Shuji Nakamura and Nobu-hisa Kaneko
2. 発表標題 Three electrical quantities and their quantum mechanical representation
3. 学会等名 EMN Quantum Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 酸化膜中不純物準位を用いたパラメトリック増幅器	発明者 中村秀司	権利者 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2019-105439	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

中村秀司のホームページ
<https://www.sites.google.com/site/shujinakamuraist/home>
研究者ホームページ
<https://www.sites.google.com/site/shujinakamuraist/>
<https://www.sites.google.com/site/shujinakamuraist/>
https://unit.aist.go.jp/ripm/qelec-std/e2_00.html

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
--	---------------------------	-----------------------	----