

単電子制御による量子標準・極限計測技術の開発

Quantum Standards and Ultimate Precision

Measurements Based on Single Electrons

課題番号：18H05258

藤原 聡 (FUJIWARA, AKIRA)

NTT 物性科学基礎研究所・上席特別研究員



研究の概要

高速・高精度単電子転送、量子ホールアレイ抵抗標準、単一磁束量子回路を用いた超高速電荷検出などの極限エレクトロニクス技術を開発し、それらとジョセフソン電圧標準を組み合わせた高精度測定系を構築することにより、標準分野で長年来の目標だった「量子計測三角形」の完成を目指す。また、電気量の関連する科学技術分野の極限計測の基盤技術を提供する。

研究分野：ナノデバイス、量子デバイス、量子電気標準

キーワード：単電子、量子ホール、量子計測三角形

1. 研究開始当初の背景

ナノ構造における帯電効果を利用した単電子の転送や検出は、量子電気標準、高感度センサなど高精度エレクトロニクスや極限計測技術への応用が期待されている。SI単位の改定に伴い導入される（2019年実施）新アンペアを直接的に具現化することが可能な単電子電流標準を開発し、量子ホール抵抗標準・ジョセフソン電圧標準とのオームの法則を通じた整合性を検証する「量子計測三角形」を高精度なレベルで完成することは、標準分野で長年来の目標とされてきた。

2. 研究の目的

高速・高精度な単電子転送、量子ホールアレイ抵抗標準を用いた量子力学的電流-電圧変換、単一磁束量子回路を用いた超高速単電子検出などの極限エレクトロニクス技術を開発し、それらとジョセフソン電圧標準を組み合わせた高精度測定系を構築し、0.1ppmレベルでの「量子計測三角形」の実験を世界に先駆けて実現する。また、超精密微小電流発生技術、高抵抗標準技術を確立し、化学、工業、医療分野など電気量の関連する広範な領域に適用可能な極限計測技術を開発する。

3. 研究の方法

高精度実験を行うため、サブ10GHzのクロック周波数動作に相当する高電流単電子転送を可能とするシリコン単電子素子の開発、微小電流の高精度電圧変換に重要となる高抵抗（1MΩ、10MΩ）量子ホールアレイ抵抗標準の開発を行う。すべての量子標準を単一冷凍機に搭載した測定系を構築し、「量子計測三角形の」実験を行う。

4. これまでの成果

高速単電子転送におけるピコ秒単電子量子振動の検出 [2]

GHz動作の単電子転送において、シリコン量子ドット内の単電子の量子的な空間振動を、量子ドットとドレイン電極を繋ぐ出口側のバリア中に存在する局在準位との共鳴現象を利用した超高速サンプリングにより検出した。電子の空間振動は、動的量子ドットの高速度空間移動に伴う電子非断熱励起に起因する量子ドット内電子準位の量子力学的重ね合わせ状態の形成を反映したものである。このような電荷振動は、いわゆる電荷量子ビットの動作であり、従来はダブル量子ドット間の数10ピコ秒オーダーの振動の検出が限界であったが、今回、単一量子ドット内の超高速電子振動の検出に成功した。

動的量子ドットのポテンシャルバリアの形状評価 [3]

変調バリア型の単電子転送素子の精度を支配する因子として、電子の出入を制御する量子ドットの帯電エネルギーに加え、ソース電極と量子ドットをつなぐ入口側のポテンシャルバリアの伝導特性の電子エネルギー依存性が重要となる。単電子転送特性の温度依存性を詳細に比べ、ダイナミクスを考慮した理論モデルとフィッティングすることにより、動的な量子ドットの入口バリアのポテンシャル高さ、形状、長さを定量的に見積もることに成功した。極低温トンネル伝導領域での高精度単電子転送の実現に向けた素子設計・作製において、「ポテンシャルバリア

エンジニアリング」の基礎となる重要な知見である。

量子ホールアレイの作製と精度評価 [6, 1]

量子計測三角形の「抵抗」に用いる素子として、1 M Ω 、10 M Ω 量子ホールアレイ（集積素子）の試作を完成させた。

まず、1 M Ω の素子に対し高精度な絶対評価を行なった。この1 M Ω 素子は、合計88個の量子ホール素子が適切な設計のもと直並列に接続・集積されており、全体で設計値：1 M Ω ($1 - 0.034 \times 10^{-6}$)の量子化された高抵抗値を発生できる。この素子は本研究課題において、単電子転送により発生した電流に対する量子電流-電圧変換器として利用される。アレイ素子中のホール素子同士の配線は「多重配線法」によりその抵抗を相対的に抑え、また2次元電子系のオーミック抵抗も極めて小さな値に抑えている。このアレイ素子に対し、純粋な1量子ホール素子（国立計量研究所間の国際的な比較によりその値が保証されている素子）との絶対比較による精密評価に成功し、その値が 17×10^{-9} 以内で設計上の量子化抵抗値に一致することを確認した [6]。これにより、開発した1 M Ω 量子ホールアレイが、量子計測三角形の検証に利用できることを証明した。現在10 M Ω の素子についても精度評価を進めている。

また、1 M Ω の素子について、量子電流-電圧変換器としての性能評価にも成功した。その検証では、ジョセフソン効果電圧標準や高精度微小電流計などを利用することで1 μ Aにおける相対精度が 7.8×10^{-8} 、10 nAにおいては 4.1×10^{-6} に達することを証明した [1]。

量子計測三角形測定系の構築

量子計測三角形に用いる「電圧」に関しては量子電圧計測用のジョセフソン電圧標準を開発した。具体的には65,536個の接合を直列に接続し合計で2 Vが出力される素子を作製し、1 - 10 Vの国家標準と比較することで 3×10^{-9} の相対不確かさでの一致を確かめた。

「電流」に関しては、NTTが作製したシリコン単電子転送素子を、産総研で開発中の量子計測三角形測定用の冷凍機で駆動するための実験セットアップの構築を行い、素子の並列駆動を実現するための積層可能な特殊なサンプルホルダーを作製、実装した。今回、単一のシリコン単電子転送素子を駆動し精密計測を行うことで、5 ppm（世界水準）の不確かさでの電流生成を達成した。

5. 今後の計画

各担当チームで開発した要素技術を組み合わせ、世界未踏の0.1 ppmレベルでの量子計測三角形の実証実験を目指す。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

【論文】21件

- [1] D.-H. Chae, M.-S. Kim, W.-S. Kim, T. Oe, N.-H. Kaneko, Quantum mechanical current-to-voltage conversion with quantum Hall resistance array, *Metrologia* **57** 025004 (2020).
- [2] G. Yamahata, S. Ryu, N. Johnson, H.-S. Sim, A. Fujiwara, and M. Kataoka Picosecond coherent electron motion in a silicon single-electron source, *Nature Nanotechnology* **14**, 1019–1023 (2019).
（「電子の量子的挙動捉える 250 ギガヘルツ周波数で往復」、日刊工業新聞 2019/11/7）
- [3] N. Johnson, G. Yamahata, and A. Fujiwara, Measurement of the curvature and height of the potential barrier for a dynamic quantum dot, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 162103 (2019).
- [4] S. Giblin, A. Fujiwara, G. Yamahata, M. H. Bae, N. Kim, A. Rossi, M. Möttönen, and M. Kataoka, Evidence for universality of tunable-barrier electron pumps, *Metrologia* **56**, 044004 (2019).
- [5] T. Oe, A. F. Rigosi, M. Kruskopf, Bi-Yi Wu, Hsin-Yen Lee, Y. Yang, R. E. Elmquist, N.-H. Kaneko, D. G. Jarrett, Comparison between NIST Graphene and AIST GaAs Quantized Hall Devices, *IEEE Trans. Inst. Meas.*, DOI: 10.1109/TIM.2019.2930436
- [6] D.-H. Chae, W.-S. Kim, T. Oe and N.-H. Kaneko, Direct comparison of 1 M Ω quantized Hall array resistance and quantum Hall resistance standard, *Metrologia* **55**, 645-653 (2018).

他 15 件

【解説記事】5件

- [1] 金子 晋久, アンペアの定義の変遷と電気素量に基づく定義がもたらす新たな計測技術, 計測と制御 58 巻 5 号 pp.341-348, 2019年5月
他 4 件

【受賞】3件

- [1] Student Poster Award 受賞, J. Tanarom and H. Shimada Application of the Cooper-pair transistor as a supercurrent switch for superconducting circuits, International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics (Kanagawa, Japan, Nov. 18-22, 2019)

他 2 件

7. ホームページ等

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/afuji/kakenS>

(本研究課題)

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/afuji/> (NTT)

https://unit.aist.go.jp/ripm/qelec-std/QUES_T_staff.html (産総研)

<http://inaho.pc.uec.ac.jp/> (電通大)