

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 30日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860072

 研究課題名（和文） 超伝導、常伝導ハイブリッド構造を持つ単電子トランジスタによる
標準の研究

研究課題名（英文） SINIS single electron transistor towards a current standard

研究代表者

中村 秀司（NAKAMURA SHUJI）

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70613991

研究成果の概要（和文）：

本研究は、超伝導/絶縁体/常伝導/絶縁体/超伝導（SINIS）接合構造を持つ単電子トランジスタを用いることにより未だ実現されていない量子電流標準を実現することを目的として行われた。超伝導体としてアルミニウム、常伝導体として銅を用いることで単電子トランジスタを作製し、素子に交流電圧を印加することで最大で100 pAで4桁程度の不確かさを持つ電流の生成に成功した。またこの素子を並列に配置することで電流値を増幅し、数百 pAの電流が生成できることがわかった。これらの結果は、量子電流標準の実現に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to realize a quantum electric current standard by using a superconductor/insulator/normal metal/insulator/superconductor (SINIS) single electron transistor (SET). Al and Cu are used to make a SET. AC Voltage is induced to the sample, and 100pA electric current with 10^{-4} accuracy is produced at maximum. By arranging these samples in parallel, more than a few hundreds pA current can be generated. These results contribute to the development of a quantum electric current standard.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：電流標準、単電子トランジスタ、超伝導、極低温、高周波、メゾスコピック系、微小接合

1. 研究開始当初の背景

現在の科学技術は高精度で信頼性の高い測定によって支えられているといっても過言ではない。標準研究は、測定結果の正当性を担保するために高精度で信頼性の高い基準を開発、維持、供給をする研究である。微細加工

技術の進歩に伴うナノテクノロジーの発達に代表されるように、近年微小な信号を高精度で測定することが求められるようになり標準研究にますます注目が集まっている。

現在の国際単位系（SI）で定められている7つの基本単位の一つである電流は、電流を

測定する電流計で用いられていることは言うまでもなく、あらゆる科学技術、産業などに用いられている非常に重要な単位である。

現在の国際単位系での電流の定義は、「真空中に1メートルの間隔で平行に配置された無限に小さい円形断面積を有する無限に長い2本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルにつき 2×10^{-7} Nの力を及ぼしあう一定の電流」として定義されている。しかしその定義に従い電流標準を実現することは非常に困難であり、この定義は実用上の電流ではなく、真空の誘電率を定義しているに過ぎない。現在の電流標準は、量子ホール効果を用いた抵抗標準、ジョセフソン効果を用いた電圧標準からオームの法則を用いて間接的に求められており、その不確かさはおおよそ 10^{-8} であるが、この不確かさは数 mA オーダーの電流値のみで成立し、ナノテクノロジーで重要となっている数 fA から数 μ A とした微小電流標準は実現していない。微小電流標準を実現しようとする試みも長年行われており、代表的なものとしてメゾスコピックな金属のトンネル接合を連結させた系、表面弾性波、半導体量子ドットを用いた手法などがある。金属のトンネル接合を連結させた系を用いた研究では微小な電流を正確に生成できるが、制御性が悪く、動作が遅いという欠点を持っている。また表面弾性波や量子ドットを用いた研究では、nA オーダーの比較的大きな電流を生成できる一方で、再現性が悪く不確かさが大きいという欠点がある。このように微小電流標準は現在も実現しておらず、その実現が切望されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導/絶縁体/常伝導/絶縁体/超伝導接合 (SINIS) 構造を持つ単電子トランジスタを用いた直流電流標準の実現である。2007年 Pekola 等は、常伝導/絶縁体/超伝導/絶縁体/常伝導接合 (NISIN) によって形成された単電子トランジスタに数十 MHz の高周波を印加することで高精度の電流が生成できることを実験的に示した。この研究においてはアンドレエフ反射、クーパーペア、電子のコトンネリングなどによるリーク電流が原因で不確かさの値が 10^{-3} であり、電流標準としては不十分である。近年このNISINによって構成された単電子トランジスタをSINIS で構成された単電子トランジスタにし、かつ集積化を図ることで、現在の量子ホール効果、およびジョセフソン接合で実現されている 10^{-8} の精度を持つ電流標準以上の精度が実現できるという理論的な提案がなされた。申請者はこのSINIS で構成された単電子トランジスタによる電流標準の開発を行うことを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

デバイスは電子線描画法、リアクティブイオンエッチング、スパッタリング、ECR、超高真空蒸着を用いて作製した。超伝導はAl、常伝導はCu を用いて、絶縁体はAl を in situ で酸化しAl 表面に Al_2O_3 を形成することで作製した。図1は作製したデバイスである。デバイスの特性評価を行う測定系は、希釈冷凍機中に配線を行い構築した。ソースドレイン電極間に超伝導ギャップの半分に対応するエネルギーのバイアス電圧を印加し、プランジャーゲート電極に直流電圧に重畳させた交流電圧をシグナルジェネレーターによって印加した。この時に流れる電流値は、プランジャーゲート電極に印加する交流電圧の一周期に単電子トランジスタに注入される電荷の数 N と電荷 e 、そして交流電圧の周波数 f の積で記述され、 $I = Nef$ と記述される。周波数は、物理量の中で最も精度よく決定できるものであり、 e 、 M は定数ため電流も精度よく決定することができる。単一素子での駆動を確認したのちデバイスの集積化を行った。素子の作製にはリアクティブイオンエッチング、スパッタリング、ECR、超高真空蒸着を用いた。

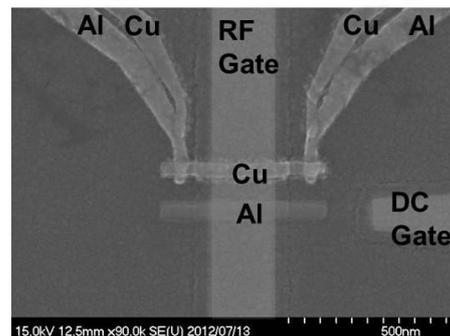


図1. サンプルの走査型電子顕微鏡像

4. 研究成果

①超伝導/絶縁体/常伝導/絶縁体/超伝導構造を持つ単電子トランジスタを作製し、単電子ポンプを行うことによって数 fA~百 pA の電流を生成することに成功した。生成電流の温度依存性を調べることで、生成電流の不確かさの要因の一つが外部雑音による電子温度の増加であることを突き止めた。この外部雑音を取り除くため、高周波フィルタを自作し、電子温度を下げることで不確かさを低減することに成功した。結果、最大で100 pA で4桁程度の定電流の生成に成功した。目標の8桁には届かなかったが、量子電流標準実現に向けて新たな一歩を踏み出すことができた。

②駆動した単電子トランジスタを並列に組み

合わせ、同時に駆動することで電流の増幅を行った。その結果、数百 pA の電流を単電子ポンプで生成することに成功した。

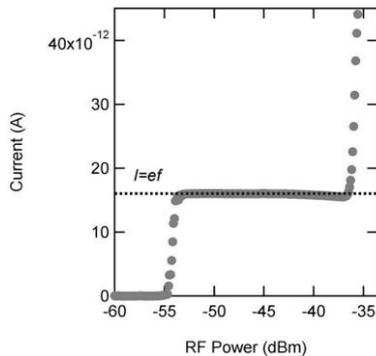


図2. 単電子ポンプによって生成された電流

これらの結果は、これまで実現していなかった微小電流に対する標準を実現するという観点だけではなく、固体素子中における素電荷 e を新たな手法で測定することにもつながり、基礎物理定数の普遍性検証に今後つながっていく成果である。

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 10 件)

- ① Shuji Nakamura, A Review of Current Standard, AIST Bulletin of Metrology, 査読あり, 8, 2012, pp439-463
なし
- ② Makoto Kohda, Shuji Nakamura, Yoshitaka Nishihara, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Jun-ichiro Ohe, Yasuhiro Tokura, Taiki Minenol & Junsaku Nitta, Spin orbit induced electronic spin separation in semiconductor nanostructures, Nature communications, 査読有, 3, 2012, pp 1082-1, 1082-8
DOI:10.1038/ncomms2080
- ③ Yoshitaka Nishihara, Shuji Nakamura, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Makoto Kohda, Junsaku Nitta, Shot noise suppression in InGaAs/InGaAsP Quantum Channels, Applied Physics Letters, 査読有, 100, 2012, 203111
DOI: 10.1063/1.4718934
- ④ Kensaku Chida, Masayuki Hashisaka, Yoshiaki Yamauchi, Shuji Nakamura, Tomonori Arakawa, Tomoyuki Machida,

Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Shot Noise Induced by Electron-nuclear Spin-flip Scattering in a Nonequilibrium Quantum Wire, Physical Review B, 査読有, 85, 2012, 041309
DOI: 10.1103/PhysRevB.85.041309

- ⑤ K Chida, M Hashisaka, Y Yamauchi, S Nakamura, T Arakawa, T Machida, K Kobayashi and T Ono, Non-equilibrium transport in a quantum wire in the quantum Hall regime, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 334, 2011, 012031
DOI:10.1088/1742-6596/334/1/012031
- ⑥ K.Chidal, M.Hashisaka, Y.Yamauchi, S. Nakamura, T. Arakawa, T. Machida, K. Kobayashi, and T. Ono, Dispersive Lineshape Of The Resistively Detected NMR In A Quantum Wire In The Quantum Hall Regime, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1399, 2011, 675
DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.3666557
- ⑦ Shuji Nakamura, Yoshiaki Yamauchi, Masayuki Hashisaka, Kensaku Chida, Kensuke Konbayashi, Teruo Ono, Renaud Leturq, Klaus Ensslin, Keiji Saito, Yasuhiro Utsumi, and Arthur C. Gossard, Nonequilibrium fluctuation relations in a quantum coherent conductor, AIP Conference Proceedings, 査読有, 1399, 2011, 329,
DOI:http://dx.doi.org/10.1063/1.3666387
- ⑧ Tomonori Arakawa, Koji Sekiguchi, Shuji Nakamura, Kensaku Chida, Yoshitaka Nishihara, Daichi Chiba, Kensuke Kobayashi, Akio Fukushima, Shinji Yuasa, Teruo Ono, Sub-Poissonian shot noise in CoFeB/MgO/CoFeB-based magnetic tunneling junctions, Applied Physics Letters, 査読有、98、2011、202103
DOI: 10.1063/1.3590921
- ⑨ Yoshiaki Yamauchi, Koji Sekiguchi, Kensaku Chida, Tomonori Arakawa, Shuji Nakamura, Kensuke Kobayashi, Teruo Ono, Tatsuya Fujii and Rui Sakano, Evolution of the Kondo Effect in a Quantum Dot Probed by Shot Noise Physical Review Letter, 査読有, 106, 2011, 176601
DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.176601

- ⑩ Shuji Nakamura, Yoshiaki Yamauchi, Masayuki Hashisaka, Kensaku Chida, Kensuke Konbayashi, Teruo Ono, Renaud Leturcq, Klaus Ensslin, Keiji Saito, Yasuhiro Utsumi, and Arthur C. Gossard, Fluctuation theorem and microreversibility in a quantum coherent conductor, Physical Review B, 査読有、83、2011、155431
DOI : 10.1103/PhysRevB.83.155431

〔学会発表〕 (計 14 件)

- ① 中村 秀司、金子晋久、Yuri Pashkin、蔡 兆申、超伝導リードと常伝導アイランドを持つターンスタイル素子による定電流生成、日本物理学会、2013 年 03 月 26 日、広島大学 (広島県)
- ② 中村 秀司、金子晋久、Yuri Pashkin、蔡 兆申、単電子ポンプによる電流標準、日本物理学会、2012 年 09 月 20 日、横浜国立大学 (神奈川県)
- ③ 知田健作、橋坂昌幸、山内祥晃、中村秀司、荒川友紀、西原禎孝、町田友樹、小林研介、小野輝男、電流ゆらぎ測定による量子ホール効果ブレイクダウン前駆現象の観測 II、日本物理学会 第 67 回年次大会、2012/3/26、関西学院大学 (兵庫県)
- ④ 中村秀司、Yuri Pashkin、蔡兆申、金子晋久、電流標準実現に向けた測定系の開発と素子作製、日本物理学会 第 67 回年次大会 2012/3/26、関西学院大学 (兵庫県)
- ⑤ 西原禎孝、中村秀司、知田健作、荒川智紀、田中崇大、小野輝男、内海裕洋、齊藤圭司、R. Leturcq, K. Ensslin, 小林研介アハラノフ・ボームリングにおける非平衡揺らぎ関係、日本物理学会 第 67 回年次大会 2012/3/26、関西学院大学 (兵庫県)
- ⑥ 好田誠、中村秀司、西原禎孝、小林研介、小野輝男、都倉康弘、新田淳作、InGaAs 量子ポイントコンタクトを用いた Rashba スピン軌道相互作用による電氣的スピンの生成、日本物理学会秋季大会、2011/9/21、富山大学 (富山県)
- ⑦ 中村秀司、西原禎孝、知田健作、荒川智紀、関口康爾、千葉大地、小林研介、小野輝男、好田誠、新田淳作、InGaAs 二

次元電子系上に作製した量子ポイントコンタクトにおける電流雑音測定、

- ⑧ 西原禎孝、中村秀司、知田健作、荒川智紀、小林研介、小野輝男、好田誠、新田淳作、InGaAs 二次元電子系に作製した量子ポイントコンタクトにおける電流揺らぎ測定 II、日本物理学会秋季大会、2011/9/21、富山大学 (富山県)
- ⑨ 荒川智紀、関口康爾、中村秀司、知田健作、西原禎孝、千葉大地、小林研介、福島章雄、湯浅新治、小野輝男、トンネル磁気抵抗素子における電子のアンチバンチングの観測、日本物理学会秋季大会、2011/9/23、富山大学 (富山県)
- ⑩ 知田健作、橋坂昌幸、山内祥晃、中村秀司、荒川友紀、西原禎孝、町田友樹、小林研介、小野輝男、電流ゆらぎ測定による量子ホール効果ブレイクダウン前駆現象の観測、日本物理学会秋季大会、2011/9/23、富山大学 (富山県)
- ⑪ K. Chida, S. Nakamura, T. Arakawa, T. Nishihara, T. Machida, K. Kobayashi and T. Ono “Precursor phenomenon of the quantum Hall effect breakdown detected by the noise measurement”, The 19th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-19) (Tallahassee, Florida, USA, July 25-29, 2011)
- ⑫ M. Kohda, S. Nakamura, Y. Tokura, Y. Nishihara, K. Kobayashi, T. Ono, and J. Nitta “Electrical spin generation by Rashba spin orbit interaction in InGaAs quantum point contacts”, 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH6) (Matsue, Japan, August 1-5, 2011)
- ⑬ Y. Nishihara, S. Nakamura, K. Chida, T. Arakawa, K. Kobayashi, T. Ono, M. Kohda, and J. Nitta: “Shot noise measurement in the InGaAs quantum point contacts”, 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH6) (Matsue, Japan, August 1-5, 2011)
- ⑭ T. Arakawa, K. Sekiguchi, S. Nakamura, K. Chida, Y. Nishihara, D. Chiba, K. Kobayashi, A. Hukushima, S. Yuasa, and T. Ono: “Observation of

Sub-Poissonian Shot Noise in
CoFeB/MgO/CoFeB-Based Magnetic
Tunneling Junctions”, 6th
International School and Conference on
Spintronics and Quantum Information
Technology (SPINTECH6) (Matsue,
Japan, August 1-5, 2011)

[その他]

サイエンスアウトリーチ活動

ウインター・サイエンスキャンプ WINTER
SCENCE CAMP' 12-' 13

「量子効果を体験しよう～量子力学とその標
準への応用」2013/01/07～2013/01/09

<http://rikai.jst.go.jp/sciencecamp/camp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 秀司 (Nakamura Shuji)

独立行政法人産業技術総合研究所

計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70613991