

氏名	岡崎 雄馬
所属機関	産業技術総合研究所
研究題目	単一電子精度での有限周波数電流計測の実現

## 1. 研究の目的

近年、超低消費電力を目指した半導体素子開発やナノ粒子数計測が必要となる産業分野、さらには医療用放射線計測技術分野で、フェムト ( $10^{-15}$ ) からピコ ( $10^{-12}$ ) アンペア領域の超微小電流の精密測定技術のニーズが高まっている。今後、ナノテクノロジーの発展に伴い研究対象が微細化されるにつれ、材料評価・物性現象などで微小電流計測が必要とされる分野はますます拡大すると予想される。微小電流計測における精度および信頼性向上のために、電子を一つ一つ計測し制御できる単一電子素子を用いて“精確” (精密かつ正確) な電流を発生させることで、安定性が高く普遍的な電流の基準である直流電流標準の実現を目指した研究が、現在世界中で精力的に行われている。これらの取り組みにより、直流電流の計測においては単一電子精度の精密測定技術が確立されつつある。一方、有限周波数に関しては、周波数領域の情報が重要なインピーダンス計測や電流雑音計測、センシングなどにおいて重要であるにも関わらず、単一電子精度での計測技術は実現されていない。申請者は、このような単一電子素子を用いた電流計測技術の実現に必要な素子作製・制御方法の確立を目指して研究を行っている。本研究では、申請者が考案した新規駆動方式である単一電子デジタル変調技術によって、従来の単一電子制御方式では不可能だった有限周波数電流の制御技術の実証実験を行い、有限周波数の情報が重要となる化学インピーダンスや電流揺らぎの精密計測技術を実現する。この技術は将来、微少電流計測が重要となる材料の評価やナノ領域での物性現象の解明などへ波及する技術であり、新材料開発などへの貢献が期待される。

## 2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

**[研究手法]** 半導体微細加工技術の発展に伴い素子を数ナノメートルのスケールで加工できるようになった。このようなナノ領域に電子が閉じ込められると電子間のクーロン斥力に起因するクーロンブロックードが観測され、それを利用することで閉じ込められた電子を一つ一つ電氣的に制御・計測できる。この「単一電子素子」を用いることによって単位時間に電子を一つ一つ周期的に転送することが可能になり、単一電子精度で直流電流を発生できる。例えば 1 Hz で電子を転送すれば 0.16 アトアンペア ( $10^{-18}$  A)、1 GHz では 0.16 ナノアンペアの直流電流が発生できる。発生した直流電流を測定の基準 (すなわち電流標準) として用いることによって精密な直流電流計測を実現する研究が世界各国の計量研究所などで盛んに研究されている。他研究所での先行研究では直流電流の発生のみが研究されてきたが、申請者はその動作原理を有限周波数へと拡張した新しい駆動方式を世界に先駆けて提案・実証し、計測の範囲をインピーダンス計測や電流雑音の計測などへ拡張することを目指している。インピーダンスのように周波数情報が需要となる精密電流計測が実現されることにより、直流電流では観測できないナノ構造中の電子物性の解明、単一分子・イオンレベルでの電気化学反応の検出といった分野へ波及すると期待される。

単一電子を周期的に転送する従来の方式では直流電流のみを発生できる。有限周波数電流を発生させるには、転送に ON/OFF のデジタル変調をかけて単一電子のパルス密度を変調しなくてはならない。このような単一電子レベルでのデジタル変調は申請者が考案した新規の制御方式であり、動作原理の実証と性能評価を行うことが最終目的である。予備実験において動作原理の一部の検証ができていたが、動作速度が数 10MHz 程度と低速であり発生できる電流がピコアンペアレベルと小さいものであった。またエラー評価が行えておらず発生した電流の精度が道である。今後はこれらの改善を行うことで、提案した単一電子デジタル変調の原理実証を行う。

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

**【経過・評価】** (1) 単一電子制御速度を向上させることと、(2) 電流精度を劣化させる要因である単一電子の制御エラーを評価することの2つを計画している。

(1) 本研究により 1 GHz 程度まで動作速度を向上した単一電子の制御ができれば、電気化学計測やナノデバイスの測定で対象となるフェムトから数百ピコアンペアの電流生成が実現される。一昨年までに行った予備実験では、100 MHz 以下の動作周波数を用いて有限周波数電流の発生動作原理確認を行ってきた。この 100 MHz 以下の動作周波数は、作製した素子そのものによって律速されているわけではなく駆動用の電圧波形パルスが発生する任意波形発生器の周波数帯域といった実験装置由来の律速と、高周波信号が素子に到達するまでの導入ライン（同軸ケーブル、サンプルマウント用のプリント基板、およびサンプル上の配線抵抗など）によって素子まで高周波が正しく伝達しないことが要因であることが判明した。そこで本研究ではより高速の電圧波形を発生できる任意波形発生器の導入とプログラム作成、高周波用のプリント基板の設計製作、より減衰の少ない高周波ケーブルの部品の選定と冷凍機への実装などを行い高周波動作に向けた測定セットアップの構築と評価を行った。また、素子の電気配線は従来数 10 nm 程度の厚みの金を電子線蒸着装置によって製膜して作製してきたが、その抵抗値は数キロΩ程度あることが判明した。このように高い抵抗値の配線では、浮遊容量によるローパスフィルタ効果によって高周波信号が減衰する要因になると考えられる。配線抵抗を低減させる方法として、低温で電気抵抗がゼロになる超伝導体を電極材料に用いる方法が理想的である。本研究では、超伝導材料としてアルミニウムを採用し、所有している EB 蒸着装置での素子作製の条件出しなどを行い素子上での高周波伝達特性を改善する。本研究助成金は、冷凍機実験装置の構築に必要なコネクタやケーブルの調達に使用したほか、超伝導電極を作製するための蒸着用高純度アルミニウムの調達に使用した。

(2) 単一電子制御による電流の発生では、発生した電流の精度は単一電子をどれだけ正確に制御できるかという精度によって決まるため、制御エラーの評価は極めて重要である。しかし単一電子制御で発生される電流量は極めて微小(数 100 pA 程度)であり、かつその微小電流を 7~8 桁程度の精度で評価することが求められているため、高精度に評価することは至難の業である。そこで本研究では図 1 に示したようなバック to バックによる単一電子制御のエラー評価を試みる。同一の単一電子デバイスを並列に 2 台並べそれぞれで逆向きに単一電子を輸送する。エラーなく単一電子の輸送ができていれば、発生する電流は正味ゼロであるため、高感度な電流によって電流がゼロであることを測定(ヌル検出)することによってエラーがゼロであることを検証するアイデアといえる。このセットアップのメリットは、電流の絶対値を測るのではなく、ゼロであることを検出できればよいため絶対値を校正した電流計を必要としないことである。とはいえ、数 100 pA 程度の微小電流に対し 7~8 桁の精度でエラーを評価するためには、10 aA ( $10^{-17}$  A) レベルの電流感度でヌル検出を行う必要があり、室温で用いられる市販の電流計では現実的な測定時間で必要な精度に達することができない。そこで本研究では超伝導量子干渉素子(SQUID)と呼ばれる極低温動作可能な素子を改造し高感度なゼロ電流検出器である超伝導量子検出器を開発することによって、上記のような微小電流のヌル検出を行い、エラーの評価を行うことを目指した(図 1)。

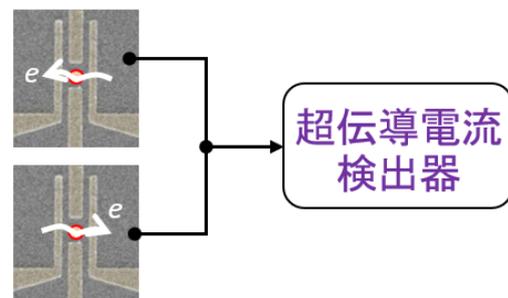


図 1: 単一電子転送のエラー評価のためのセットアップ。逆向きに転送された単一電子流がゼロであることを検出する。

### 3. 研究の結論、今後の課題

【結論】 (1) 単一電子素子の動作速度改善を目指した高周波測定装置のセットアップ構築に関しては、冷凍機の高温度部から低温部へ配線を引き込む同軸ケーブルの線材を低抵抗なものへ変更し断面積を増やしたことでケーブル伝達におけるロスをもっと低減させることができた。また、サンプルをマウントするサンプルホルダー部のプリント基板を高周波用の多層基板とすることで基板での反射などの影響を低減させた。一方、素子改良に関しては、良質のアルミニウムの蒸着の条件出しを行い超伝導電極による素子作製の条件出しを行った。申請者はアルミニウム薄膜の蒸着に関してはこれまで成膜経験がほとんどなかったため、ソースやるつぼ材料と超伝導電極としての膜質などの関連性にほとんど知見がなかった。ソースとしては、5N~6N純度のアルミニウムを複数社から入手したほか、るつぼとしてはタングステン、アルミナ、窒化ホウ素コンポジットなどを採用し、蒸着方法としては電子線加熱方式、抵抗加熱方式などを比較した。特にるつぼの選定は膜質と関連しており、タングステンでは合金化、アルミナではるつぼ内の酸素によって膜質が劣化し、超伝導転移しないなどの問題があった。最終的には窒化ホウ素コンポジットを用いた方法でうまく蒸着するに至った。また、室温では粒成長がみられ膜質が悪いことから基板を液体窒素冷却できるように装置改良し、膜の品質向上を行うことが可能になった。これらの成膜装置、条件を利用することによって高周波特性の良い素子作製が可能になった。

(2) 単一電子制御エラーの評価に関して高感度なヌル電流検出器の開発をおこなった。SQUID 自身は磁束を高感度に検出するものであり電流の検出能力だけ見るとそれほど高くはない。そこで、入力段に空芯コイルでトランスフォーマーを用意し、電流の通倍を行うことによって微小な電流信号のヌル検出を実現する。用意したのは市販の高感度な SQUID センサーである。回路シミュレータを用いてトランスフォーマーのインダクタンスを最適化し、空芯コイルとしてマコール性のボビンに巻き線機でコイルを巻きトランスフォーマーを作製した。トランスフォーマーならびに SQUID は地磁気などの外部磁場に影響を受けるため、磁気シールドが必要となる。助成金を利用するなどし、超伝導体である鉛とアルミニウムからなる 2 重の磁気シールドボックスを作製した。SQUID の特性を評価するために無冷媒 He3 冷凍機 (到達温度 3 K) に実装し、電流検出感度など動作特性などを測定した。

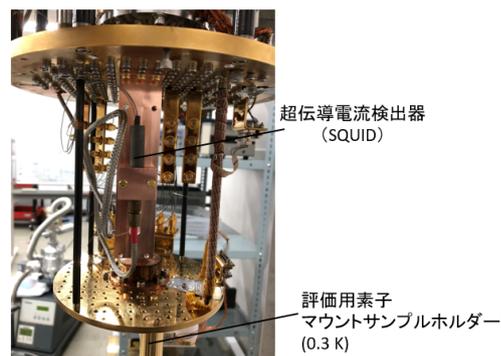


図 2 : 高感度な超伝導電流検出器を冷凍機に実装した単一電子輸送の評価用装置

【今後】 開発した評価装置は設計していたよりも電流雑音レベルが高いことが判明した。これは、無冷媒冷凍機の冷却に用いられているパルスチューブ冷凍機による機械的な振動によってケーブルなどが振動することに由来すると考えられる。振動を低減するためにダンピング機構を取り入れた固定部材の設計などを現在進めている。また、機械振動の影響を解析的に低減させるデータ収録を取り入れた計測プログラムの開発にも着手している。これらの装置開発が完了させ、単一電子素子と組み合わせ制御エラー評価を行う実験を行っていく予定である。

今回開発した低温での高感度ヌル検出は、本実験で想定している単一電子のエラー評価以外にも、抵抗や電圧の高精密測定にも用いることができる。例えば抵抗器を精密比較する際に用いられるホイートストンブリッジ回路のもバランスの検出に高感度な電流検出回路が必要であり、それらへの応用に関しても回路シミュレータなどを用いた理論研究を行っている。それらに関して日本物理学会などでの発表を行った。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

本研究によって微小電流の精密測定技術が発展することで、社会的にも関心の高い産業・医療分野での新材料の開発や計測応用への波及が期待される(図2)。具体的には、(1)微少電流測定は高絶縁材料の絶縁特性評価に必要である。高絶縁材料が開発できればトランジスタで使われるゲート絶縁膜のリーク電流低減につながり、集積回路などの消費電力低減が実現される。(2)がんの治療で用いられる医療用放射線の線量は、放射線を電流へ変換し電流計測に基づいて線量を決定しているため、高精度な電流計測により信頼性の高い放射線治療が実現される。(3)PM2.5などで注目される大気中ナノ粒子の計測では、粒子をイオン化してその電流から粒子数を計数しており、正確な電流計測は信頼性の高い環境計測を実現させる。

##### 4. 2. 学術的価値

本研究では、単一電子の制御によって有限周波数電流を制御して発生するために、単一電子デジタル変調という新規駆動原理を実装する。この原理はデジタルアナログ変換方式の一つであるパルス密度変調を応用したものである。特に本研究の新規性は、単一電子の精度で電気パルスをデジタル変調制御して任意のアナログ波形の電流発生を行うことである。これは、究極のデジタル信号制御を実現するものであり、学術的にもインパクトは大きいと期待している。また精密な微少電流(特に有限周波数電流)の測定はナノ構造における電子物性の解明をはじめとした物性物理・ナノテクノロジー関連の実験研究でも重要な実験手法であり、測定技術の向上による新規学術分野の開拓など学術的な波及効果が期待される。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)