

# 単一電子トンネルを用いた量子電流標準の研究 ( Research of Quantum Current Standard using Single Electron Tunnelings )

基礎計測部

福島章雄, 岩佐章夫, 佐藤 昭

We report a progress summary of the present research for the quantum current standard using single electron tunnelings. This current standard is based on the characteristic of the quantized current  $I = ef$ , which results from the artificial single electron tunnelings locked to the external frequency.

At the first step of this research, we focus on the single electron transistor and try to control the source-drain current by the gate input. Recently, we success to measure a clear gate modulation of the conductance in the single electron transistor at 10 mK. The charge sensivity of the single electron transistor is obtained as low as  $0.05 e$ .

## 1. はじめに

単一電子トンネル現象は、微小トンネル接合を十分低温に冷却したとき、電子が離散的にトンネルする現象である。この現象を観測するためには、電子一個の増減による接合での静電エネルギーの変化分が、環境の熱擾乱のエネルギーより、十分大きくなる必要がある。このような微小トンネル接合列に、接合間の電圧差をコントロールする外部電極(ゲート電極と呼ばれる)を設け、電子の移動一つ一つを人工的に制御し、単位時間に移動する電子の数を数えることができれば、素電荷  $e$  を単位とした量子化された電流(量子化電流)を得ることが出来ると期待されている。

この研究に先立って、我々は 1993 年から 1998 年の 5 年間にわたり「微小トンネル接合の基礎特性の研究」というテーマで研究を行い、微小トンネル接合の作成技術、トンネル接合の電気的特性を低温で測定する技術を確立することができた。この研究の成果については、昨年、彙報に発表させていただいた<sup>1)</sup>。

本研究は、上に挙げた研究テーマを発展させたものとして 1999 年より始まったもので、微小トンネル接合を組み合わせ、単一電子トランジスタ、単一電子ポンプを作成し、量子化電流を作成することを目的とし、かつ量子化電流が新しい電流標準として使えることを期待し、

研究を進めている。この 1 年間、我々は単一電子トランジスタのゲート変調を、より明瞭に観測することを目標に研究を行い、素子作成技術の改良、冷凍機の改良、測定系の見直しを行ってきた。その結果、自作の単一電子トランジスタを 10 mK まで冷却し、明瞭なゲート変調を観測することができた。また、自作した単一電子トランジスタをエレクトロメーターとしてみた場合の感度は、個体差があるものの、良く出来た素子の場合  $0.05 e$  程度であった。

## 2. 単一電子トランジスタの理論

図1に単一電子トランジスタの回路図を示す。単一電子トランジスタは、2つの微小トンネル接合と、1つのゲート電極からなる3端子素子である。図1のように、2つの微小トンネル接合を直列につなぎ、トンネル接合間の部分(電源から電氣的に絶縁された部分で島と呼ばれる)の近傍にゲート電極を設け、ゲートキャパシタンスを介して島と容量結合させたものである。

十分低温に冷やした接合容量  $C$  を持つ1つの微小接合は、接合間の電圧が  $|e/C|$  を超えるとクーロンブロッケードが壊れて電流が流れ出し、そのとき微小接合はトンネル抵抗  $R$  の抵抗値を持つ抵抗とみなせる。これをそのまま単一電子トランジスタに拡張し、二つの直列に

**KEY WORDS :** 微小トンネル接合, 単一電子トンネリング, 単一電子トランジスタ, ゲート変調, 量子化電流

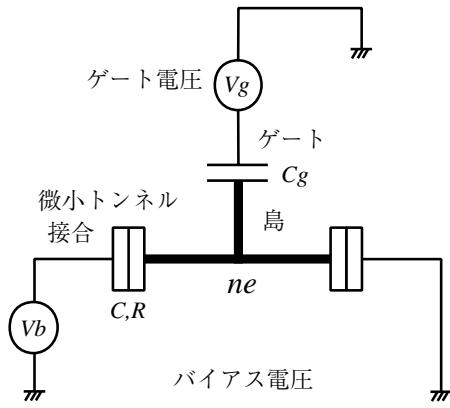


図1 単一電子トランジスタ  
静電エネルギーを計算する際は、ゲートの容量が微小接合の容量に比べて非常に小さいものであると仮定している。

つないだ微小接合に電圧がかかると考えれば、接合間の電圧が  $|e/2C|$  以下でクーロンブロックード、それ以上で  $2R$  の抵抗と見なせることが導かれる。

しかし、単一電子トランジスタでは、ゲート電極が存在するため、クーロンブロックードに対する条件はもう少し複雑になる。ゲート電極に外部から電圧を与えることで、島の電荷を外部からコントロールすることが出来る。島の電荷を変化させることにより、微小接合でのクーロンブロックードを制御し、結果として、接合列側のコンダクタンスを変化させることができる。このように、外部からゲート電圧を与え、接合列のコンダクタンスを変化させることをゲート変調と呼んでいる。

単一電子トランジスタのゲート変調の仕組みを、クーロンブロックードが成立する条件をゲート電圧・バイアス電圧平面上で示すことで考えてみる。図1に示した単一電子トランジスタで、2つの微小接合がともに等しい場合を考える。微小接合の接合容量を  $C$ 、トンネル抵抗  $R$ 、ゲート電極と島の間を  $C_g$  とする。バイアス電圧を  $V_b$ 、ゲート電圧を  $V_g$  とし、バイアス電圧は接合列の片側にかかるものとする。島での過剰電子数を  $n$  としたとき、1つの電子のトンネルにより、過剰電子数が  $n+1$  になったときの静電エネルギーの変化  $\Delta E$  は次のようになる。

$$\Delta E = \frac{e(CV + C_g V_g + ne - \frac{e}{2})}{2C + C_g} \quad (1)$$

一方、一つの接合において電子のトンネル確率  $\Gamma$  は  $\Delta E$  の関数であり、

$$\Gamma = \frac{1}{e^2 R} \frac{\Delta E}{1 - \exp(-\Delta E/k_B T)} \quad (2)$$

で与えられ、絶対零度の極限では、

$$\Gamma = \begin{cases} \Delta E/e^2 R & \Delta E > 0, \\ 0 & \Delta E \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

となる。クーロンブロックードの領域は  $\Gamma = 0$  であるので、1式において  $\Delta E < 0$  となる領域を求めればよい。島の上での過剰電子数が  $n$  でクーロンブロックードになっている領域を求める場合、領域の境界は  $n \rightarrow n+1$ ,  $n+1 \rightarrow n$ ,  $n \rightarrow n-1$ ,  $n-1 \rightarrow n$  の四種のトンネルの境界条件からなり、絶対零度において次のように表される。

$$\begin{cases} e(n-1/2) < C_g V_g + CV < e(n+1/2) \\ e(n-1/2) < C_g V_g - CV < e(n+1/2) \end{cases} \quad (4)$$

これをゲート電圧・バイアス電圧平面上で表したのが、図2である。連続したひし形の内部が、それぞれ島上で過剰電子数一定のクーロンブロックード領域に対応し、その外側では、接合列はおおよそ  $2R$  の抵抗として振る舞う。この図から、0でない  $|e/2C|$  以下のバイアス電圧をかけ、ゲート電圧を変化させると、接合列のコンダクタンスがゲート電圧に対して  $e/C_g$  の周期を持ち増減することが解る。

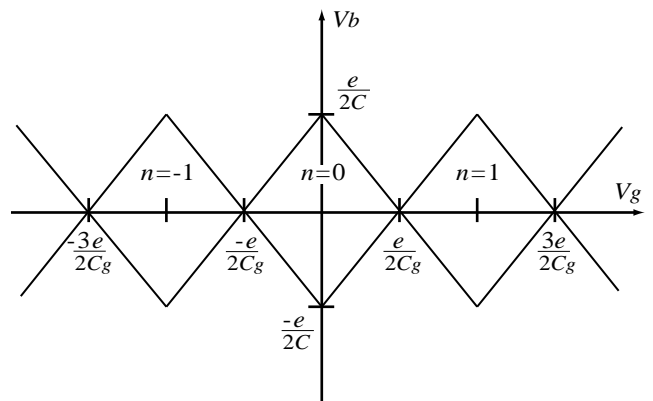


図2 単一電子トランジスタのクーロンダイヤモンド  
バイアス電圧  $V_b$ 、ゲート電圧  $V_g$  を変化させて電流を測定すると、バイアス電圧-ゲート電圧平面上のひし形の領域内で、単一電子トランジスタがクーロンブロックード状態になる。それぞれのひし形の領域内の  $n$  の数は島の内部の過剰電子の数を示す。

### 3. 素子作成と測定回路

我々の作成方法はドーラン法<sup>2)</sup>と呼ばれる方法である。二層レジストと電子線リソグラフィーを用い、サスペンティッドマスク(下層が抜けている橋状のマスク)を作成し、異なる二方向から金属を蒸着し、橋の真下に微小接合を作製している。我々が作成している微小トンネル接合は、アルミニウム-酸化アルミニウム-アルミニウムの構造で、概ね  $0.1\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$  の大きさ、接合容量は  $1 \sim 0.5\text{fF}$  程度である<sup>3)</sup>。

単一電子トンネル素子(単一電子トランジスタ, 単一電子ポンプなど)を作成する場合、動作条件を考えると、一つの接合を小さくすることよりも、素子を構成するトンネル接合の容量が揃っていることが重要である。そのため、ある程度マージンをとって、各接合の容量が揃うようにパターン、描画の工程を工夫している。図3に、我々が作成し、実際に測定を行っている単一電子トランジスタのSPM像を示す。

我々の素子の場合、接合が比較的大きいので、測定の際、素子を数十 mK まで確実に冷やす必要がある。そのため DIP パッケージの底面が金メッキされた無酸素銅になっているものを、サンプルホルダーとして使用している。図4にその外形を示す。このサンプルホルダーは NEC 基礎研究所の中村泰信氏のグループに教えていただいたもので、大変重宝している。

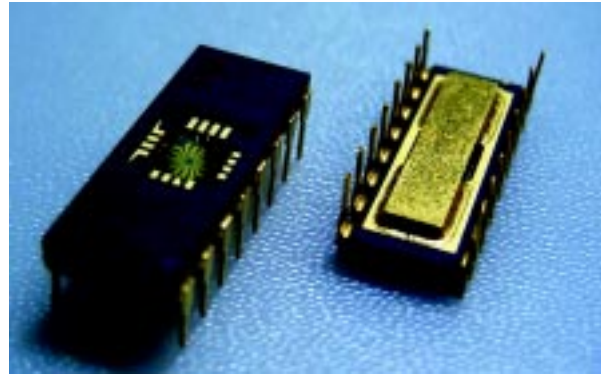


図4 低温測定用 DIP パッケージ  
左が上向き、右が下向きに置いたもの。左のパッケージの中央部には、実際に単一電子トランジスタの乗った素子がマウントしてある。中央部のマウント部は貫通穴になっていて、右に見えるパッケージ下部の無酸素銅の熱アンカー部に直接触れるようになっている。

測定回路で注意すべき点は、初段のアンプの入力オフセット電圧と、入力バイアス電流である。我々の素子の場合、接合容量が  $1\text{fF}$  程度であるため、バイアス電圧上で期待できるクーロンブロックの幅として  $0.1\text{mV}$  程度、それに対する電流変化分として  $100\text{pA}$  程度が予測される。したがって、それぞれの値の  $1/100$  程度として、初段のアンプには、入力オフセット電圧  $1\mu\text{V}$ 、入力バイアス電流  $1\text{pA}$  以下のものが要求される。実際には、測定中の時間内でそれぞれの変化分が、この程度に収まっていればよい。

ここで市販の測定器を検討してみると、一般的にエレクトロメーターは微小電流が測定できるが入力オフセット電圧が大きく(数 mV のオーダー)、ナノボルトメーターは微小電圧の測定には向いているが入力バイアス電流が大きい(数十 pA のオーダー)。市販の計測用のオペアンプを見ても同じ傾向で、入力オフセット電圧の小さいオペアンプは入力バイアス電流が大きく、入力バイアス電流の小さなオペアンプは入力オフセット電圧が大きくなっている。

そこで、我々は、NIST ボルダールのグループが用いている回路<sup>4)</sup>を参考に、初段に入力バイアス電流と入力オフセット電圧の両方が比較的小さいオペアンプ Burr-Brown 社 OPA627 を用い、微小電流測定用電流アンプを自作した。このオペアンプは、低ノイズ ( $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  at  $10\text{kHz}$ )、低バイアス電流 ( $5\text{pA max.}$ )、低オフセット電圧 ( $100\mu\text{V max.}$ ) のオペアンプであり、さらに電源電圧を  $\pm 5\text{V}$  にすることにより、入力バイアス電流、入力オフ

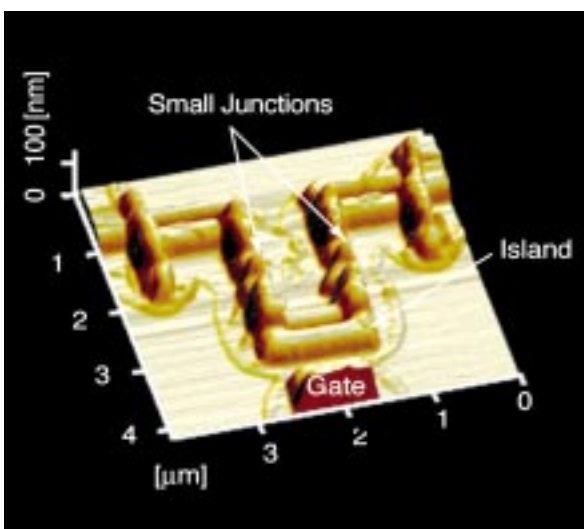


図3 単一電子トランジスタの SPM 像  
手前に見える部分がゲート電極、左右に伸びている部分がそれぞれ微小接合につながっている。微小接合は手前斜め方向と後方斜め方向からの蒸着によって作られ、島部分の大きさは  $1\mu\text{m}$  角程度である。

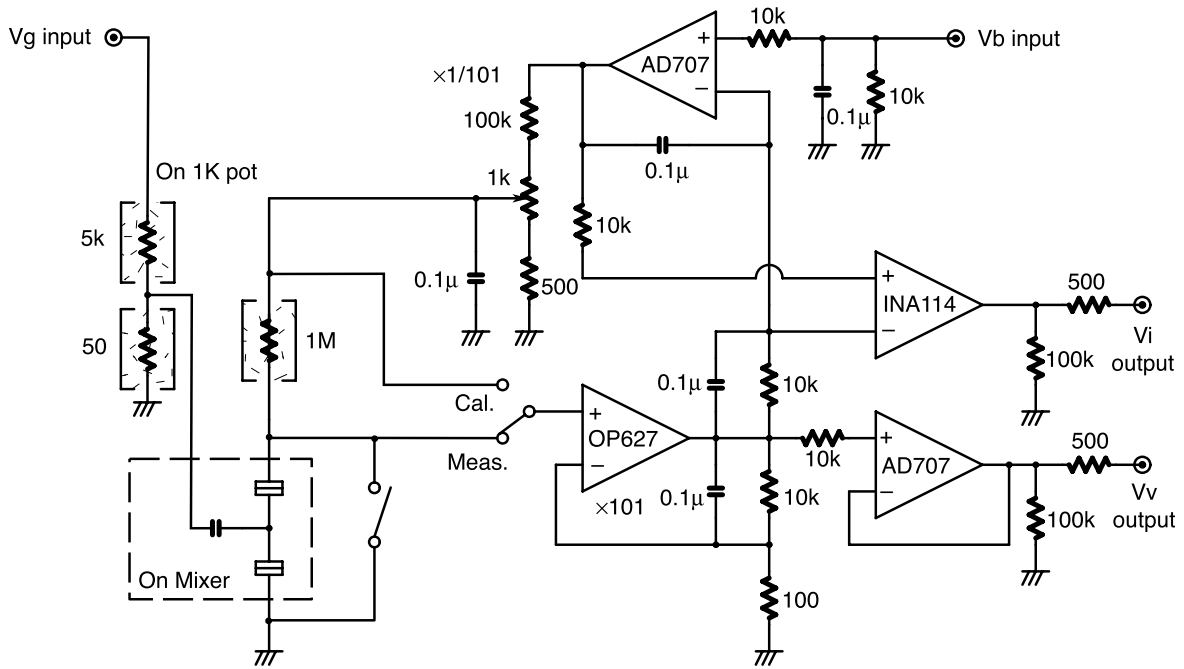


図5 自作した微小電流測定回路  
回路中 1K ポットの上に設置した3つの抵抗は、熱アンカーのためスタイキャスト 2850FT でモールドしてある。単一電子トランジスタ（点線内部）は、希釈冷凍機の混合機の下に設置した。その他の部分は室温部に設置してある。

セット電圧を定格動作時(±15V駆動)から一桁下げようようにしている。

測定回路は、希釈冷凍機の1Kポット部(約 1.3 K)に、電流測定用の基準抵抗(1 MΩ の金属皮膜抵抗を用い、測定時の抵抗値は 3.871 MΩ)を設置し、その電圧(これが電流値になる)と素子にかかる電圧を測定するものである。図5にその回路図を示す。熱ノイズを少なくするためには、基準抵抗をできるだけ低温にするのが望ましいが、素子近傍に設置すると発熱が気になるので 1K ポット部に設置した。また、素子に流れる入力バイアス電流の影響をできるだけ小さくするため、直接素子につながる入力端子が1本のみになるように回路を工夫してある。

この回路の電流感度は、次のようにして求められる。素子に 1 nA 流したとき、電流出力端子 Vi に電圧として  $3.871 \text{ M}\Omega \times 1 \text{ nA} \times 101 = 0.392 \text{ V}$  が得られ、これから電流出力から電流値への換算係数 2.55 pA/mV が得られる。室温では、基準抵抗の値が 1 MΩ になるので、電流値への換算係数は 9.90 pA/mV となる。室温で、素子かわりにダミーの金属皮膜抵抗を付けた状態での回路の電流換算ノイズは  $0.1 \sim 0.2 \text{ pA}_{pp}$  であった。

#### 4. 実験結果

作成した単一電子トランジスタは、希釈冷凍機で 10 mK 程度まで冷却し、バイアス電圧、ゲート電圧に対する電流変化を測定している。単一電子トランジスタの能力は、高感度のエレクトロメーターとして見たときの感度(ゲート電荷に対する電流変化)で表すと比較しやすい。

ゲート電圧による電流変化の1周期が、ゲート電極で 1電子  $e$  の変化によるものとし、このときの電流変化の振幅を  $\Delta I$  とすれば、エレクトロメーターの感度は  $2\Delta I/e$  になる。さらに、測定系の電流換算ノイズ  $I_{noise}$  を感度で割って規格化したものを、単一電子トランジスタの電荷感度  $(I_{noise}/2\Delta I)e$  とする。

接合容量が同じ場合、ゲート変調による電流変化の幅(以下これを変調幅と呼ぶ)は、主にトンネル抵抗に依存するが、素子の温度が高くなったり、環境からのノイズが大きい場合は、変調幅が小さくなる傾向がある。我々が今まで作成した素子(トンネル抵抗 500 kΩ 程度、接合容量 0.5 fF 程度)を 10 mK 程度まで冷却した場合、数十  $\text{pA}_{pp}$  から最大 200  $\text{pA}_{pp}$  程度の変調幅が得られた。

我々が作成したものと同一パラメーター  $C, R$  を持つ単一電子トランジスタが理想的に動作した場合、変調幅の最大値はクーロンブロックの境界での電流変化に等しく、約  $320 \text{ pA}$  になる。これと我々の素子の場合を比較すると、理想的な場合の  $10 \sim 60\%$  の変調幅が得られている。

単一電子トランジスタの電荷感度を求めるには、電流換算した測定系のノイズを、上で求めた変調幅で割ってやればよい。前節で述べた微小電流測定回路に、素子と同じ程度の抵抗をつけて評価したときのノイズはおおよそ  $0.1 \text{ pA}_{pp}$  であるが、実際に素子を冷却した状態では、極端に外部からの振動に弱くなりノイズが増える。さらに、低温では、素子近傍にトラップされた電荷がランダムに動くことによって、素子に流れる電流が変化するオフセットチャージと呼ばれる現象が起こる。オフセットチャージは、低温に保持する時間を長くすることによって減少する傾向があり、これは冷却時間を長くすることにより、基板を含めた素子全体の温度勾配が少なくなるためと考えられている。

オフセットチャージの効果が比較的少ない状態で、測定した実験結果を図6に示す。単一電子トランジスタを  $10 \text{ mK}$  に3日間ほど冷却し、バイアス電圧を  $20 \mu\text{V}$  ずつ変化させ、ゲート電圧を  $\pm 1 \text{ mV}$  の範囲で振り、最大  $30 \text{ pA}_{pp}$  程度のゲート変調を観測することができた。ゲート変調の周期より、ゲート電極の容量は約  $0.16 \text{ fF}$  と見積ることができる。この測定にはおおよそ40分ほどかかっているが、その間、大きなトレースの飛びは2ヶ所であった。

オフセットチャージの効果と我々の測定系のノイズを見積もるために、バイアス電圧、ゲート電圧ともに固定した状態で、電流の時間依存性を測定した。典型的な例を図7に示す。図のように、数分程度の間隔でランダムに数  $\text{pA}$  から十  $\text{pA}$  の比較的大きな電流の飛びが、1分程度の間隔で  $1 \text{ pA}$  程度の小さな電流の振動が起こっていることが解る。最近、測定系のノイズの原因を細かく調べることにより、小さな振動の方は、冷凍機のポンプの振動に強い相関があることが解った。このノイズは、ポンプの振動に誘起されたマイクロホンノイズではないかと考え、徹底的に振動を切るように配管系を見直しているところである。さらに、振動を切ることによって、オフセットチャージの効果も少なくなることを期待している。

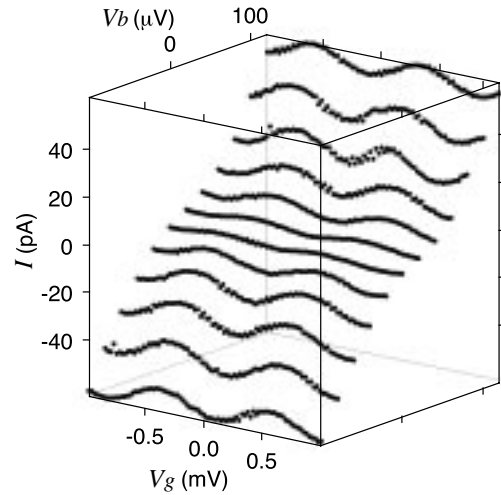


図6 バイアス電圧、ゲート電圧に対する電流の3次元プロット  
温度  $10 \text{ mK}$  において測定したもの。このプロットを上から ( $z$  方向から) 眺めると、電流の流れにくい部分が、ちょうど図2のクーロンダイヤモンドの形状になっていることがわかる。

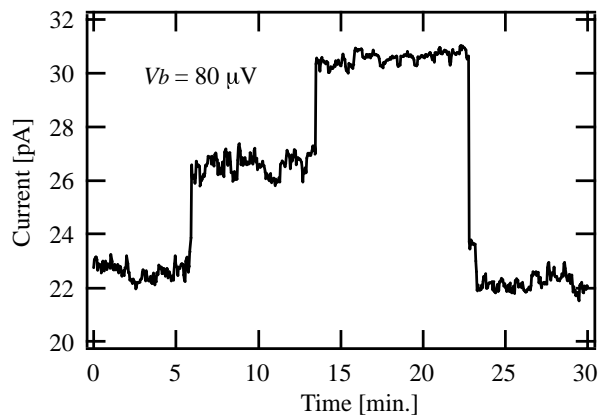


図7 バイアス電圧を固定したときの電流の時間変化  
温度  $10 \text{ mK}$  において、ゲート入力を室温部でグラウンドにショートし、測定を行った。

我々の測定系の場合、電流の測定を1分間で行い、その間にオフセットチャージによる電流の飛びがないとすると、電流換算ノイズは  $1 \text{ pA}_{pp}$  程度である。この値を用いて、自作した単一電子トランジスタの電荷感度を求めると、ゲート変調の幅が電荷変化  $0.5 e$  に相当するため、変調振幅が  $10 \text{ pA}_{pp}$  のとき  $0.05 e$ 、振幅が  $200 \text{ pA}_{pp}$  のとき  $0.005 e$  の分解能があるといえる。従って、我々の作成したサンプルで、最も大きな振幅  $200 \text{ pA}_{pp}$  が得られたものに対しては  $0.005 e$  の感度が、図6の様に比較的安定して動作したサンプルに対しては、その振幅

10 pA<sub>pp</sub> から 0.05  $e$  の感度が得られている。

結論として、我々のグループで実際に少なくとも 0.05  $e$  の感度を持つ単一電子トランジスタを作成することが出来るようになったと考えている。

## 5. まとめ

以上、これまで行ってきた研究成果は、次のようにまとめられる。

- ・ ドーラン法により、アルミニウム-酸化アルミニウム-アルミニウム構造を持つ微小トンネル接合を作成し、この接合を用いて単一電子トランジスタを作成した。
- ・ 作成した単一電子トランジスタを 10 mK まで冷却し、明瞭なゲート変調を観測することができた。
- ・ 単一電子トランジスタをエレクトロメーターとしてみた場合、ゲート変調による電流変化分の最大値が 0.5  $e$  の電荷変化に相当するため、素子によりばらつきはあるが、電荷感度で少なくとも 0.05  $e$  程度のエレクトロメーターを作成することが出来た。

今後は、今まで培ってきた技術をさらに発展させ、単一電子ポンプによる量子化電流の実現をめざし、研究を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) 福島 章雄, 岩佐 章夫, 佐藤 昭, 遠藤 忠; 電子技術総合研究所 彙報, **63**, No.6, 11, (1999).
- 2) G. J. Dolan; Appl. Phys. Lett., **31**, 337, (1977).
- 3) 岩佐 章夫, 福島 章雄, 佐藤 昭, 坂本 泰彦; H9 電気学会全国大会論文集, **1**, 41, (1997).
- 4) T. M. Eiles; Ph. D. Thesis, University of Colorado, Chap.3 (1993).

## 関連ラボ

電子計測第4ラボ

( Electronic Metrology Lab. )

## 研究項目及び研究期間

単一電子トンネル効果を用いた量子電流標準の研究  
(平成11年度～14年度)