

平成21年 5月 20日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19710118  
 研究課題名（和文）バリアメタルの陽極酸化過程を用いた位置制御室温動作単電子トランジスタの作製  
 研究課題名（英文）A position-controlled single electron transistor using anodization process of a barrier metal  
 研究代表者  
 木村 康男（KIMURA YASUO）  
 東北大学・電気通信研究所・助教  
 研究者番号：40312673

## 研究成果の概要：

アルミニウム細線の陽極酸化過程に及ぼす細線の断面構造の影響を調べた。その結果、アルミニウム細線のアスペクト比が陽極酸化過程に大きな影響を与えており、そのアスペクト比によって陽極酸化過程を制御することが可能であることがわかった。また、その制御された陽極酸化過程を利用して単電子トランジスタを作製し、それが室温で動作することを確かめた。本研究で提案するハイブリッドプロセスは室温動作可能な SET を作製するための有力なプロセスであることを強く示唆している。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

研究分野：ナノ・マイクロ科学

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノデバイス

キーワード：①単電子 ②自己組織化 ③陽極酸化 ④ナノチューブ ⑤ナノドット

## 1. 研究開始当初の背景

現在、半導体微細加工技術の進展により、数十 nm のゲート長を有する MOSFET が量産されるようになってきている。しかしながら、今後、微細加工技術のコストや限界などにより、ムーアの法則の破綻が予想されている。一方で、さらなる微細化を推し進めることにより量子的な現象が現れ始めると考えられている。単電子トランジスタ (SET) は、この量子効果を積極的に電子デバイスへ応用するものであり、電子1つ1つを操る究極の次世代トランジスタとして注目されている。

SET はナノギャップ電極 (ソース、ドレイン) とその間のナノドット、及びゲート電極からなる。室温で SET が動作するためには、ナノドットの大きさを数 nm 程度以下で作製しなければならない。このような微細構造をトップダウンプロセスである現在の半導体微細加工技術のみで作製するのは困難である。また、自己組織化現象などのボトムアッププロセスのみで特性の均一な電子デバイスを作製することは困難である。したがって、室温動作 SET を作製するためには、トップダウンプロセスと自己組織的にナノ構造を作

製するボトムアッププロセスとを組み合わせ合わせた新しい微細加工技術の開発が急務である。そこで、本研究では、ボトムアッププロセスとしてバリア金属の陽極酸化過程を用い、この技術とフォトリソグラフィ技術とを融合させることにより、位置制御された陽極酸化による室温動作 SET の作製を行う。

## 2. 研究の目的

Al をはじめとするバリア金属の陽極酸化過程は、ナノ構造作製手法の有力な方法の1つである。Al マイクロ電極をパターンニングし、陽極酸化される領域を数  $\mu\text{m}$  程度の微細領域に制限することにより実現する。Por- $\text{Al}_2\text{O}_3$  によって区切られた左右の Al 電極がそれぞれソース・ドレイン電極となり、その電極間に形成した Al ナノドットがクーロン島となる。これにより、位置制御された室温動作 SET が作製される。これを実現するために、陽極酸化前の Al 電極の構造最適化を行う。特に、Al 細線の断面形状の影響について調べ、局所領域における陽極酸化過程を明らかにし、それを用いて室温動作する SET を作製する。また、他のバリア金属の陽極酸化についても試みる。近年になって Ti の陽極酸化によりポラス酸化チタン (por-TiO<sub>2</sub>) が得られることがわかってきている。

## 3. 研究の方法

### 3.1 Al 細線の陽極酸化過程の観察

Al 細線の陽極酸化過程は、その断面形状に大きな影響を受けると考えられる。そこで、エッチング時間により線幅を変化させたり、膜厚を変化させたりした Al 細線を用意し、

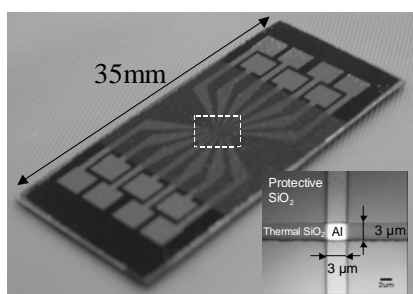


図 1 形成した Al マイクロ電極

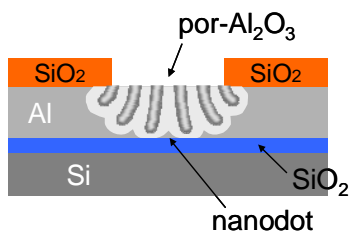


図 2 パターンニングされたアルミニウム電極の陽極酸化による por- $\text{Al}_2\text{O}_3$  及び Al ナノドットの形成

それを陽極酸化し、その断面構造を電界放出型電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いて観察した。ただし、陽極酸化は、0.3M シュウ酸中、印加電圧 40V で行った。

### 3.2 陽極酸化による SET の作製

ソース、ドレイン電極及びナノドットを n 型 Si (100) 基板上に作製し、Si 基板自体をゲート電極とした SET を作製した。250 nm の酸化膜を形成した Si 基板上に、Al を蒸着し、その Al 膜をフォトリソグラフィによってパターンニングし、幅 3  $\mu\text{m}$  の電極を形成する。次に  $\text{SiO}_2$  保護膜を形成し Al マイクロ電極が  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$  露出するようにリフトオフプロセスを用いて窓を開ける (図 1 挿入図参照)。図 1 にプロセス後のサンプルを示す。その露出部を図 2 に示すように 1.7wt% 硫酸を用いて陽極酸化することでナノドットの位置を制御し SET を作製した。

## 4. 研究成果

### 4.1 Al マイクロワイヤの陽極酸化過程

様々な断面構造を持つ Al マイクロワイヤを陽極酸化し FE-SEM を用いて観察した結果を図 3 に示す。図 3(a) のように断面が三角形の時には陽極酸化が側面から進み Al マイクロ電極が細線化される。図 3(c) のような平らな台形型の断面の時には陽極酸化が側面からだけでなく上面からも進み Al マイクロ電極が二分される。このときには側面から成長したポラスアルミナと上面から成長したポラスアルミナが角の所でぶつかり合い、角にストレスの集中が起こる。このストレスの影響により角の部分における酸素イオンやアルミの拡散が抑制されポラスアルミナの成長が抑制される。そのため、Al マイクロ電極が二分される。図 3(b) の時には角におけるストレスが構造全体にかかるために均一にポラスアルミナが成長する。この図 3(b) のような断面構造の時には図 2 のように基板上にナノドットが形成できると考えられるので、このような断面を持つ SET を作製し室温における動作を試みた。

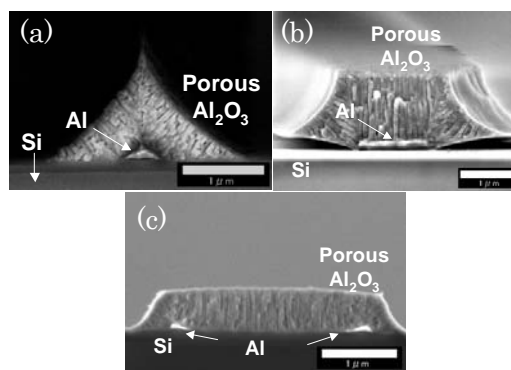


図 3 Al マイクロ電極陽極酸化時の断面像

#### 4.2 SETの電気的特性の評価

図4は図3(b)のような断面を持つSETの室温における電気的特性である。SETの $I_D-V_D$ 特性は階段状の特性を示すことが知られ、また、 $I_D-V_G$ 特性は周期的に振動する特性を示すことが知られている。図4(a)に示す $I_D-V_D$ 特性は階段状の特性を示し、 $I_D-V_G$ 特性は図4(b)のような振動する特性を示し、室温でSETとして動作しているのが確認できた。図4の振動の周期や階段のステップ幅からゲート容量と電極とドット間の容量を見積もることが出来る。これによるとゲート容量は $3.2 \times 10^{-19}$  Fであり電極・ドット間容量は $7.0 \times 10^{-20}$  Fとなった。この値から形成されている量子ドットの大きさを静電磁界シミュレーションを用いて見積もってみる。ポーラスアルミナは六回対称に孔が開くことから形成されるナノドットは正四面体であると考えられる。すると、およそ一辺が1.5 nmの正三角形を一面とする正四面体であり、電極量子ドット間の距離が29 nmとなる。1.7 wt%硫酸を用いると50 nm周期にポーラスアルミナの孔が形成されることから基板にはナノドットが29 nm間隔に形成される。このことにより本研究で作製しているSETは基板上に形成されるナノドットの一つ用いて量子ドットとしていたことがわかった。

フォトリソグラフィ技術及び陽極酸化過程を組み合わせたハイブリッドプロセスを用いた最適化とその最適化に基づくSETの作製を行った。その結果、Alマイクロワイヤの陽極酸化過程は断面構造により大きく依存しており、ポーラスアルミナ成長時のストレ

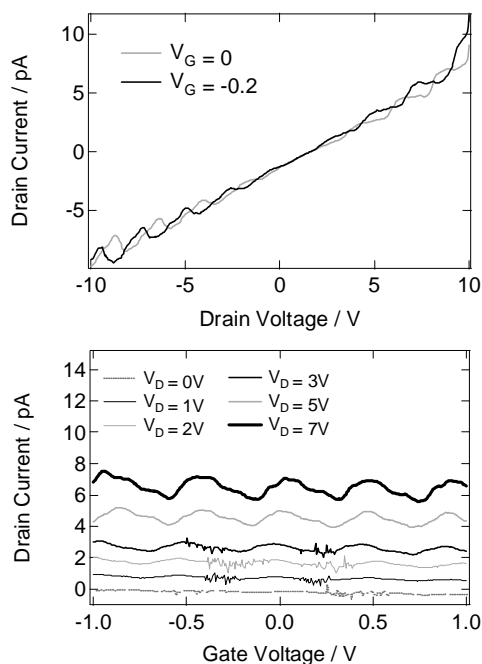


図4 室温におけるSETの電気的特性(a)  $I_D-V_D$ 特性(b)  $I_D-V_G$ 特性

スの影響を強く受けていると考えられる。断面構造を制御することによりAlマイクロワイヤの中心付近では垂直方向に均一にポーラスアルミナが成長した。このような、断面構造を持つSETを作製した結果、室温においてSETとして動作することが確認された。これは、本研究で提案するハイブリッドプロセスは室温動作可能なSETを作製するための有力なプロセスであることを強く示唆している。

#### 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 3件)

- ① K. Ishibashi, Y. Kimura, and M. Niwano, "An extensively valid and stable method for derivation of all parameters of a solar cell from a single current voltage characteristic", *J. Appl. Phys.* **103** (2008) 094507-1-094507-6. (査読有)
- ② K. Ishibashi, R. Yamaguchi, Y. Kimura and M. Niwano, "Fabrication of Titanium Oxide Nanotubes by Rapid and Homogeneous Anodization in a Mixture of Perchloric Acid and Ethanol", *J. Electrochem. Soc.* **155** (2008) K10-K14. (査読有)
- ③ 木村康男、庭野道夫, "陽極酸化により作製したアルミニウムナノドットからのクーロン階段の室温観測", 電子情報通信学会信学技報 107 (2007) 15-19. (招待、査読無)

[学会発表] (計 12件)

- ① T. Muto, Y. Kimura, and M. Niwano, "The Formation Mechanism of Aluminum Nanodots by Inhomogeneous Anodization as a Self-Alignment Technique for a Room-Temperature Operating Single-Electron Transistor", The 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Waseda, Japan, Nov. 11 (2008). (Invited)
- ② N. Shimakura, Y. Kimura, and M. Niwano, "Monte Carlo Simulation of Porous Silicon Formation", The 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Waseda, Japan, Nov. 10 (2008).
- ③ Y. Kimura, and M. Niwano, "In-Situ Infrared Spectroscopic Study of Electrochemical Etching Processes at Si Surfaces", Pacific rim meeting on

- electrochemical and solid state science, 214th ECS meeting, Honolulu, USA, Oct. 14, (2008).
- ④ Y. Kimura, T. Muto, N. Shimakura, and M. Niwano, “Inhomogeneous anodization of aluminum for nanofabrication”, Pacific rim meeting on electrochemical and solid state science, 214th ECS meeting, Honolulu, USA, Oct. 14, (2008).
- ⑤ N. Shimakura, Y. Kimura, and M. Niwano, “In situ observation of electrochemical etching process using infrared spectroscopy and its Monte Carlo etching simulation”, Pacific rim meeting on electrochemical and solid state science, 214th ECS meeting, Honolulu, USA, Oct. 14, (2008).
- ⑥ T. Muto, Y. Kimura, M. Niwano, “Anodization process of aluminum microelectrode for a single-electron transistor operating at room temperature”, 66th Device Research Conference, Santa Barbara, USA, Jun. 26 (2008).
- ⑦ Y. Kimura, K. Ishibashi, M. Niwano, “Fabrication of titanium oxide nanotubes through anodization of titanium in a mixture of perchloric acid and ethanol”, The 4th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology(CGCT-4), Sendai, Japan, May 24 (2008).
- ⑧ Yasuo Kimura, Ken-ichi Ishibashi, and Michio Niwano, “An extensively valid and stable method for determination of all parameters of a solar cell from a single I-V characteristic”, 213th ECS Meeting, Phoenix, USA, May 20 (2008).
- ⑨ Y. Kimura, T. Muto, R. Yamaguchi, K. Ishibashi, K. Itaya, M. Niwano, “Selforganization of Nanodots and Nanogaps by Anodization and Room-temperature Observation of a Giant Coulomb Blockade Voltage”, 2007 MRS Fall Meeting, Boston, USA, Nov. 28 (2007).
- ⑩ 木村康男、庭野道夫, “陽極酸化により作製したアルミニウムナノドットからのクーロン階段の室温観測”, 電子情報通信学会研究会電子部品・材料研究会(CPM8), 米沢, 8月9日(2007).(招待講演)
- ⑪ Y. Kimura, K. Itoh, T. Mutoh, R. Yamaguchi, K. Ishibashi, A. Hirano, K. Itaya, and M. Niwano, “Room-temperature observation of

Coulomb staircases in aluminum nanodots fabricated by anodization of an aluminum microelectrode”, International Conference on Nanoscience and Technology (ChinaNano2007), Beijing, China, Jun. 7 (2007).

- ⑫ K. Ishibashi, T. Mutoh, R. Yamaguchi, Y. Kimura and M. Niwano, “Fabrication of anodic titanium nanotubes with high growth rate and their application to a dye-sensitized solar cell.”, 211th ECS Meeting, Chicago, USA, May 7 (2007).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 評価方法、評価装置、評価プログラム、太陽電池解析評価方法

発明者: 木村康男、庭野道夫、石橋健一

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-5559

出願年月日: 平成 20 年 1 月 15 日

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木村 康男 (KIMURA YASUO)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 40312673