

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310080

研究課題名(和文) 原子スイッチの多機能化に関する研究

研究課題名(英文) Research on Functional Development of Atomic Switches

研究代表者

長谷川 剛 (HASEGAWA TSUYOSHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノエレクトロニクス研究拠点・MANA 主任研究者

研究者番号：50354345

研究成果の概要(和文)：固体電気化学反応を用いて電極間での金属原子架橋の形成と消滅を制御して動作する原子スイッチの多機能化を目指した。その結果、一定の入力信号が到達するまでは素子内部に入力情報を蓄え、一定の入力信号が到達して初めて出力動作をする学習機能や、電源オフと同時に初期状態に戻る揮発性動作と、電源オフでも状態を保持する不揮発性動作の選択動作の開発に成功した。これらは脳型コンピューターなどの開発への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Research on functional development of atomic switches, in which formation and annihilation of a metal atom bridge between two electrodes is controlled using solid electrochemical reaction, was carried out. One of the developed functions is a learning ability that stores information without any change in the output signals until a certain number of input signals comes, then it turns the atomic switch on when the certain number of input signals comes. Volatile/nonvolatile selective operation has been also developed, in which the volatile operation loses the information with cut-off of the power supply while the nonvolatile operation keeps the information even after the cut-off of the power supply. These new functions are expected to contribute to the development of new types of computers such as neural systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：ナノサイエンスおよびナノデバイス

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード：ナノ電子デバイス、原子スイッチ、学習機能

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 集積回路の大規模化に伴い、集積回路を構成する素子には高い歩留まり率が要求され、開発・製造コストの増大を招いていた。さらなる大規模集積化は、開発・製造コスト

を著しく増大させる危険性があり、それを回避するための回路構造やシステムの研究開発が盛んに行われていた。これらを実現する新たな素子構造の開発についても、Beyond CMOS 技術として国際半導体ロードマップで

大きく取り上げられるなど、実用化に向けた研究・開発の加速が求められていた。

(2) 1998年、米国の研究者らによって、製造段階における物理的エラーが多数あってもそれを回避して演算回路を構築できる欠陥容認型アーキテクチャーを実現するクロスバー型演算回路が提案されていた。クロスバー構造は、MRAMなどの次世代メモリー技術としても期待されており、演算機能とメモリー機能を同一のプラットフォーム上に搭載することも可能にするなど、半導体トランジスタに依らないコンピューター回路の研究も進展を見せていた。

(3) 本研究代表者は、固体電気化学反応を利用してナノ電極間における金属原子架橋の形成と消滅を制御して動作する新しいナノデバイス「原子スイッチ」を開発していた。原子スイッチには、素子サイズがナノスケールでありながらスイッチオン時の抵抗が小さい、不揮発性であるなど、半導体トランジスタには無い特徴がある。原子スイッチは構造が簡単であり、一般的な微細加工技術で容易に作製でき、CMOSデバイスとの混載による1キロビット不揮発性メモリーチップの試作にも成功していた。原子スイッチは、固体電解質ナノワイヤーと金属ナノワイヤーの交点に容易に作製できることから、新しいコンピューター・アーキテクチャーを実現する回路であるクロスバー構造の構築にも適したナノデバイスであると考えられていた。

## 2. 研究の目的

(1) 従来のクロスバー型演算回路の研究は、分子スイッチを用いたものが中心であった。異なる機能の分子を交点に配置することで、より多様な演算回路の構築が可能になる。しかし、異なる分子の利用は集積化をさらに難しくする。一方、原子スイッチはその組成や構造を制御することで多様な機能を発現できる可能性があり、しかも一般的な微細加工技術で容易に作製できることから、高機能な演算を実現するクロスバー型回路の構築に適している。

(2) 原子スイッチは、固体電解質電極の材料と組成比、さらにはその構造を制御することで、動作電圧の制御や不揮発性・揮発性の選択ができる可能性がある。従来の原子スイッチは不揮発性であり、固体電解質電極内に金属層(図1(a)で黄色で示した部分)を設けている。この金属層から固体電解質層に金属イオンが供給されることで、固体電解質層のイオン濃度が一定に保たれ、電源オフ後も金属原子架橋が安定に存在する。従ってこの金属層を無くせば、金属原子架橋

の形成によって固体電解質層のイオン濃度が減少し、電源オフと同時に、そのイオン濃度の減少を補償するために金属原子架橋が消滅、固体電解質層へ固溶するものと期待される(揮発性原子スイッチ)。原子スイッチの3端子構造化も可能であると考えられ、本研究では、高機能クロスバー型演算回路の構築を目指して、多様な機能を有するこれら原子スイッチの開発と動作実証を行うことを目標とした。

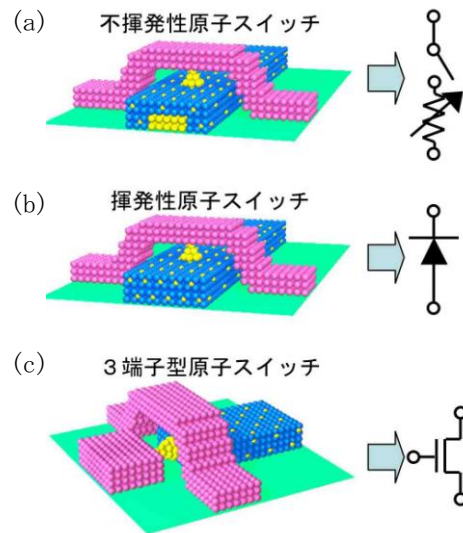


図1 多様な原子スイッチ

## 3. 研究の方法

(1) 不揮発性・揮発性の選択動作を実現するには、固体電解質電極のサイズ、材料、組成比をパラメータとして素子構造を試作、そのスイッチング特性評価を行う必要がある。オン状態を実現する金属原子架橋は10個程度の原子で構成されていると考えられることから、不揮発性・揮発性の分岐点は、固体電解質電極サイズにして数十ナノメートル程度の領域にあると予測される。このため、ナノスケールオーダーの固体電解質電極を、サイズを変えながら再現性良く作製することがキーポイントとなる。本研究では、ナノ球を用いたリソグラフィ法を用いてこれを実現、スイッチング特性の固体電解質電極サイズ、材料、組成比依存性を調べて、不揮発性・揮発性の選択を可能とする。

(2) スイッチング現象のメカニズム解明、ならびにそれに基づく機能開発では、独自に開発した装置である走査型電子顕微鏡を搭載した多探針走査型プローブ顕微鏡(SEM-SPMs)を用いて、スイッチング動作時における電流・電圧特性と金属原子架橋の形成過程の同時観察を行う。これにより、金属原子(イオン)の析出・固溶反応に係わる

活性化エネルギーなどの物理・化学パラメータの測定を行い、そのモデル化から、固体電気化学反応メカニズムをナノスケールで明らかにしていく。これらの結果に基づき、新しい3端子型原子スイッチ構造の開発など、高機能原子スイッチの開発を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 揮発性/不揮発性の選択動作に関する研究では、ナノ球を用いたリソグラフィ法を用いて、異なるサイズの固体電解質電極を作製し、電子線照射による金属突起の成長を観察した。その結果、金属突起の成長が観察された固体電解質電極は一定以上のサイズを有していることが分かった。図2に観察結果の一例を示す。5つの硫化銀( $\text{Ag}_2\text{S}$ )粒子が観察されているが、このうちサイズの大きな2つの粒子からのみ、電子線照射による銀(Ag)の析出が認められる。

異なるサイズの硫化銀粒子を作製して電極として用い、原子スイッチの動作特性を評価した。その結果、硫化銀粒子(電極)のサイズが小さい場合には揮発性動作が、硫化銀粒子(電極)のサイズが大きい場合には不揮発性動作が確認できた。すなわち、電極サイズの制御によって揮発性/不揮発性の選択動作が可能であることが分かった。図3に選択動作の一例を示す。

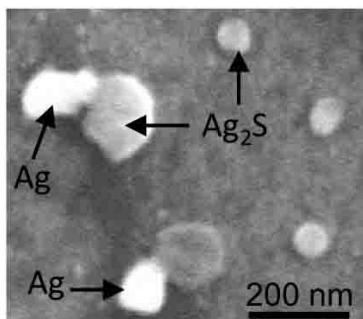


図2 硫化銀粒子からの銀突起形成

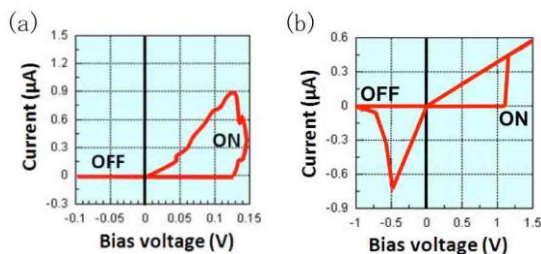


図3 (a)揮発性動作, (b)不揮発性動作

(2) 3端子構造開発への応用では、揮発性・不揮発性動作の起源である固体電解質電

極サイズの制御が重要であるという上記知見を基に、金属原子の供給源であるゲート電極のサイズを制御することで、ソース・ドレイン電極間のみが供給された金属原子によって電氣的に接続され、ゲート電極は絶縁されたままとなる理想的な3端子動作を実現することに成功した。

(3) スイッチング現象のメカニズム解明では、固体電解質電極として硫化銀を、対向電極として白金を用いた。走査トンネル顕微鏡を用いて原子スイッチ構造を構成し、そのスイッチング時間の温度依存性とスイッチング電圧依存性の評価を行った。その結果、スイッチング電圧依存性では、0.2Vを境に、低電圧領域と高電圧領域とで電圧依存性に明瞭な差異が認められた。さらに、温度依存性測定により、低電圧領域における活性化エネルギーが約0.5eVであるのに対して、高電圧領域では約1eVとなることが分かった。モデル解析の結果、低電圧領域では、硫化銀表面における電気化学反応(銀イオン+電子→銀原子)が律速過程となっているのに対して、高電圧領域では、電気化学反応速度が速くなるために、反応場(硫化銀表面)への銀イオンの供給が追いつかず、硫化銀内部における銀イオンの拡散現象も律速過程となっていることが判明した。図4に、スイッチング時間の温度依存性測定結果を示す。

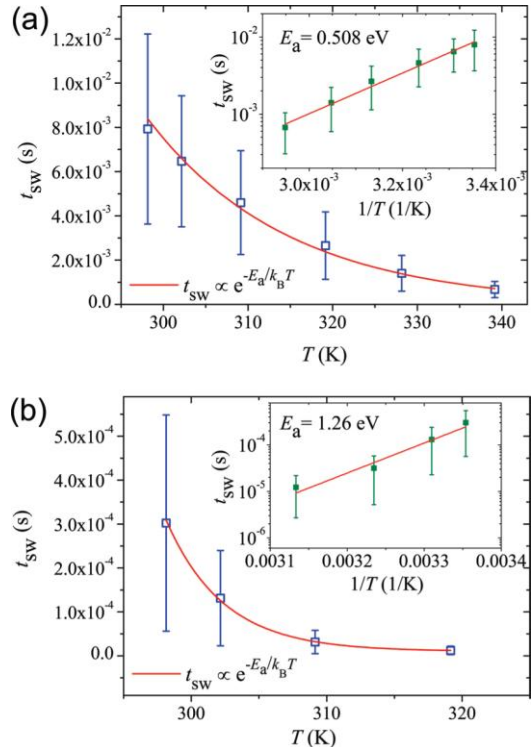


図4 スイッチング時間の温度依存性

(a)低電圧領域、(b)高電圧領域

(4) メカニズムの解明に基づく新機能開発では、固体電解質表面における電気化学反応速度と同結晶内部におけるイオン拡散速度の最適化による探索研究を行った。その結果、適切な強度の入力信号を用いることで、一定の入力信号が到達するまでは外部出力を変化させることなく固体電解質電極内部に入力情報を蓄えられること、一定の入力信号が到達して初めてオンオフ動作させうることを見いだした。この動作はいわゆる学習機能に対応しており、原子スイッチが脳型回路素子に要求される高い機能をも有することが本研究によって明らかになった。図5に、動作結果の一例を示す。

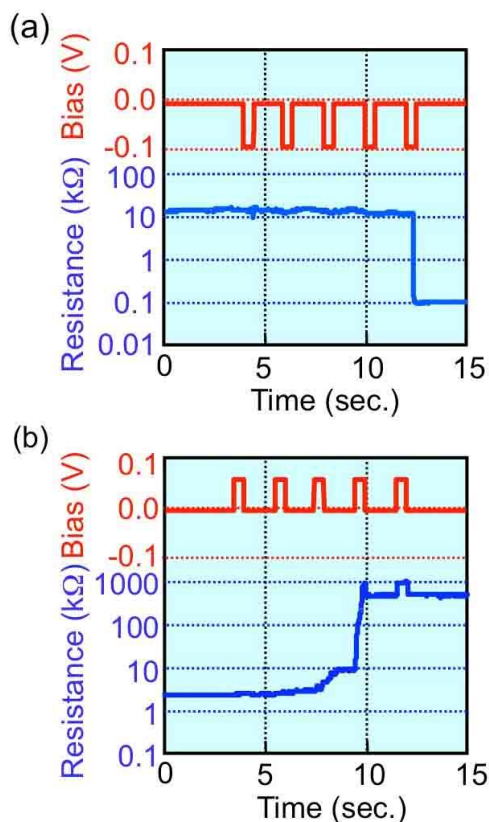


図5 学習機能に基づく動作

(a)スイッチオン、(b)スイッチオフ

以上(1)から(4)に述べた新しい機能やその特性は、半導体トランジスタなどの従来デバイスには無く、原子スイッチを用いることで、固体素子ですべてが構成された脳型回路の研究開発や非ノイマン型コンピューターの開発などが可能になるものと期待できる。

## 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 Tsuyoshi Hasegawa, Alpana Nayak, Takeo Ohno, Kazuya Terabe, Tohru Tsuruoka, James K. Gimzewski, Masakazu Aono, 'Memristive operations demonstrated by gap-type atomic switches', Applied Physics A, 査読有, Vol. 102, 2011, pp. 811-815.

② Tsuyoshi Hasegawa, Kazuya Terabe, Toshitsugu Sakamoto, Masakazu Aono, 'Nanoionics switching devices: "Atomic switches"', MRS Bulletin, 査読有, vol. 34, No. 12, 2009, pp. 929-934.

[学会発表] (計12件)

① 長谷川剛, Nanoionics Switching Device: "Atomic Switches", Materials Science & Technology 2010 Conference and Exhibition, 平成22年10月19日, George R. Brown Convention Center (Houston, 米国).

② 長谷川剛, Atomic switches and their applications, Advances in Nonvolatile Memory Materials and Devices, 平成22年7月15日, Kempinski Hotel Suzhou (Suzhou, China).

③ 長谷川剛, Novel Nanoionic Devices, IMRE Workshop on Atom Technology and Its Applications, IMRE Workshop on Atom Technology and Its Applications, 平成22年6月10日, IMRE, Singapore (Singapore).

④ 長谷川剛, Electrochemically-controlled atomic switch for beyond CMOS, 先進セラミックス国際会議 STAC 3, 平成21年6月16日, メルパルク横浜 (横浜市).

⑤ 長谷川剛, Memristive switching achieved by an atomic switch, AMN4 Conference, 平成21年2月10日, オタゴ大学 (ニュージーランド).

[その他]

ホームページ等

[http://www.nims.go.jp/atom\\_ele\\_gr/index.html](http://www.nims.go.jp/atom_ele_gr/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 剛 (HASEGAWA TSUYOSHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点・MANA 主任研究者

研究者番号: 50354345

### (2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者  
なし

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書