量子化伝導原子スイッチの開発

寺 部 一 弥* 長谷川 剛**
中 山 知 信** 青 野 正 和***

1. は じ め に

我々の身の回りの情報通信機器には、半導体材料の特性を利用した電界効果トランジスタなどの電子デバイスが多く使われており、これら機器の進歩は半導体デバイスの性能に負うところが大きい。半導体デバイスの性能は、微細化と集積化の技術開発に支えられて今日もなお目覚ましい進展をしているが、いずれその進展が鈍化することは明らかである。今後も情報通信機器の進歩が続き、次世代の高度情報化社会へと発展するためには、新しい原理で動作するナノ電子デバイスの開発が熱望されている。そのため、世界中で新しいナノ電子デバイスの開発競争が繰り広げられている。新しい原理で動作するナノ電子デバイスの1つとして、我々は「原子スイッチ」⁽¹⁾⁽²⁾を開発した。我々の身の回りにおける主要な情報通信機器であるコンピューターは巨大な数のスイッチの集合体であり、これまでのスイッチでは半導体デバイスを用いて電子の移動を制御することによってスイッチ動作が行われてきた。これに対して、新しい原理の原子スイッチでは原子の移動を制御することによってスイッチ動作を行わせる。原子スイッチは、僅か数ナノメートル程度の原子移動で動作するため、電子より大きく重たい原子を利用するにもかかわらず従来の半導体デバイスのスイッチ機能や性能を凌駕する可能性を秘めている。

原子スイッチという言葉は、1991年に IBM 社の Eigler らによって用いられた⁽³⁾。彼らは、走査型トンネル顕微鏡 (STM: Scanning Tunneling Microscopy) を用いて 4 K に冷却した試料表面と STM 探針間でキセノン原子の移動制御を実現させた。この時、キセノン原子の位置、すなわちキセノ

ン原子が探針側にあるか試料側にあるかによって試料と探針間の電気抵抗(トンネル抵抗)が変化することを見いだした。探針と試料間でのキセノン原子の移動は可逆的であり、その制御は試料と探針間で適切な極性と大きさの電圧を加えることによって行う。彼らは、このような原子の移動、すなわち原子スケールでの構造変化によって生じる電気抵抗変化を利用したスイッチを原子スイッチと呼んだ。その後、別のタイプの原子スイッチが1995年に同じ IBM 社の Smith によって報告された⁽⁴⁾。彼らは、先鋭な STM 金属探針を試料表面に原子スケールで点接触させ、この点接触によって構築される金属原子架橋の構造変化によって生じる電気抵抗変化を利用して原子スイッチを実現させた。点接触によって構築される金属原子架橋の構造は、STM 探針に取り付けたピエゾ素子に加える電圧を制御して探針位置を精密に移動させることによって可逆的に変化させる。さらに、金属原子架橋の幅が金属のフェルミ波長程度であるために架橋のコンダクタンスは量子化されて、その値は架橋の構造に依存して $2e^2/h$ のほぼ整数倍になることが示された。ここで、 h はプランク定数、 e は電子の電荷である。つまり、金属点接触による原子スイッチを利用して、量子化コンダクタンス間のスイッチ動作を実証した。我々が開発した原子スイッチ⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、別のタイプの原子スイッチである。この原子スイッチは、イオン-電子混合伝導体の固体電気化学的性質を利用することによって動作する。それまでの原子スイッチは、極低温環境や大がかりな探針移動手段によって金属探針を適切な位置に移動させることが必要であり、そのため直ちに実用的なデバイス開発に結びつくものではなかった。一方、我々が開発した原子スイッチは、室温で対向する混合伝導体電極と金属電極間に加える電圧制御だけでスイッチ動作を行うことができるという優

* 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所主幹研究員(〒305-0044 つくば市並木1-1)

** 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所アシリエクトー

*** 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所所長

Development of Quantized Conductance Atomic Switch; Kazuya Terabe, Tsuyoshi Hasegawa, Tomonobu Nakayama, Masakazu Aono (Nanomaterials Laboratories, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: nano-electronic device, atomic switch, quantized conductance, mixed conductor, nano-ionics, logic gate, solid electrochemical reaction

2005年5月23日受理

れた特徴があるため、デバイス化が容易である。

本稿では、我々が開発した混合伝導体を利用した原子スイッチを紹介するとともに、このスイッチの研究開発の足取りを通して、マテリアルの基礎研究が新しいデバイス開発にとっていかに重要であったかを示す。

2. 混合伝導体を利用した原子スイッチの原理

この原子スイッチは、電子とともにイオンも電気伝導に寄与する物質、つまり混合伝導体を用いて、その固体電気化学的な性質をナノスケールで制御することによって実現される⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。これまで、硫化銀(Ag_2S)および硫化銅(Cu_2S)の混合伝導体結晶を原子スイッチの材料として用いてきた。ここでは、典型的な例として、 Ag_2S 結晶を用いた原子スイッチについて説明する。 Ag_2S 結晶の固体電気化学的な性質を図1に示す。 Ag_2S 結晶はイオン結晶の性質を持っており、結晶内の銀の陽イオンは硫黄の陰イオンが作る格子の間をあたかも電解質溶液中のイオンのごとく動き回ることができる。この Ag_2S 結晶の両端に銀電極を取り付けて電圧を加えると、負電圧を加えた銀電極と Ag_2S 結晶との界面では、 Ag_2S 内の銀イオンが電極から供給された電子によって還元されて銀原子が析出する。一方、正電圧を加えた銀電極と Ag_2S との界面では、電極を構成する銀原子が電子の放出により銀イオンに酸化されて Ag_2S 内に固溶する。この現象は、金属イオンを含む電解質溶液中において電圧を加えた金属電極上で起こる金属原子の析出と溶解の現象と同じ電気化学反応によるものであり、固体電気化学反応と呼ばれる。原子スイッチは、この固体電気化学反応によって起こる金属原子の析出と固溶の現象を、トンネル電子を利用して局所的に制御することによって実現される。従来の半導体材料の特性を利用した電子デバイスはエレクトロニクス技術を基盤として開発されてきたが、混合伝導体材料を利用した原子スイッチはナノスケール、更には原子スケールでのエレクトロニクス技術とともに固体イオニクス技術⁽⁸⁾を基盤として開発される。そのため、この原子スイッチは、新しい概念のナノイオニクスデバイスとも言える。

原子スイッチの原理図を図2に示す。銀電極の上に Ag_2S 結晶膜が積層されており、この Ag_2S 層と銀電極の間で銀の移動($\text{Ag}_{(\text{電極})} \rightleftharpoons \text{Ag}_{(\text{Ag}_2\text{S結晶})}^+ + e^-$)が可能であるため、銀電極は可逆電極として作用する。一方、 Ag_2S 結晶層と白金電極(不活性金属電極)の間にはギャップが設けられている。このギャップの大きさは、トンネル電流が流れるように1nm程度である。この白金電極に適切な大きさの負の電圧を加えると、白金電極からのトンネル電子により Ag_2S 結晶内の銀イオンが還元されて、 Ag_2S 結晶の表面に銀原子が生成する。幾つかの銀原子の生成によって Ag_2S 結晶と電極との間で架橋が構築されてスイッチオン状態が得られる。また、加える電圧の極性を正の電圧に逆転すると、架橋を形成する銀原子がイオン化されて Ag_2S 内に再固溶することによって架橋が消滅してスイッチオフ状態が得られる。そのため、原子

図1 混合伝導体 Ag_2S の固体電気化学的性質を示す概略図。

図2 混合伝導体を利用した原子スイッチの原理。

図3 混合伝導体をSTM探針して用いた“ナノペン”の概念図⁽¹⁰⁾。

スイッチは、究極的に微小な機械スイッチと言える。

3. 研究開発の足取り

原子スイッチの研究開発は、トンネル電子を利用すれば混合伝導体の固体電気化学反応をナノスケールの局所領域で可逆的に制御できることを見出したこと⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾から始まる。当時、我々は、図3に示すように混合伝導体をSTMの探針材料に用いて、探針と基板との間に適切な電圧を加えることによって、探針先端から金属原子を連続的に基板上へ付与して

図4 可逆的な銀クラスターの成長と収縮⁽⁹⁾.

金属細線を構築することを目的とする研究を行っていた。このSTM探針は言わば“ナノペン”であり、“インク”は混合伝導体中を移動する金属イオンである。この究極的に微細なナノペンを使えば、試料表面上に任意パターンの金属原子細線を描画することができると考えた。様々な混合伝導体単結晶を育成して、それらをSTM探針の材料として試みた結果、 Ag_2S 結晶を探針に用いることにより銀原子を基板上に連続的に付与することが可能であることがわかった⁽¹⁰⁾。さらに、この実験の中で、副産物的に非常に興味深い混合伝導体のナノ現象を見つけた。 Ag_2S 探針と基板の間に加える電圧の極性と大きさおよびトンネル電流の大きさを適切に選ぶと、探針の先端において銀原子クラスターを可逆的に成長させたり消滅させたりすることができることがわかった。この実験結果を図4に示す。ここでは、STMのフィードバック機能を用いて Ag_2S 探針と基板との間のトンネル電流が常に一定に保たれている。すなわち、銀クラスターが探針先端に成長した場合でも、探針の位置を移動することによって探針と基板間のギャップが常にほぼ一定(1 nm程度)に保たれている。そのため、銀クラスターの生成と消滅の過程は、この探針の移動量をモニターすることによって観測することができる。実験では、加える電圧とトンネル電流を1から4の条件で変化させながら、探針の移動量をモニターした。 V_s は基板に加えた電圧であり、 I_t は探針と基板との間で流れるトンネル電流を示す。はじめ、基板に負の電圧(-2 V)を加えた場合、トンネル電流が小さい条件(0.05 nA)では銀クラスターは成長しないが、トンネル電流を大きく(1.35 nA)すると探針の先端に銀クラスターが成長する。そして、再びトンネル電流を元の小さい値(0.05 nA)に戻すと銀クラスターの成長は止まる。次に、基板に加える電圧の大きさはそのまま極性だけを正に切り変える。トンネル電流が小さい条件(0.05 nA)では生成した銀クラスターは何も変化しないが、トンネル電流を大きく(0.35 nA)すると銀クラスターは収縮してついには消滅する。1から4の条件の電圧とトンネル電

図5 Ag_2S 探針の先端に成長した銀クラスター⁽⁹⁾.

図6 固体電気化学反応による Ag_2S 探針先での銀クラスターの成長：(a)と収縮のメカニズム：(b)⁽⁹⁾.

流を繰り返して加えることによって、銀クラスターの生成と消滅を可逆的に繰り返すことも可能である。実験後、成長した銀クラスターを走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)によって観察した写真を図5に示す。この銀突起は、SEMの分解能で観察できるように、 $V_s = -2.0$ V, $I_t = 1.35$ nAの条件で2000 s保持しながら、STM探針の移動モニターで長さ約200 nmまで成長させたものである。また、この観察は、電子線の照射による Ag_2S への影響を極力避けるために液体窒素で冷却しながら行った。これらの観察結果により、 Ag_2S 探針の先端で銀クラスターが生成したり、消滅したりすることが確認された。

銀クラスターの生成、消滅の過程は、図6に示すように固体電気化学反応によって説明される⁽⁹⁾。適切な負の電圧(V_s)とトンネル電流(I_t)の条件下では、図6(a)のように基板から流れ込むトンネル電子により銀イオンが還元され、銀原子が Ag_2S 表面に析出する。銀イオンの析出によって、 Ag_2S 内の銀イオン濃度(化学ポテンシャル)が減少するが、これを補うように対向に取り付けた銀板から銀イオンが供給される。そのため、銀板を取り付けていない場合には、電圧を加え続けても銀クラスターの成長は途中で止まってしまい、さらに、電圧を加えるのを止めると銀クラスターは Ag_2S 内に溶け込んでしまう。銀クラスターの成長実験のデータから、トンネル電子は、約 10^5 個中1個の割合で銀イオンと

図7 Ag_2S 探針の先端における銀クラスターの生成・消滅を利用したスイッチ特性⁽⁶⁾。

図8 スイッチ時間と電圧の関係。

結びついて銀原子を還元すると見積もられた。次に、電圧の極性を正に変えて、適切な電圧(V_t)とトンネル電流(I_t)を加えた条件下では、図6(b)に示すように、銀クラスターを構成する銀原子が酸化されて Ag_2S 結晶内に固溶することにより、銀クラスターは収縮してついに消滅する。我々は、この銀イオンとトンネル電子によって生じる局所的な固体電気化学現象を利用すれば原子スケールでのスイッチデバイスの実現が可能であると考えた。そして、次世代のナノ電子デバイスの作製を目指して、原子スイッチの開発研究へと展開した。

図7は、図4と同じ実験配置であるが、探針と基板の間でトンネル電流が流れるまで探針を基板にアプローチした後、STMのフィードバック機能を切断して、探針と基板の位置、すなわち両者のギャップを完全に固定して行った実験結果である。ここでは、正から負の極性の電圧をスイープさせながら、3回繰り返し基板に加えた。スタート時の電気抵抗は、探針と基板間のトンネル抵抗に対応して数百 $\text{k}\Omega$ である(オフ状態)。基板にある一定以上の大きさの負の電圧が加わると、生成する銀原子によって探針と基板が架橋されて電気抵抗が3桁程度減少する(オン状態)。そこから戻って、加える電圧が正の極性に切り替わると、銀原子架橋が次第に収縮して消滅するために、電気抵抗はトンネル抵抗(オフ状態)に戻る。図7に示すように、スイッチのオンとオフに必要な電圧をはっきりと分かれて存在し、典型的なヒステリシスが得られることがわかる。また、オンとオフの状態は、銀原子による架橋の生成から消滅に伴い接触抵抗からトンネル抵抗へと数桁大きい値になるため、閾値以下の電圧を加えてその電流変化から容易に判別することができる。

電子の移動を利用する半導体スイッチと比べて、原子(イオン)の移動を利用する原子スイッチがどのくらいの速度で動作するのか興味のあるところである。それを明らかにするために、スイッチ時間を実際に測定した。図8は、STM装置を用いて、探針と試料間に加えた電圧の大きさとスイッチ時間の関係を調べた実験結果である。この実験では、はじめにトンネル抵抗が $10^6 \Omega$ になるように探針と基板の間隔を調整した後、その探針と基板の位置を固定した。銀原子架橋が生成していないオフ状態において、電圧を加えた時刻から銀クラスターが生成して点接触が構築されてオン状態になるま

での時間を測定した。点接触の構築は、探針と基板間の電気伝導が量子化伝導の基本単位($G_0 = 2e^2/h$)の値になること、すなわち電気抵抗がトンネル抵抗($10^6 \Omega$)から量子化抵抗($1/G_0 = 12.9 \times 10^3 \Omega$)へと変化することによって判断した。この量子化された点接触は、銀クラスターの先端の銀原子1個が基板と接触した状態と考えられる。実験結果から、スイッチに要する時間は、電圧の増加に対して指数関数的に減少することがわかる。このスイッチ時間は、探針と基板間を架橋する銀クラスターの生成と消滅の速度によって決まり、この生成と消滅の速度は銀イオンとトンネル電子による固体電気化学反応の速度に依存する。この固体電気化学反応の速度を決めている因子には、電荷移動の速度と物質移動の速度が考えられる。原子スイッチの場合、銀原子架橋の構築に必要な原子の数は多くても数十個であるため、銀イオンの物質移動の過程が律速段階になるとは考えにくい。そのため、スイッチ時間は Ag_2S 表面で起こる電荷移動の速さに依存すると考えられる。この電荷移動反応の活性化エネルギーは電圧に比例して変化するため、その反応速度は電圧によって指数関数的に増加する。ゆえに、スイッチ時間は電圧に対して指数関数的に減少すると考えられる。活性化エネルギーの変化以外にも、銀クラスターの成長や消滅に伴って探針と基板の間隔が変化するため、その間を流れるトンネル電流が著しく変化する。このトンネル電流の変化も、銀原子の生成速度に影響を及ぼすと考えられる。したがって、電圧とスイッチ時間の関係を理解するためには詳細な実験的、理論的な検討がさらに必要である。また、これまでに、図8の実験結果および周期的パルス電圧を加えた実験によって、1 V以下の電圧で 10^6 Hz までのスイッチ動作を確かめている⁽⁵⁾。我々は、イオン伝導体中を移動するイオンの振動速度が 10^{12} Hz オーダーであること⁽¹¹⁾、および図8のスイッチ時間と電圧の関係や銀クラスターの成長速度に関する実験結果から、原子スイッチが1 V以下の低電圧で少なくとも 10^9 Hz オーダーの速度で動作すると予測している。

4. 実用化に向けて

我々は、STMによる原子スイッチの基礎実験を経て、そ

の実用化を目指した開発を微細加工技術を用いて行っている。図9に、最近開発した微細加工法によって構築した原子スイッチのSEM写真(a)とその手順(b)を示す⁽⁵⁾。ここでは、電子ビーム描画、金属蒸着やリフトオフなどのリソグラフィ技術により、白金電極/銀層/Ag₂S層/銀電極のデバイス構造をシリコンウエハー上に作製する。この時に、Ag₂S層と白金電極の間にある銀層の厚さを1 nm程度にする。ここで、銀電極と白金電極との間で適切な大きさの負の電位を銀電極に加えると、固体電気化学反応によって銀層の銀原子がAg₂S層に固溶して消滅するため、Ag₂S層と白金電極との間で1 nmのトンネルギャップを形成することができる。半導体デバイス作製のための微細加工技術を用いて原子スイッチの作製が可能になったことで、現在の実用化半導体回路に組み込んだスイッチデバイスの開発が可能になってきたと言える。

また、金属架橋の生成と消滅を利用して動作するが、デバイス構造および金属架橋の生成と消滅の過程がやや異なるスイッチも日本電気株式会社との共同研究によって開発した⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。ここでは、混合伝導体として銅イオンと電子が移動するCu₂S結晶を用いた例を示す。このデバイスは、図10に示すように、トンネルギャップがなく、白金・チタン電

図9 微細加工法によって作製した原子スイッチのSEM像：(a)とその手順：(b)⁽⁵⁾。

図10 トンネルギャップのないスイッチ構造⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾(日本電気株との共同研究)。

極/Cu₂S層/銅電極の構造をしている。このスイッチは、電極間のCu₂S結晶層の内部での銅原子架橋の析出と消滅によって動作すると考えている。トンネル電流を利用することにより固体電気化学反応を局所的に生じさせる前述のスイッチと比べると、このタイプのスイッチは多数の銅原子によって太く長い架橋が生成されるが、ナノサイズでデバイスを作製することは可能である。また、このスイッチは、トンネルギャップの構築が不要であるため、少ない微細加工の工程で比較的容易に作製することができるなどの特徴がある。

現在、これらのスイッチを大規模集積回路(LSI: large Scale integration)用の超小型・低抵抗スイッチや不揮発メモリとして用いるための開発研究を進めている。例えば、高性能LSIの短期開発や機能切り替えを可能にするプログラマブル集積回路(IC: integrated circuit)のロジックセルを結ぶためのスイッチとしての応用が期待される。この場合、

図11 原子スイッチを利用した基本論理ゲート⁽⁵⁾、ANDゲート：(a)、ORゲート：(b)、NOTゲート：(c)。

図12 銀ワイヤ1本と白金ワイヤ2本との交点に形成された2つの原子スイッチを用い、その量子化伝導性を利用して16通りの状態を作り出すことができる⁽⁵⁾。

Static Random Access Memory (SRAM) とパストランジスタの層と配線層で構成される従来型の半導体スイッチと比べて、これらのスイッチでは交差する配線層だけで構成することができるため、素子サイズを約 1/30 に微細化することが可能である⁽¹²⁾。また、ON 抵抗が約 1/40 と小さく、消費電力も低いことから、多数のスイッチを IC の中に組み込むことが可能になる。これまでに、低抵抗の 4×4 クロスパースイッチアレーや 10³ ビット容量の不揮発性ランダムアクセスメモリを作製し、その動作を実証している^{(12)–(14)}。

5. 原子スイッチの持つ機能性の探索

原子スイッチは、多様な機能性デバイスの実現の可能性を秘めていることがわかってきた。2 つの原子スイッチを組み合わせてることによって、コンピューターのハードウェアの基礎となる論理演算回路を構築することができる。図 11(a), (b), (c) は、それぞれ AND, OR, NOT の基本論理ゲートの構造とその動作実験の結果を示している。ここでは、入力 1 あるいは入力 2 に高い電圧を加えた状態を論理値 1、電圧を加えない状態 (0 V) を 0 として、出力信号として高い電圧が検知される場合を 1、高い電圧が検出されない場合を 0 とする。入力 1 あるいは入力 2 の電圧によって、それぞれの原子スイッチにおいて銀原子架橋が生成したり、消滅したりする。図 11(a) に示す AND ゲートは、1 本の硫化銀ワイヤーと 2 本の白金ワイヤーにより形成されており、入力 1 と入力 2 の両方に高い電圧に加えた時にだけ出力電圧が検出される。また、2 本の硫化銀ワイヤーと 1 本の白金ワイヤーを用いて形成した OR ゲート (図 11(b)) では、2 つの入力のどちらにも電圧を加えないときのみ、出力において出力電圧が検出されない。NOT ゲート (図 11(c)) では、入力電圧が無いときには出力電圧が検出されるが、入力電圧が高いときに出力電圧は検出されない。これらの基本論理ゲートを組み合わせれば、すべての論理演算回路を構築することが可能である。

また、原子スイッチの ON 状態における電気抵抗は、生成した銀原子架橋と電極との点接触の状態に依存して、10³ ~ 10⁴ Ω 程度の範囲で変化する。比較的に大きな抵抗 (10³ ~ 10⁴ Ω 程度) は、原子スケールレベルでの点接触に起因するものである。そのため、その点接触の電気伝導度 G は量子化伝導度の基本単位 $G_0 = 2e^2/h$ の整数倍値 $G = N \times G_0$ を示す。適切なパルス電圧を加えることによって銀原子架橋を形成する原子の数を変化させて、量子点接触の状態を制御することができる。そのため、この点接触の状態制御により、量子化伝導度の N の値をかなり任意に制御することが可能である。図 12 にその一例を示す。ここでは、2 本の白金ワイヤーと 1 本の硫化銀ワイヤーを用い、室温で各交点に形成された 2 つの原子スイッチの量子化伝導度を $N=0 \sim 3$ の間で独立に制御した。すなわち、2 つの半導体スイッチでは $2 \times 2 = 4$ 通りの状態しか作ることが出来ないが、2 つの原子スイッチを用いるだけで少なくとも $4 \times 4 = 16$ 通りの状態を

作ることが可能である。このことは、原子スイッチによって多重メモリが作れることを意味している。

さらに、点接触の抵抗値が大きな値 (10⁴ Ω 程度) から小さな値 (10 Ω 程度) へと 3 桁も著しく変化するのは、銀架橋の成長に伴って接触面積が原子スケールからナノスケール以上へと連続的に増加するためである。この時の接触面積の大きさ、すなわち銀原子架橋の太さは、適切なパルス電圧を加える回数によって制御することができる。この架橋の成長メカニズムは学習 (刺激パルス) によって脳内でニューロンが成長する過程に似ている。これは、原子スイッチを用いて学習機能を持つデバイスを作りうることを意味している。同じ原子スイッチを利用したデバイスでも、量子化電気伝導性を利用したデバイスではデジタル的な機能性を持ち、このデバイスではアナログ的な機能性を持っている。

6. 今後の展望

原子スイッチは、その動作原理とデバイス構造の単純さから、従来の半導体デバイスよりも小さくすることが可能であり、しかも現在の微細加工技術を用いてその作製が可能になってきた。そのため、近い将来の実用化を見据えた展開では、従来の LSI において半導体デバイスの一部を原子スイッチに組み替えることによる縮小化、省電力化、不揮発化、高機能化を目指した開発が進められるであろう。例えば、プログラマブル IC のロジックセルを結ぶためのスイッチとしての応用が期待される。次世代の高度情報化社会を拓くためには高性能で小型の携帯端末や携帯通信機などに支えられたユビキタス環境の実現が必要であり、原子スイッチを利用したプログラマブル IC はこれらの高性能情報通信機器の開発に不可欠な回路に発展する可能性を秘めている。しかし、実用化のためには、スイッチング電圧の最適化、スイッチング寿命改善、信頼性の確立、硫黄による汚染防止など解決すべき課題もある。

長期的な開発の展望では、原子スイッチは混合伝導体ワイヤーと金属ワイヤーの交点に簡単に作製できることから、クロスバー型の原子スイッチ演算回路を利用した新しいアーキテクチャー・コンピューターの実現が期待される。さらには、原子スイッチの多機能性を利用して、量子化値の制御による複数情報を記憶する多重メモリやニューロンを模倣した学習機能を有するデバイスなど従来の半導体デバイスにはなかった機能性デバイスが創製されることによって、ニューロコンピュータなどの新しい機器の開発へと発展することが期待される。

7. おわりに

我々は、新しい原理で動作する次世代ナノ電子デバイスとして、混合伝導体の固体電気化学的性質を利用した原子スイッチを開発してきた。ここでは、原子スイッチの原理、研究開発の足取り、スイッチの多機能性、さらに実用化に向けた

これらの研究の一部は、科学技術振興機構(旧：科学技術事業団)：国際共同研究事業(ICORP)「ナノ量子導体アレープロジェクト」(代表 青野正和)、基礎的研究発展推進事業(SORST)「量子効果スイッチの機能素子化」(代表 青野正和)、戦略的基礎研究推進事業(CREST)「人工ナノ構造の機能探索」(代表 青野正和)の各プロジェクトにおいて行われた。