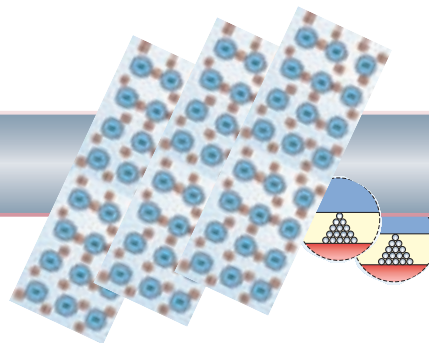


# 銀でできたナノスイッチ

## Silver nanoswitch

Jan van Ruitenbeek



イオン伝導体は、センサー、燃料電池や普通の電池などいろいろな使い道がある。イオン伝導体を基盤とするナノエレクトロニクス・デバイスは、今後シリコンにとって代わるのだろうか。

Nature Vol.433(21-22)/6 January 2005

ほとんどの電子機器はデジタルエレクトロニクスを基盤とする。そのデジタルエレクトロニクスは、組織的な連係で動作する数多くのスイッチを本質的に必要とする。このため、既存のシリコン技術を凌駕するような信頼性の高いスイッチング機構を見つけ、さらに小さく、強力なエレクトロニクスを実現することを目指して、多くの研究がなされている。理想的なスイッチとしては、原子サイズまでの縮小が望まれる。消費電力は小さく、メモリー

の読み出し書き込み操作のためにリード線2本のみを必要とする。寺部一弥たちはこの理想スイッチに近づく発明について述べている（原著論文は、*Nature* 2005年1月6日号を参照のこと）<sup>1</sup>。彼らは硫化銀の魅力的な性質を利用した。この物質の電気伝導性は電子と銀イオンの双方が担う。その結果生まれたデバイスは高速のメモリー操作だけでなく論理演算にも用いることができ、室温で動作する。

ほとんどの固体では、原子は規則的な結晶格子中の一定の位置に存在する。ところが、寺部らが使った固体イオン伝導体では、一部のイオンが格子の中にくつもの等価な位置をもつことができ、物質中をさまよい動くことができる。図1は今回の関心の的となっている伝導体  $\text{Ag}_2\text{S}$  におけるこの様子を図解したものだ。硫化銀を銀のリード線2本で電池に接続すると、硫化銀と銀の陽極との界面に  $\text{Ag}^+$  イオンが作られ、もう一方の電極で還元される。つまりこの過程によって銀の輸送が起き、プラスのリード線から銀が取り去られ、マイナスのリード線に同量の銀が析出する。 $\text{Ag}_2\text{S}$  は珍しい固体イオン伝導体で、2つの変った特徴をもつ。 $\text{Ag}_2\text{S}$  は室温で動作し、電子だけでなくイオンも伝導するのだ。この両方の特徴が、今回寺部たちが創り出したデバイスにとって肝要なのである。

数年前、寺部たちは走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた際に  $\text{Ag}_2\text{S}$  結晶の表面にできたナノスケールの銀のコブについて報告している<sup>2-4</sup>。この実験では底面につけた銀の電極はプラチナの STM チップに対してプラスの電位を保持していた。チップから  $\text{Ag}_2\text{S}$  表面へポテンシャル障壁を通り抜けた電子の一部は  $\text{Ag}^+$  イオンを金属

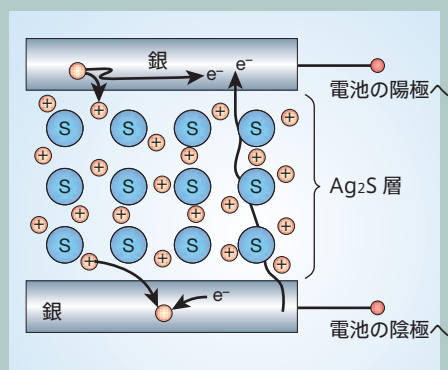


図1 硫化銀：電子・イオン混合伝導体。 $\text{Ag}_2\text{S}$  の上と下に2つの銀接点接触し、電池につながれている。電流の一部は電子によって運ばれ、一部は硫化物を通して反対方向に拡散するプラスの銀イオン（「+」を丸で囲んだもの）によって運ばれる。イオンは電極材料の酸化によって陽極で補給され、同時に陰極で銀が還元され析出する。

銀として析出させるために使われた。チップを表面から一定の高さに維持すると、チップと試料の間に金属銀の橋が形成された。この過程は電位を逆転させれば反対になり、銀の橋は溶けて硫化物内に戻る。これがスイッチの原理である。つまり、適切な符号の電圧を加えることで、接点をつないだり切ったりできる。近年、STMチップとサブストレート間に多くのスイッチング機構が発見されているが、個々のデバイスがそれ自身のSTMを必要とするために実用的な価値がほとんどなく、そういった研究はほとんど顧みられなかった。実用化するには、2つの電極間のこのようなトンネル結合をより簡単な、もっと再現性の高い方法で制御できる必要がある。

寺部たちはその巧みな解決法を見つけだした<sup>1</sup>。彼らは必要とされるトンネル間隙をイオン伝導体自らが作り出し、制御する性質を利用したのである。銀線面の上のAg<sub>2</sub>S層が厚さ1ナノメートルの銀層を介して太いプラチナ線と接触している(図2a)。そして、プラチナと銀のリード線は電圧源に接続され、上から下に電流が流れる。この電流にともなって硫化鉄を通して下へと向かう銀の移動が起こり、数秒後に上面の銀層は消失し、プラチナリード線との接触が切れる。こうしてデバイスは「オフ」状態になり、動作可能な状態になる。印加電圧の極性を逆転すると(図2b)、局所的な銀の橋が即座に形成され、プラチナとAg<sub>2</sub>S間のギャップは再び閉じられ、スイッチは「オン」状態に切り替わる。この過程にはほんの数個の原子しか必要としないため、逆転と繰り返しが高速でできる。

さらに寺部たちは、振幅と持続時間が正確な短い電圧パルスが印加できれば、デバイスのコンダクタンスを1量子単位程度まで小さくできることを観測した。この場合、銀の橋はプラチナのリード線にちょうど1個の原子が接触するまで上方に成長するように思われる(概論は参考文献5を参照のこと)。「オン」と「オフ」状態を切り替えるには100 mVより高い電圧を必要とする。メモリービットの状態、つまりオンかオフかは、硫化銀の電子伝導特性を利用してこの電圧より低い電圧で破壊することなく読み出すことができる。

2つの硫化銀スイッチと抵抗器、コンデンサーを組み合わせて、寺部たちは基本的な論理演算AND、OR、NOTを行った。基本的には、より複雑な論理演算の実行に必要なものはこれですべてである。しかし、入出力を大きなデジタル回路内の別の論理ゲートと結合すると、この論理ゲートの効率性は著しく落ちるだろう。この問題を回避するには、ゲート信号を増幅する手段が必要となる。でなければ、このデバイスの論理回路への応用は限られたものになるだろう。著者らが観測した電圧の増加に伴う複数のステップ、つまり量子化伝導度も注目

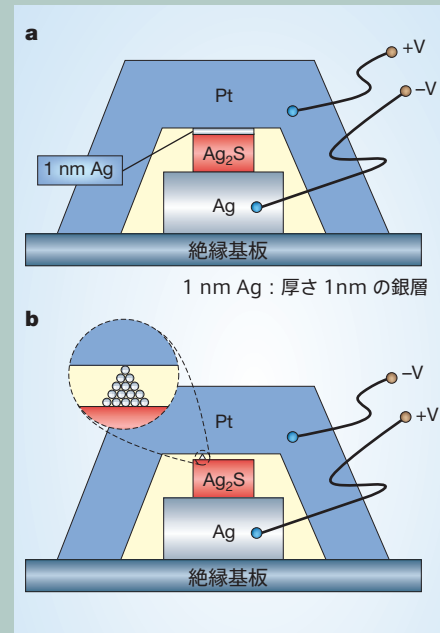


図2 硫化銀(Ag<sub>2</sub>S)混合イオン伝導体の性質を利用した書き換え可能なメモリービット、寺部らの論文<sup>1</sup>で説明されている。a. Ag<sub>2</sub>S層の上に蒸着された厚さ1ナノメートルの銀層は、プラチナのリード線から銀のリード線に電流を流すと硫化物層内に消える。この結果、2つの電極間の接触が失われ、デバイスが初期化される。b. 電圧を逆にかけることにより、銀原子の橋が局所的に形成され、硫化銀とプラチナ間の接触が回復する。デバイスのコンダクタンスは1量子単位のコンダクタンスになることができ、銀の橋はたった1個の原子でプラチナのリード線に接触していることを示している。

に値するが、再現性の乏しさからみて、実用性はおそらく十分とはいえない。

とはいえ、研究の主たる成果は極めて明快なもので、ナノメートルサイズのアドレス可能なビットに縮小できる。特許出願によって著者らが研究成果を保護されたのは賢明であった。

ライデン大学カマリン・オンネス研究所(オランダ)、  
Jan van Ruitenbeek

1. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *Nature* **433**, 47–50 (2005).
2. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *RIKEN Rev.* **37**, 7–8 (2000).
3. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4009–4011 (2002).
4. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *J. Appl. Phys.* **91**, 10110–10114 (2002).
5. Agraït, N., Levy Yeyati, A. & van Ruitenbeek, J. M. *Phys. Rep.* **377**, 81–279 (2003).