

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
東京大学 生産技術研究所	助教	吉田 健治

研究テーマ

環境熱揺らぎを利用した金属原子メモリの超低消費電力動作化の実現

研究報告

1. 研究の背景と目的

現行の CMOS は微細化による性能向上の物理限界が近づきつつあることから、CMOS とは異なる素子構造や動作原理を持つ次世代電子デバイスの開発が急務となっている。その有力な候補の一つとして、金属原子スイッチ (Metal Atomic Switches: MAS) が挙げられる (図 1)。MAS は金属電極対が金属原子数個でつながった構造を有する。MAS に電気信号を印加すると接合部の金属原子の再配置が生じ、素子抵抗が変化する抵抗変化型メモリとして働く。MAS は活性層が原子スケール、不揮発性メモリ動作及びその動作周波数が THz 帯に達するという予測もあり、次世代電子デバイスの有力な候補として注目を集めている。さらに、MAS は生体のシナプスと似た動作特性を示すことから、脳型計算機を構成する基本単位である人工シナプスの候補として期待されている。本研究では、MAS がシナプスと同様な動作機構を持つことに着目し、雑音を活用した MAS の機能性の創出を目的として研究を行う。特に、雑音誘起現象の一つである確率共鳴を利用することで動作電圧の低減化と素子間の特性ばらつき抑制を実現し、本素子の実用化に向けた基礎を確立することを目的とする。さらに、低動作閾値電圧を有した MAS を作製することで、環境の熱揺らぎを援用した超低消費電力動作不揮発性メモリ素子の実現を目指す。また、MAS における新たな物性を開拓することで、MAS の更なる高機能化に向けた基礎的な学理の探求を行う。

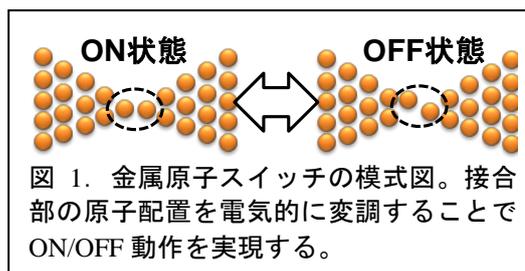


図 1. 金属原子スイッチの模式図。接合部の原子配置を電氣的に変調することで ON/OFF 動作を実現する。

2. 研究成果および考察

1. MAS 確率共鳴動作電圧における閾値の決定及び MAS の室温動作に向けた材料系の選定

MAS の確率共鳴動作電圧の閾値 V_{TH} を決定するために確率共鳴の理論モデルを元に数値解析を行った。その結果、MAS のスイッチング電圧 (無雑音下での動作電圧) の約 9% の電圧値が V_{TH} の下限であることがわかった。実際に得られた数値解析結果と実験値とを比較を行った。その結果、スイッチング電圧 (220 mV) の 11% の入力電圧 (25 mV) を印加した際には、入力信号に同期した出力が得られたのに対して、9% の入力電圧 (20 mV) を印加した場合には、入出力信号間の同期減少が消失し、理論予測と良い一致を示したことがわかる (図 2)。以上から、確率共鳴を援用することで MAS の入力電圧を 10% 程度まで抑制可能であるといえる。また、室温で動作する MAS に最適な金属材料の選定を行った。原子接合の作製が容易である Au は、素子構造が室温状況下では不安定であり、数秒から数分程度で原子接合が破断する。また、Ni においても同様の実験を行ったが、室温下においても強い素子構造の耐久性を示したものの、大気中の酸素もしくは水分との化学反応に起因した経時劣化が生じる。そこで、Ni と同族であり化学的に不活性な白金に着目し実験を行った結果、室温

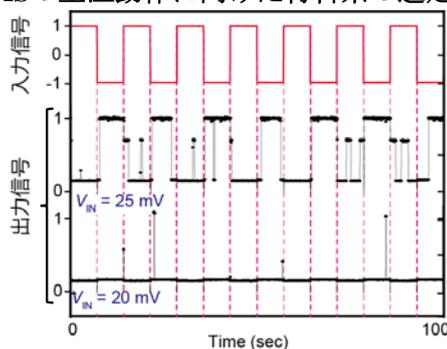


図 2. 金属原子スイッチにおける雑音下での入出力信号特性。

化においても素子構造が安定に保持することが可能であることを確認した。

2. 白金ナノ接合系における磁気抵抗効果の観測

白金はバルクでは非磁性金属であるが、1 nm程度のナノクラスターにすると磁性を示すことがこれまで知られていた。本研究では、このサイズ効果に着目し、白金細線を通電断線法によって狭窄化し、ナノギャップ接合を作製し、その電気伝導度の磁気応答を調べた。図3に白金ナノギャップ接合における磁場応答特性を示す。磁場 B を正方向に掃引した結果、 $B = 0.4$ T付近において素子伝導度が急峻に上昇し、さらに磁場を増加すると素子伝導度は元の伝導度に減少する結果が得られた。また、本系では素子伝導度の変化が生じる磁場が磁場掃引方向に依存するヒステリシス特性を示した。これらの磁気応答特性は、強磁性トンネル接合で観測されるトンネル磁気抵抗効果と酷似した特性である。したがって、①白金細線をナノギャップ接合にまで狭窄化することで強磁性的性質が発現し、②外部磁場により左右の白金電極の磁化方向の相対角度の変化に起因したスピン依存伝導度の変化によって素子伝導度の磁気応答特性が引き起こされたことが示唆される。

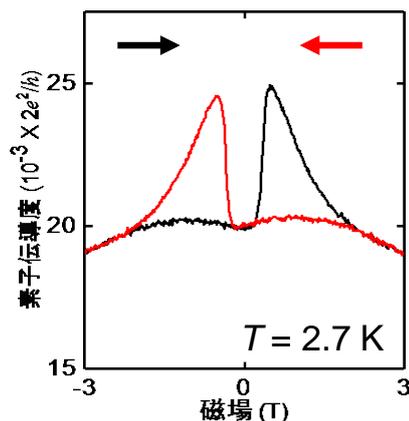


図3. 白金原子スケール接合におけるトンネル磁気抵抗効果。図中矢印は磁場掃引方向を示す。

3. イオン液体を用いた電気二重層トランジスタ構造による原子接合伝導度のゲート変調効果

イオン液体を用いた電気二重層トランジスタ構造を用いることで、従来の固体ゲート構造に比べて10倍以上の高い電界変調効果が得られる。近年、イオン液体を用いた高強度電界効果を様々な物質に適用することで、超伝導や磁性の電界制御など新奇の物性制御が実現されている。本研究では、このイオン液体を用いた電気二重層トランジスタ構造を金属系量子ポイントコンタクト(Quantum Point contacts: QPC)に適用することで、電界による伝導度変調の実現を目指して実験を行った。図4に金属系QPCの電気伝導度のイオンゲート電圧依存性を示す。図より、イオンゲート電圧を負方向に掃引した際には、素子伝導度が階段状に減少し、その伝導度の変化量は量子化伝導度(G_0 ; $2e^2/h$)と一致した。さらに、電圧掃引方向を反転すると、素子伝導度が G_0 増加し、素子伝導度がイオンゲート電圧印加前の値に戻った。今回得られた伝導度変化のメカニズムに関して統一的な解釈は未だ得られていないが、従来観測されていた半導体系QPCでの電界変調効果と同様に、金属系QPCにおいてもその狭窄部の実効的な幅がゲート電界によって変調し、伝導に寄与するチャネル数が変化したことが原因であると考えられる。これまで金属系QPCではその伝導度を変調するためには、接合部を破断するなどして機械的構造を不可逆的に変化させる必要があった。そのため、本実験で示した電界による可逆的な伝導度変調は、金属系QPCの素子応用を鑑みると大きな意義があるといえる。

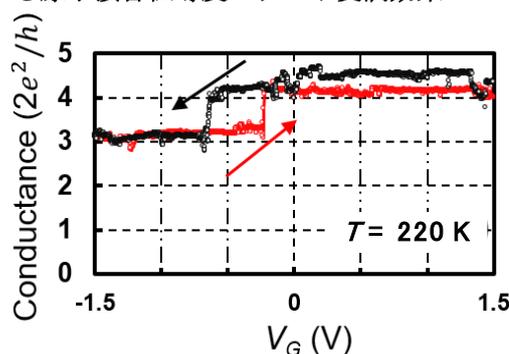


図4. 金属原子接合における電気伝導度のイオンゲート電圧依存性。図中矢印はゲート電圧掃引方向を示す。

3. 将来展望

白金を用いることで室温動作可能な原子接合の作製に成功し、環境の熱雑音を利用した確率共鳴素子への道が拓けたといえる。今後は、白金原子スイッチの雑音応答特性の検証を行い、外部雑音源が不要な確率共鳴素子の実現を目指す。また、原子スケール構造の白金接合で発現する磁气的性質を利用することで、磁気材料を用いずに磁性メモリ素子を実現できるだけでなく、左右の電極対の磁化配置という新たな自由度を金属原子スイッチに付与できることから、金属原子スイッチを用いることで、磁気抵抗と原子配置を利用した多値メモリ動作が期待できる。一方で、本系で得られた強磁性的性質の発現機構は未だ明らかではないため、今後は磁性の発現条件に関してより詳細な検討を行っていく予定である。さらに今回イオン液体を用いた高強度の電界変調

効果を用いることで、電界による金属原子スイッチの抵抗値制御が可能になった。これはイオン液体を用いることで半導体を用いずに金属のみで構成されたトランジスタの実現可能であるなど新たな電子デバイス実現へとつながる技術であるといえる。しかしながら、イオンゲート印加時において抵抗変化が生じた原因に関しては、電界効果以外にも近接したイオンによる機械的ストレスや化学反応といった効果とその抵抗変化に寄与している可能性も排除できないという課題もあることから、その動作機構を解明するための実験が急務であるといえる。

4. 研究発表

国際学会誌での発表 3件 (内訳: 掲載済1件、投稿予定2件)

“Stochastic Resonance in Bistable Atomic Switches”, Kenji Yoshida and Kazuhiko Hirakawa, *Nanotechnology*, 125205, **28** (2017).

“Electric-field control of conductance in metal quantum point contacts by electric-double-layer gating”, K. Shibata, K. Yoshida, K. Daiguji, H. Sato, T. Ii, and K. Hirakawa, 投稿予定。

“Observation of tunnel magnetoresistance in Pt tunnel junctions fabricated by using the electrical break-junction method”, K. Yoshida and K. Hirakawa, 投稿予定。

国際会議での発表 1件

“Stochastic resonance in an atomic switch”, Kenji Yoshida and Kazuhiko Hirakawa, 19th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN 2016), 香港, 25-30 July 2016.

国内学会での発表 3件 (詳細略)