

同時発表：
筑波研究学園都市記者会（レク）
文部科学記者会（資料配布）
科学記者会（資料配布）
大学記者会（資料配布）
大阪科学・大学記者クラブ（資料配布）



100 万分の 1 の消費電力で、演算も記憶も行う新しいトランジスタを開発 -起動時間ゼロの PC の開発にも道-

解禁日時：平成 22 年 1 2 月 2 4 日 AM 0 : 0 0

独立行政法人 物質・材料研究機構

独立行政法人 科学技術振興機構

国立大学法人 大阪大学

国立大学法人 東京大学

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（拠点長：青野 正和）の長谷川 剛主任研究者らのグループは、大阪大学大学院理学研究科の小川 琢治教授、ならびに東京大学大学院工学系研究科の山口 周教授らの研究グループと共同で、従来の 100 万分の 1 の消費電力で、演算も記憶も行うことが可能な新しいトランジスタ「アトムトランジスタ」の開発に成功した。状態を保持できる（記憶する）演算素子は、起動時間ゼロの PC（パーソナルコンピュータ）などの開発に不可欠であり、このたびの開発により、その実現がさらに早まることが期待される。
2. このたび開発した「アトムトランジスタ」は、従来のトランジスタが半導体中における電子の移動を制御しているのに対して、わずかな金属原子を絶縁体中で移動させることにより動作する。半導体よりも抵抗の高い絶縁体を母材に用いたこと、その内部をわずかな量の金属原子が移動してオン/オフ状態を実現することから、極めて低い消費電力で、従来の半導体トランジスタと同等の高いオン/オフ比を示す。さらに、動作電圧の制御によって状態を保持する記憶素子としても動作することがわかった。
3. 演算結果に応じて回路が再構成される不揮発ロジック回路は、電源を切っても状態を保つことが可能なことから、起動時間ゼロの PC などを実現する新しいコンピューター回路として期待されている。従来、演算素子（トランジスタ）と記憶素子（メモリ）を組み合わせることで、ひとつの「記憶する演算素子」を形成していた。しかしながら、従来素子では記憶に要する消費電力が極めて高く、実用化にはその大幅な低消費電力化が必要となっていた。このたび開発した「アトムトランジスタ」は、この記憶に要する消費電力を従来素子の 100 万分の 1 にした。さらに、演算と記憶の双方の機能を併せ持つことから、人間の脳のような、より柔軟なコンピューター回路の実現に寄与することが期待される。
4. この成果は、JST 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」研究領域（研究総括：渡辺 久恒 株式会社 半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長）における研究課題「3 端子型原子移動不揮発性デバイス「アトムトランジスター」の開発」（研究代表者：長谷川 剛）の一環として行われ、12 月 24 日に科学雑誌「Applied Physics Express (APEX)」のオンライン速報版で公開される。

研究の背景

コンピュータの基本構成要素である演算素子（半導体トランジスタ）と記憶素子（メモリ）双方の微細化と高性能化は、iPadを始めとする多様な携帯型情報端末機器の開発を可能としてきた。しかしながら、演算回路と記憶回路が独立したノイマン型と呼ばれる現在のコンピュータでは、演算回路と記憶回路間の信号伝達がボトルネックとなり、演算素子や記憶素子の高性能化をはかっても、コンピュータとしての高性能化をはかれないという状況になりつつある。これを打開する方法として、演算と記憶を同一回路内で行う新しいコンピュータ回路（不揮発ロジック回路）が提案・研究開発されている。演算途中の状態の保持や、演算結果による回路の再構成が可能な不揮発ロジック回路は、起動時間ゼロのPCなどを実現する回路として期待されている。

不揮発ロジック回路の研究では、従来、演算素子として半導体トランジスタを、記憶素子として磁気メモリ（注1）を用いて、それらを組み合わせることで「記憶する演算素子」を実現していた。しかしながら、記憶に要する消費電力が極めて高く、実用化にはその消費電力の大幅な低減が必要となっていた。

成果の内容

本研究グループでは、以前から進めていた原子の移動を制御したデバイス「原子スイッチ」の研究開発において、極めて少ない原子の移動によってオン/オフ動作を実現できることを見いだした。絶縁体中を数少ない原子が移動するだけなら消費電力は限りなくゼロに近くなり、原子として金属を用いれば、演算素子に要求される高いオン/オフ比も実現できる。このアイデアを実現すべく研究を進めていたところ、電圧の大きさによって、演算素子に要求される揮発性動作（注2）と記憶素子に要求される不揮発性動作（注3）をひとつの素子で選択的に実現できることがわかった。（図1）

このたび開発した「アトムトランジスタ」（図2）は、以下の特長を有している。

- (1) 用いる電圧領域によって、ひとつのアトムトランジスタがオンオフを繰り返す演算素子としても、状態を保持する記憶素子としても動作する。演算素子動作と記憶素子動作の電圧比は、およそ1 : 2。（図3）
- (2) 記憶素子動作時の消費電力は従来素子の100万分の1（注4）。演算素子動作時の消費電力も、半導体トランジスタの100分の1に低減（注5）。
- (3) 記憶素子動作時のオン/オフ比が8桁と極めて大きい。（従来素子は、たかだか1桁）。演算素子動作時のオン/オフ比は、半導体トランジスタと同等の6桁。
- (4) 構造が簡単であり、現在の半導体素子製造と互換性のある材料、ならびにプロセスで作製可能。

なお、このたびの開発は、以下の発見に基づいている。

- (1) 絶縁体中における金属原子の濃度が臨界点を超えると、絶縁体から金属状態に変化する。
- (2) 金属状態には、電圧オフで絶縁体に戻る揮発的な状態と、電圧をオフにしても金属状態を保持する不揮発的な状態の2種類がある。
- (3) 揮発的な状態は、金属原子が均一に分布している状態であり、不揮発的な状態は、原子がナノスケールの塊を形成している状態である。
- (4) ゲート電圧によって、電流経路となるソース・ドレイン電極近傍でのみ上記現象を実現できる。(図4に、これら現象に基づく動作原理を模式的に示す。)

不揮発ロジック回路では、演算結果に応じて回路の再構成が実行される必要がある。このたび開発したアトムトランジスタは、演算素子動作と記憶素子動作の電圧比が約1：2と明確な動作切り分けが可能である(誤動作が起こらない)。高いオン/オフ比を示すことから演算回路の中核の変更にも対応できる。これらの特長を用いることで、より柔軟で高度なコンピューター回路の構築が可能になる。

波及効果と今後の展開

演算素子や記憶素子の低消費電力化は、従来の電子情報機器の低消費電力化に貢献するだけでなく、不揮発ロジック回路やその延長にある脳型回路など、新しいコンピューター回路の開発を可能にする。従来の不揮発ロジック回路の研究では、記憶素子の高い消費電力と低いオン/オフ比のために、「メモリ・イン・ロジック」(注6)などの初歩的な機能の実現を目指していた。このたび開発したアトムトランジスタは、極めて低い消費電力と高いオン/オフ比を備えており、不揮発ロジック回路が本来有する機能を最大限に引き出すことが可能になると期待される。単一の小規模回路で複数の機能を実行することが可能になり、たとえば、腕時計のサイズで、PCや携帯電話などの日常生活に必要な機能の全てを実現できる可能性もある。

本研究グループでは、原子の移動を制御する素子として、2端子型の「原子スイッチ」の研究を進めてきた。企業等との共同研究の結果、「原子スイッチ」は技術的には既に実用化の域にある。このたび試作したアトムトランジスタも、既に1万回の連続動作などに成功しており、「原子スイッチ」同様、早期の実用化が期待される。本研究成果についても、今後、企業との共同研究などを含めて、実用化に向けた研究開発をさらに進める予定である。

<APEX 発表論文>

論文題目：Volatile/Nonvolatile Dual-Functional Atom Transistor

著者名：長谷川剛、伊藤弥生美、田中啓文、日野貴美、鶴岡徹、寺部一弥、宮崎久生、塚越一仁、小川琢治、山口周、青野正和

問い合わせ先：

(研究内容に関すること)

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

主任研究者 長谷川剛(はせがわ つよし)

E-mail: HASEGAWA.Tsuyoshi@nims.go.jp

TEL: 029-860-4734 Homepage: http://www.nims.go.jp/atom_ele_gr/index.html

(報道担当)

独立行政法人 物質・材料研究機構

企画部 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

TEL:029-859-2026 FAX:029-859-2017

独立行政法人 科学技術振興機構

広報ポータル部

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

TEL:03-5214-8404 FAX:03-5214-8432

E-mail:jstkoho@jst.go.jp

(JSTの事業に関すること)

独立行政法人 科学技術振興機構

イノベーション推進本部 研究領域総合運営部

長田 直樹 (ながた なおき)

〒102-0075 東京都千代田区三番町5 三番町ビル

TEL:03-3512-3524 FAX:03-3222-2064

E-mail:crest@jst.go.jp

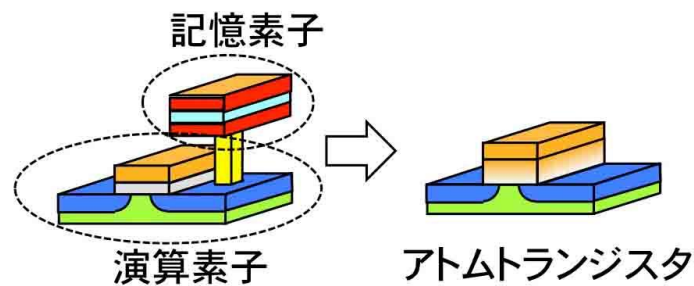


図1 半導体トランジスタと磁気メモリを組み合わせた従来の「記憶する演算素子」と演算と記憶の両方をひとつでこなす「アトムトランジスタ」の模式図

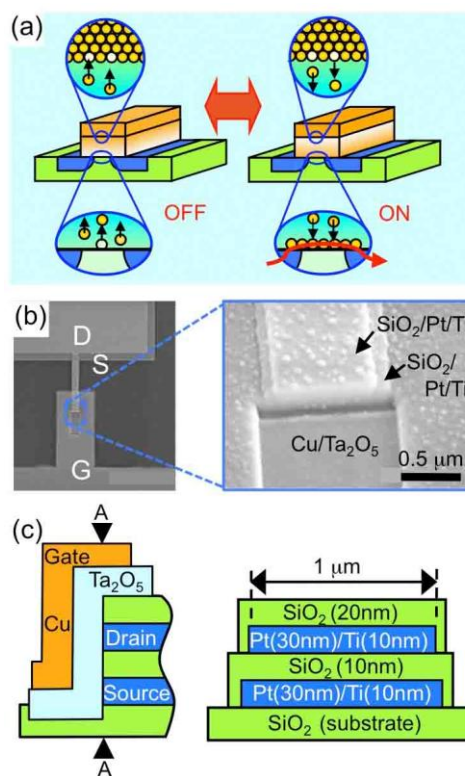


図2 アトムトランジスタの模式図とその電子顕微鏡写真

- (a) ゲート電極（上部）からソース・ドレイン電極（下側の青い部分）側に金属原子を供給したり、呼び戻したりすることでオン/オフ動作する。
- (b) 試作したアトムトランジスタの電子顕微鏡写真（S：ソース電極、D：ドレイン電極、G：ゲート電極）
- (c) 試作したアトムトランジスタの構造模式図。左側：断面図。右側：A-A断面を左側からみた場合の構造(Ta_2O_5 層とCu層を省略)

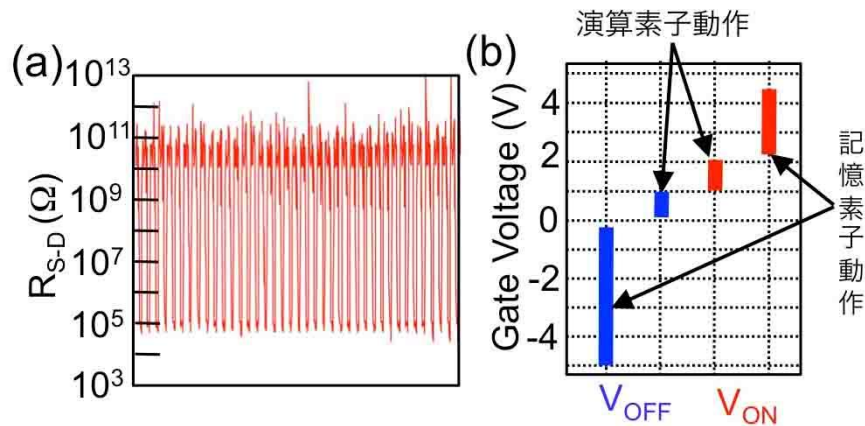


図3 アトムトランジスタの動作結果

(a) 演算素子として連続動作している時のソース・ドレイン電極間に流れる電流。

(b) 演算素子として動作する電圧領域と記憶素子として動作する電圧領域。赤：スイッチオン動作に要した電圧。青：スイッチオフに要した電圧。

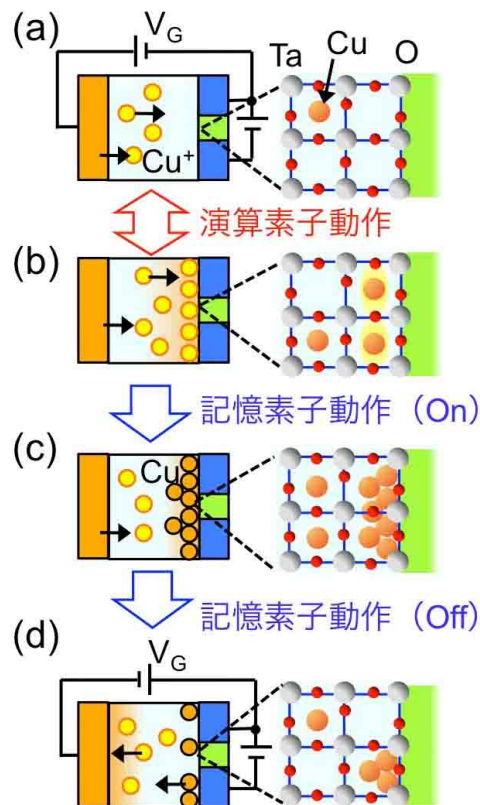


図4 演算素子動作と記憶素子動作の原理

(a) 正の電圧をゲート電極に加えると、ゲート電極から金属原子が絶縁体中に供給される。(b) ソース・ドレイン電極近傍で金属原子の濃度が臨界値を超えると、絶縁体から金属的な状態へと変化する。(c) さらに高い電圧を加えると、金属原子が塊を形成する。(d) 塊をほどくには、負のゲート電圧を加える必要がある。今回の動作実証では、絶縁体として酸化タンタル(Ta_2O_5)を、絶縁体中を移動する金属として銅 (Cu) ないし銀 (Ag) を用いた。これらの材料は、現在の半導体素子製造と互換性のある材料である。

【用語解説】

(1)磁気メモリ

積層した磁性体薄膜を流れる電流の大きさが、磁化の向きによって変化することを利用したメモリ素子。磁化の反転に要する電流がマイクロアンペア以上必要であり、その低消費電力化が課題となっている。(マイクロは、100 万分の1)

(2)揮発性動作

電圧を加えている間だけオン状態を保ち、電圧ゼロでオフ状態に戻る動作。半導体トランジスタの動作がこれに該当する。

(3)不揮発性動作

オン状態になったあと電圧をゼロにしても、オン状態を保持する動作。オフ状態に戻すためには、逆極性の電圧を加える必要がある。

(4)記憶素子動作時の消費電力は従来素子の100 万分の1

アトムトランジスタの動作に必要な電流はピコアンペアであり、磁気メモリのそれと比較した場合の消費電力は、100 万分の1 となる。(ピコは、マイクロの100 万分の1)

(5)演算素子動作時の消費電力も、半導体トランジスタの100 分の1に低減

半導体トランジスタの消費電力は、おもに待機電力と呼ばれる漏れ電流で決まる。現在の半導体トランジスタのそれは、1 平方センチメートルあたり、ミリアンペア程度である。それに対して、アトムトランジスタの漏れ電流は、1 平方センチメートルあたり10マイクロアンペアと、半導体トランジスタの100 分の1である。

(6)「メモリ・イン・ロジック」

演算回路と記憶回路間の信号伝達に要する時間を節約するために、演算回路内に記憶機能の一部を配置したコンピューター回路。回路構造自身は変化しない。