

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13333

研究課題名(和文)リアルタイムOSによる時間確定型エレクトロマイグレーション制御系と単一原子駆動

研究課題名(英文)Time-Deterministic Control of Quantized Conductance of Au Nanowires Using Feedback-Controlled Electromigration with Real-Time Operating System

研究代表者

白樫 淳一 (SHIRAKASHI, JUN-ICHI)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00315657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、リアルタイムオペレーティングシステム(RTOS)を用いて金属細線でのエレクトロマイグレーション制御システムを構築した。この際、エレクトロマイグレーション原子の移動を時間確定的に「その場」制御し、単一原子スケールでの移動・操作を精緻に調整しながら原子スケールの接点構造やギャップ構造を作製した。さらに、これまでに蓄積した制御データを参照して自律的に実験パラメータを逐次決定する人工知能アルゴリズムを開発し、人工知能アプローチ型の新たなエレクトロマイグレーション制御システムを構築した。これより、単一原子単位での帯電構造の形成や新物性の機能探索、また、原子デバイス作製技術の可能性が拓かれた。

研究成果の概要(英文)：Here, we study the intelligent control approach for the tuning of feedback parameters of feedback-controlled electromigration (FCE) method using real-time operating system (RTOS), with cost functions to evaluate control quality of Au atomic junctions. We investigated the FCE evaluation system to tune the quantized conductance behavior of Au atomic junctions. First, the feature values of the conductance quantization were extracted from the conductance traces during the FCE procedure, and were stored in a database. Then, we evaluated the FCE parameters using cost functions. As a result, the conductances of Au atomic junctions formed with the highest score in the database were successfully quantized and discretely decreased with process time without catastrophic breaks. Therefore, the results imply that FCE evaluation system using intelligent control approach improves the controllability of quantized conductance of Au atomic junctions with appropriate feedback parameters.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：電子・電気材料 リアルタイムオペレーティングシステム エレクトロマイグレーション ナノギャップ 原子接点

### 1. 研究開始当初の背景

ナノスケールデバイスの作製技術としてエレクトロマイグレーション現象を利用する方法が知られている。特に、単電子トランジスタや単分子トランジスタを開発するため、数 10nm スケールの金属ナノギャップ電極構造の形成技法が報告されている (Yu et al., Nano Lett. (2004), S. Kubatkin et al., Nature (2003))。しかし、これらのナノギャップ電極作製手法では、ナノスケール狭窄構造を有する金属細線を単純に破断させることで数 10nm 程度のナノギャップを形成することに主眼がおかれており (Park et al., APL (1999))。原子の移動機構やその制御手法に関する検討は殆ど成されていなかった。本研究では、古典的なエレクトロマイグレーションを金属細線へ適用し、リアルタイムオペレーティングシステム (RTOS) を用いた制御システムにより単一原子の移動・操作を時間確定的に駆動させ、簡便に原子スケールデバイス構造の作製を行い、新物性の探索と機能化が可能となる技術の開発を掲げている。

これまで我々は、ナノギャップ電極で発現するエレクトロマイグレーション現象を巧みに制御・利用することで、単電子トランジスタの至極簡便な作製および集積化技術の開発を行ってきた (Kume et al., JNN (2010), Ueno et al., JNN (2011))。今回の研究課題では、エレクトロマイグレーション法における原子の移動や操作などの制御性能を極限まで突き詰め、単一原子単位での構造形成の可能性や、そこからの新物性の機能探索、また、原子デバイス技術の検討を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、金属細線での通電にて誘起されたエレクトロマイグレーション現象により、単一原子の移動・操作機構を利用した原子スケール構造制御技法を開発し、原子スケールサイズの構造体 (原子接合や原子ギャップ) の作製と、そこから発現される新しい物性の探索・制御と機能の集積化を目的とする。具体的には、RTOS を用いて金属細線でのエレクトロマイグレーション制御システムを独自に構築する。この際、エレクトロマイグレーション原子の移動を時間確定的に「その場」制御し、単一原子スケールでの移動・操作を精緻に調整しながら原子スケールの接点構造やギャップ構造を作製する。同時に、原子スケール構造体から発現される諸物性をナノギャップ電極を利用して電氣的にプローブすることで、単一原子機能性の発現・制御手法としての原子デバイス技術の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の研究期間は、2 年を設定した。まず、初年度 (平成 27 年度) では、RTOS を用

いて金属細線でのエレクトロマイグレーション制御システムを独自に構築する。この際、エレクトロマイグレーション原子の移動を時間確定的に「その場」制御し、単一原子の移動・操作を精緻に調整しながら、原子スケールの接点構造である「原子接合」や原子スケールのギャップ構造である「原子ギャップ」を作製する。

最終年度 (平成 28 年度) では、RTOS を用いた電圧フィードバック制御型エレクトロマイグレーション法による時間確定的なエレクトロマイグレーション原子の移動・操作機構を用いて、「原子接合」や「原子ギャップ」の作製技術を確立する。これらの技法を応用することで、ナノメートルのギャップ空間内にアイランド電極が原子 1 個～数個分のサイズで形成された、究極的な単電子トランジスタと考えられる「"単原子"トランジスタ」の開発を行う。これは、固体素子にて、単原子の電子状態を直接制御できる可能性がある。

### 4. 研究成果

(1) 初年度 (平成 27 年度) では、フィードバック制御のシステム応答性の観点から、時間確定的な処理が可能なオペレーティングシステムとして知られる RTOS に着目した新たな電圧フィードバックエレクトロマイグレーション制御システムの構築を行った。RTOS を用いた本システムを Au 細線に対するエレクトロマイグレーションに適用し、RTOS 導入によるエレクトロマイグレーション制御ステップの時間確定性を検討するため、エレクトロマイグレーション制御実行時における計測時間のばらつきを検証した。これより、設定した計測時間間隔で完璧にエレクトロマイグレーションの発現が制御され、その発熱特性が理想的なジュールヒーティングモデルで説明できることが明らかとなった。さらに、原子接合における Au 原子の増減制御や維持方法を詳細に検討し、単一 Au 原子を室温・大気下にてエレクトロマイグレーションにより駆動することに成功した。

(2) 最終年度 (平成 28 年度) では、時間確定的な処理を高精度に実行可能な RTOS を使用したエレクトロマイグレーション制御システムを構築した。本システムを Au ナノワイヤへ適用し、印加電圧パターンの調節により、Au 原子接合の作製や量子化コンダクタンスの増加・減少を自在に制御することに成功し、原子接合での原子単位の移動制御が可能であることを明らかにした。さらに、これまでに蓄積したエレクトロマイグレーション制御データを参照して自律的に制御パラメータを決定してゆく人工知能アルゴリズムを開発し、人工知能アプローチ型の新たなエレクトロマイグレーション制御システムを構

築した。具体的には、コンダクタンス制御時の実験パラメータを最適な値に自動的に調整する学習・評価・推論エンジンを作成し、エレクトロマイグレーション制御時のコンダクタンス変動波形を評価することで、コンダクタンス制御パラメータの優劣を評価関数による得点を用いて判定した。これより、本システムは、コンダクタンス制御の評価を行うことができ、低評価な実験パラメータを自動的に更新することで、自律的なエレクトロマイグレーション制御が可能である。

以上の成果から、RTOS を用いてエレクトロマイグレーション原子を時間確定的に「その場」制御することで単一原子の移動や操作を室温大気下で簡便に行うことが可能となった。これより、単一原子単位での帯電構造の形成や、そこからの新物性の機能探索、また、原子デバイス作製技術の可能性が拓かれたものと考えられる。

## 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4件)

塩村真幸、齋藤孝成、伊藤光樹、木原裕介、酒井正太郎、白樫淳一  
“論理ゲートで表現された2次元イジング計算機の組合せ最適化問題への適用”  
電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 471, ED2016-135(SDM2016-152), pp. 29-34, 2017年2月. 査読無

M. Yagi, M. Ito and J. Shirakashi  
"Structural Tuning of Nanogaps Using Electromigration Induced by Field Emission Current with Bipolar Biasing"  
J. Appl. Phys. 118 (2015) 014306. 査読有  
DOI: 10.1063/1.4923347

M. Yagi, M. Ito and J. Shirakashi  
"In Situ Atomic Force Microscopy Imaging of Structural Changes in Metal Nanowires during Feedback-Controlled Electromigration"  
J. Vac. Sci. Technol. B 33 (2015) 051806. 査読有  
DOI: 10.1116/1.4929444

M. Kase, K. Okada M. Ito and J. Shirakashi  
"Field-Emission-Induced Electromigration Method for Precise Tuning of Electrical Properties of Ni-Based Single-Electron Transistors"  
Conference Proceedings, 2015 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (IEEE 3M-NANO), Digital Object Identifier: 10.1109/3M-NANO.2015.7425487, Publication Year: 2015, Page(s): 202-205. 査

読有

DOI: 10.1109/3M-NANO.2015.7425487

[学会発表](計4件)

岩田侑馬、加藤木悠、沼倉憲彬、酒井正太郎、白樫淳一  
“リアルタイムOSを用いたFCE法によるAu原子接合での制御パラメータの自律設定手法”  
第64回応用物理学会春季学術講演会、15p-P5-2、2017年春季、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

S. Sato, Y. Kanamaru, Y. Katogi and J. Shirakashi  
"Time-Deterministic Control of Quantized Conductance of Au Nanowires Using Feedback-Controlled Electromigration with Real-Time Operating System"  
43rd International Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-43), January 17-21, 2016, Palm Springs, CA, USA.

M. Ito, M. Kase, K. Okada and J. Shirakashi  
"Field-Emission-Induced Electromigration Method for Precise Tuning of Electrical Properties of Ni-Based Single-Electron Transistors"  
5th IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (IEEE 3M-NANO 2015), October 5-9, 2015, Changchun, China.

M. Kase, K. Okada, K. Morihara and J. Shirakashi  
"Precise Tuning of Electrical Properties of Nanogap-Based Single-Electron Transistors Using Field-Emission-Induced Electromigration Method"  
10th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials (NANOSMAT 2015), September 13-16, 2015, Manchester, UK.

[その他]

ホームページ等

<http://web.tuat.ac.jp/~nanotech/index.htm>

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

白樫 淳一 (SHIRAKASHI, JUN-ICHI)  
東京農工大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：00315657

(2)研究分担者  
該当なし

(3)連携研究者  
該当なし

(4)研究協力者  
該当なし