

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03970

研究課題名(和文)FPGAによるエレクトロマイグレーション原子の高速移動制御と原子接合構造の作製

研究課題名(英文) Investigation of Au Atomic Junctions Using Ultrafast Electromigration Controlled by a Field-Programmable Gate Array

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) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、エレクトロマイグレーションにより駆動される単一原子の移動過程を、FPGAを用いたカスタムハードウェアにより精緻かつ高速に「その場」制御することが可能な手法の開発を目的としている。具体的には、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「原子ギャップ」を作製する。これらの技術を用いて原子1個～数個分のアイランド電極を有する単電子トランジスタである「単原子トランジスタ」の実現を目指す。研究成果として、原子接合や原子ギャップの形成に成功し、アイランド電極のサイズが10nm以下(原子が数10個以下)の単電子トランジスタを同時に複数個一括作製する技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：A field-programmable gate array (FPGA) contains a matrix of reconfigurable gate array logic circuitry. FPGA-based systems can thus perform deterministic closed-loop control tasks at extremely fast loop rates. In this study, we presented the design of a new feedback-controlled electromigration (FCE) system using an FPGA. In addition, we applied the system for fabrication of Au atomic junctions and atomic gaps. Single-electron transistors (SETs) arrays operating at room temperature were also fabricated using the method. These results clearly imply that FPGA-based electromigration procedure is suitable for formation of Au atomic junctions, atomic gaps and SET arrays.

研究分野：ナノエレクトロニクス、ナノテクノロジー

キーワード：マイクロ・ナノデバイス FPGA エレクトロマイグレーション 単原子トランジスタ 原子接合 原子ギャップ

1. 研究開始当初の背景

極限的な電荷分解能や低消費電力性能を有する単電子トランジスタ (Single-Electron Transistor: SET) の作製には、従来、主に、電子線露光や走査型プローブ顕微鏡が用いられてきた (Takahashi et al., Electron Lett. (1995), Fujita et al., APL (1996), Shirakashi et al., APL (1998), Pashkin et al., APL (2000))。これらでは nm 級の「職人技」的な作製プロセスを駆使することで 10nm スケールの室温動作デバイス単体の開発が「かるうじて」成されている。より高性能化を図るために必要な「10nm 以下 = 原子スケール」のサイズを有する単電子トランジスタの検討は、殆ど着手すらされていない。一方、従来、原子操作技術として走査型プローブ顕微鏡が広く知られているが、一個～数十個の原子の操作は可能であっても、デバイススケールで単電子トランジスタなどを高い制御性かつ現実的な時間内で作製することは、未だ成されていない。

本研究では、従来技術の「高難度」・「複雑さ」・「低スループット」というネガティブ要素を覆すことが可能な、原子スケール構造体の至って簡便な作製手法の開発と、原子スケールの島電極を有する単電子トランジスタである「単原子トランジスタ (Single-Atom Transistor: SAT)」の開発を掲げている。

2. 研究の目的

本研究では、金属細線でのエレクトロマイグレーション現象を利用し、金属原子を室温で一つずつ移動させることが可能な、新しい原子移動操作技術の開発を行う。具体的には、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「原子ギャップ」を作製する。これらの技術を応用し、原子 1 個～数個分の島電極を有する単電子トランジスタである「“単原子”トランジスタ」の実現を目指す。技術的には、金属細線でのエレクトロマイグレーションの発現強度を、印加電圧のその場フィードバック制御により調整する。具体的には、Field-Programmable Gate Array (FPGA) を用いたカスタムハードウェアを独自に構築し、原子を高速に移動制御する技術を開発する。これより、“エレクトロマイグレーション”という簡単な手法にて原子スケールデバイス技法の開拓を行い、単原子機能の発現・制御手法の確立を検討する。

3. 研究の方法

本研究の研究期間は 3 年である。本研究課題では、エレクトロマイグレーションにより駆動される単一原子の移動過程を、FPGA を利用したカスタムハードウェアにより精緻かつ高速に「その場」制御することが可能な手法の開発を目的としている。具体的には、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「原子ギャ

ップ」を作製する。これらの技術を応用し、原子 1 個～数個分のアイランド電極を有する単電子トランジスタである「“単原子”トランジスタ」の実現を目指す。ここでは、従来の半導体集積回路技術では「悪役」であったエレクトロマイグレーション現象を逆に活用することで、「原子スケール構造体」や「単電子・単原子デバイス」を簡便に作製・集積化することが可能な技術の確立を掲げている。

4. 研究成果

(1) 初年度 (平成 27 年度) では、FPGA を利用したエレクトロマイグレーション計測制御専用ハードウェアシステムを構築した。本システムは、Host-PC、再構成可能な FPGA、計測対象 (金属ナノ細線) から構成され、「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」のアルゴリズムがハードウェア (FPGA) に実装された形で実行される。これより、汎用プロセッサによるソフトウェア環境に比べ、計測・制御・処理のハードウェア環境による大幅な高速化が可能となる。今回構築したシステムでは、計測制御時にソフトウェア処理を介さず、計測対象である Au ナノワイヤ試料と FPGA 間で制御が行われる。これより、制御ステップ時間としてはマイクロ秒程度での高速なエレクトロマイグレーションの実行を確認し、さらに、プロセス全体の終了時間を 1 秒以内で完了させることに成功した。

(2) 第 2 年度 (平成 28 年度) では、FPGA を用いた超高速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専用のカスタムハードウェアの構築と高度化を達成した。実際に、FPGA カスタムハードウェアを用いて、Au 細線に対して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を適用した。印加電圧の超高速なフィードバックを繰り返しながら計測制御が進行していることが確認でき、プロセス時間に注目すると、300 ミリ秒で処理プロセスが終了し、構築したシステムによる計測制御の時間間隔がマイクロ秒オーダーであることが明らかとなった。また、当該制御プロセス中における Au 細線でのコンダクタンスは室温下において量子化され、離散的に変化した。これはエレクトロマイグレーションにより Au 細線が徐々に狭窄化され、室温下において量子ポイントコンタクト (=原子が 1 個～数 10 個ほどで形成された原子スケールの接合構造) が形成されたことを示している。

(3) 最終年度 (平成 29 年度) では、これまでに開発してきた FPGA 専用カスタムハードウェアによる超高速エレクトロマイグレーション

オン手法により、Au 細線に対して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を適用した。これより、Au 原子が 1 個～数個の接点構造である「原子接合」や、原子 1 個～数個のギャップ構造である「原子ギャップ」の作製に成功した。さらに、本手法を直列に接続された Au ナノギャップに適用し、同一電流を複数のナノギャップに通電させることで、2～10 素子の複数個の単電子トランジスタを同時に一括作製する技術を開発した。作製された素子は室温でゲート電圧によるクーロンブロック変調特性を確認でき、アイランド電極のサイズが 10nm 以下（原子が数 10 個以下）であることを示している。本手法をさらに精緻に制御することで、アイランド電極のサイズが原子 1 個～数個ほどの単原子トランジスタの開発が可能であることが示唆された。

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 5 件)

M. Yagi and J. Shirakashi

"Evolution of Local Temperature in Au Nanowires during Feedback-Controlled Electromigration Observed by Atomic Force Microscopy"

Appl. Phys. Lett. 110 (2017) 203105. 査読有

DOI: 10.1063/1.4984024.

K. Inoue, M. Yagi, M. Ito, T. Ito and J. Shirakashi

"Investigation of Electromigration Induced by Field Emission Current Flowing through Au Nanogaps in Ambient Air"

J. Appl. Phys. 122 (2017) 084303. 査読有

DOI: 10.1063/1.4999831.

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) (2016) 202-205. 査読有

DOI: 10.1109/3M-NANO.2015.7425487.

M. Ito, M. Yagi, K. Morihara and J. Shirakashi

"Simultaneous Fabrication of Nanogap Electrodes Using Field-Emission-Induced Electromigration"

J. Appl. Phys. 118 (2015) 014301. 査読有

DOI: 10.1063/1.4923411.

M. Ito, K. Morihara, T. Toyonaka, K. Takikawa

and J. Shirakashi

"High-Throughput Nanogap Formation by Field-Emission-Induced Electromigration"

J. Vac. Sci. Technol. B 33 (2015) 051801. 査読有

DOI: 10.1116/1.4927443.

[学会発表](計 5 件)

M. Yagi and J. Shirakashi

"Local Joule Heating in Electromigrated Au Nanowires Imaged by In Situ Atomic Force Microscopy"

12th IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC 2017), October 2-4, 2017, Singapore.

S. Sakai, Y. Iwata, Y. Katogi, M. Shiomura, Y. Kihara, M. Ito and J. Shirakashi (Invited)

"Optimization of Experimental Parameters for Fabrication of Atomic Junctions Using Ground-State Searches of Ising Spin Computing"

17th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2017), July 25-28, 2017, Pittsburgh, PA, USA.

S. Tani, M. Ito, K. Minami and J. Shirakashi

"Single-Electron Transistors with Electromigrated Au Nanogaps"

2nd International Conference on Applied Surface Science (ICASS 2017), June 12-15, 2017, Dalian, China.

J. Shirakashi

"Controlled Electromigration Method for the Fabrication of Nanoscale Junction Devices" Emerging Technologies 2016, Hotel Bonaventure Montreal, May 25-27, 2016, Montreal, QC, Canada.

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.

[その他]

ホームページ等

<http://www.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