

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630122

研究課題名(和文) ナノギャップでのエレクトロマイグレーションを利用した原子の移動操作制御手法の開発

研究課題名(英文) STRUCTURAL TUNING OF NANOGAPS USING FIELD-EMISSION-INDUCED ELECTROMIGRATION

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)・准教授

研究者番号：00315657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノギャップに発現するエレクトロマイグレーション現象を利用した原子の移動操作制御技術を開発し、強磁性単電子トランジスタやNiナノギャップ系抵抗スイッチング素子、Ni系量子ポイントコンタクトの作製を検討した。ナノギャップでの原子のマイグレーションを利用した本手法では、作製された数十nmの初期ナノギャップに対して、あらかじめ設定した電流値まで通電を行うことで、ナノギャップの構造や電気的特性を広範囲にわたってtuningすることができる。これより、ナノギャップでの原子移動を最適化することで、ナノスケールデバイスが容易に作製可能になるものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We propose a simple and easy fabrication scheme of ferromagnetic single-electron transistors (FMSETs), nanogap based resistive switches, and quantum point contacts (QPCs) composed of nanogaps at room temperature. This scheme is based on electromigration induced by a field emission current, which is so-called "activation". Using the activation method, the electrical properties of Ni nanogaps can be controlled by only adjusting the magnitude of the applied current during the activation process. The conductance of the nanogap changed in quantized steps of 0.5 G0 ( $G_0 = 2e^2/h$ ) at the final stage of activation. It is suggested that few-atom Ni contacts are achieved using Ni nanogaps controlled by the activation with precisely tuned applied current. The results clearly indicate that the activation procedure allows us to easily and simply fabricate planar-type nano-scale devices based on Ni nanogaps.

研究分野：ナノ・マイクロ科学

キーワード：ナノ構造形成・制御 ナノギャップ エレクトロマイグレーション

### 1. 研究開始当初の背景

従来、ナノテクノロジーの観点からエレクトロマイグレーション現象を利用する方法として、分子エレクトロニクス分野での数 10nm スケール金属ナノギャップ構造の形成が知られている (Yu et al., Nano Lett. (2004), S. Kubatkin et al., Nature (2003))。しかし、これら従来型のナノギャップ電極作製手法は、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ナノギャップへ適用し、原子の移動・操作を制御することで、簡便に原子スケール構造の作製を行い、新物性の探索と機能集積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、本手法を用いて、磁性 (Magnetism) と単電子帯電効果 (Single-Electron Charging Effect) を融合させた強磁性単電子デバイスの提案・検討を行ってきた (Ueno et al., JNN (2011), Kume et al., JNN (2010))。今回の研究課題では、電界放射電流誘起型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、単一原子単位での素子構造形成の可能性やそれらの集合体構造の検討、また、新物性の機能探索を行う。

### 2. 研究の目的

本研究では、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る原子の移動・操作機構を利用したナノスケール構造制御技法を開発し、同種・異種の原子からなる原子スケールサイズの量子ドット構造体 (原子スケールドット) 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、ナノギャップ電極に高電界トンネル電流を誘起し、ナノギャップ間での原子のエレクトロマイグレーションを発生させる。この際、原子の移動における物理的・化学的素過程を「その場」制御し、原子スケールドットのサイズや位置、構成原子の種類などを精緻に調整しながらナノギャップ間へ配置することで機能の集積化を達成する。同時に、原子スケールドット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気的にプローブすることで、新しい機能性の発揮やその制御技術 (素子) の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の研究期間は 2 年を予定している。まず、初年度 (平成 25 年度) では、原子接合構造や原子スケールドット構造の作製手法について検討を行う。はじめに電子線リソグラ

フィーによりナノギャップ構造を準備し、それに通電を行うことでナノギャップでのエレクトロマイグレーションを誘起させ、原子スケールでの構造制御手法を確立する。さらに、陰極側と陽極側とで構成物質材料 (強磁性・金属・半導体) を変更したヘテロジニアス化されたナノギャップシステムを準備する。その後、エレクトロマイグレーションによる原子移動により、(陽極材料とは異なる) 陰極材料を陽極側へ移動させ、異種原子ドットを作製する。

最終年度 (平成 26 年度) では、原子の供給源であるナノギャップ構造をプローブ電極として用いることで、ナノギャップ間に配置された原子スケールドットから発現する諸物性を電気的に観測する。磁性を有する原子からなるドットのサイズを 10nm 以下に制御して単電子帯電効果を発現させることで、磁性本来の物理現象、例えば、磁気抵抗効果の発現強度を大幅に増強させ、新規で有用な磁気特性の獲得を目指す。さらに、本手法を拡張することで原子スケールドットの集積化と新機能性の探索および発現を目指す。

### 4. 研究成果

(1) 初年度 (平成 25 年度) では、アクティベーション法を用い、Ni ナノギャップでの原子接合 (量子ポイントコンタクト: QPC) の形成を検討した。電子線リソグラフィにより初期ギャップ幅が数 10nm 程度の Ni ナノギャップを作製した。これらのナノギャップに対し、数 100  $\mu$ A の電流を通電することでアクティベーション法を実行した。その結果、通電電流を線形に増加させているにもかかわらず、素子のコンダクタンスが離散的に変化し、量子化コンダクタンスの 0.5 倍ごとにほぼ一定となる挙動 (コンダクタンス量子化) が室温において確認された。さらに、FPGA (Field Programmable Gate Array) を利用したエレクトロマイグレーションの超高速計測制御システムを開発し、マイグレーションによる素子のコンダクタンス変化を 1 秒以内で量子化コンダクタンス領域まで制御することに成功した。これより、本手法は、高速で精緻な原子~ナノスケール構造形成技法としての可能性が示唆される。

(2) 最終年度 (平成 26 年度) では、アクティベーション法を適用するナノギャップ電極でのナノギャップ間隔や通電電流量を適切に設定することで、室温動作可能な単電子トランジスタ (SET) の作製、SET の電気特性制御、および SET の集積化を目指した。特に、本手法を適用して作製した SET の室温 (299 K) と低温 (18 K) における電気的特性の詳細な検討を行った。電子線リソグラフィを用いて作製した Ni ナノギャップに対して、通電電流を 1nA, 100nA, 300nA, 500nA, 700nA, 1  $\mu$ A, 3  $\mu$ A と順

次増加させてアクティベーションを適用し SET の作製を行った。これより、本手法を用いることで簡便に SET が作製でき、アクティベーションでの各設定電流における Stability Diagram のさらなる検討により、SET の特性制御手法の確立が期待される。

以上の成果から、10nm 以下のサイズにて原子の種類や配置を自在に制御した原子スケールドットの作製が可能となり、その新規な物性の発現・制御手法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6件)

T. Toyonaka, K. Morihara, K. Takikawa, M. Ito and J. Shirakashi

"Controlling the Tunnel Resistance of Suspended Ni Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"

J. Vac. Sci. Technol. B 33 (2015) 02B107. 査読有

DOI: 10.1116/1.4904731.

M. Yagi, M. Ito and J. Shirakashi

"Structural Tuning of Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration with Bipolar Biasing"

Conference Proceedings, 2014 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO) (2014) 134-138. 査読有

DOI: 10.1109/3M-NANO.2014.7057332.

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

"Simultaneous Fabrication of Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"

Conference Proceedings, 2014 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO) (2014) 312-315. 査読有

DOI: 10.1109/3M-NANO.2014.7057331.

須田隆太郎、伊藤光樹、森原康平、豊中貴大、滝川主喜、白樫淳一

“ナノギャップでの原子のマイグレーション現象により作製した Ni 系ナノスケールデバイス”

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 449, ED2013-149(SDM2013-164), pp. 95-100, 2014 年 2 月. 査読無

金丸祐真、安藤昌澄、齋藤孝成、白樫淳一

“FPGA を用いた超高速フィードバック制御型エレクトロマイグレーション”

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 113, no. 449, ED2013-147(SDM2013-162), pp.

83-87, 2014 年 2 月. 査読無

N. Koshida, A. Kojima, T. Ohta, R. Mentek, B. Gelloz, N. Mori and J. Shirakashi

"Electro-Deposition of Thin Si and Ge Films Based on Ballistic Hot Electron Injection"

ECS Solid State Lett. 3 (2014) P57-P60. 査読有

DOI: 10.1149/2.002405ssl.

##### [学会発表](計6件)

Y. Kanamaru, M. Ando, R. Suda and J. Shirakashi

"Ultra-Fast Feedback-Controlled Electromigration Using FPGA"

2014 International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T 2014), July 20-25, 2014, Vail, Colorado, USA.

K. Takikawa, R. Suda, M. Ito, T. Toyonaka and J. Shirakashi

"Fabrication of Resistive Switching Devices Based on Ni Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"

2014 International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T 2014), July 20-25, 2014, Vail, Colorado, USA

T. Toyonaka, R. Suda, M. Ito, K. Takikawa and J. Shirakashi

"Control of Tunnel Resistance of Suspended Ni Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"

2014 International Conference on Nanoscience + Technology (ICN+T 2014), July 20-25, 2014, Vail, Colorado, USA.

R. Suda, M. Ito, M. Yagi, A. Kojima, R. Mentek, N. Mori, J. Shirakashi and N. Koshida

"Ballistic Electro-Deposition of Thin Si, Ge, and SiGe Films"

2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2013), September 24-27, 2013, Hilton Fukuoka Sea Hawk, Fukuoka, Japan.

R. Suda, S. Akimoto, K. Morihara and J. Shirakashi

"Electrical Properties of Nanogap-Based Single-Electron Transistors Fabricated by Field-Emission-Induced Electromigration"

IEEE NANO 2013 (2013 IEEE International Conference on Nanotechnology), August 5-8, 2013, Beijing, China.

M. Ando, S. Akimoto, R. Suda and J. Shirakashi

"Tuning of Resistance of Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration with

Feedback Control Scheme"  
IEEE NANO 2013 (2013 IEEE International  
Conference on Nanotechnology), August 5-8,  
2013, Beijing, 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・准教授

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