

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：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360117

研究課題名(和文) エレクトロマイグレーションを用いた原子移動機構による強磁性単電子帯電構造の集積化

研究課題名(英文) INTEGRATION OF FERROMAGNETIC SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS USING ELECTROMIGRATION METHODS

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) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、単電子トランジスタ(SET)の簡便な作製手法として、ナノギャップ構造でのエレクトロマイグレーションを応用した電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーション法(アクティベーション法)を提案している。これは、ギャップ間隔が数十nmのナノギャップに対する通電により、ギャップ電極先端近傍の原子が活性化されることで原子の移動が誘起され、SETの作製を行う手法である。研究成果として、アクティベーション法を適用する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SETの作製、SETの特性制御、およびSETの集積化を達成した。

研究成果の概要(英文)：We present a simple technique for simultaneous control of the electrical properties of multiple Ni nanogaps. This technique is based on electromigration induced by a field emission current and is called "activation". Simultaneous tuning of the tunnel resistance of multiple nanogaps was achieved by passing a Fowler-Nordheim (F-N) field emission current through an initial group of Ni nanogaps connected in series. Furthermore, Ni-based single-electron transistors (SETs) operating at room temperature were successfully fabricated and integrated using activation method. These results clearly imply that electromigration procedure allows us to easily and simply integrate Ni-based SETs.

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：少数電子素子 スピンエレクトロニクス エレクトロマイグレーション

1. 研究開始当初の背景

本研究ではエレクトロマイグレーションという従来の半導体集積回路技術では「悪役」であった現象を逆に活用することで、単電子トランジスタを簡単・シンプルに作製可能な斬新な技術の確立を掲げている。これより、「1 ビットあたりの処理に要するエネルギー量がより小さい高効率情報通信処理デバイス」の実現が可能となり、究極的な熱限界動作を見据えた省エネルギー・グリーンエレクトロニクス基盤の創出が期待される。

単電子デバイスの超低消費電力性能・高集積密度性能と、磁性スピンの不揮発性能という優れた特徴を融合させた強磁性単電子トランジスタ技術の確立を行うことで、電荷とスピンを記憶量とした新型記憶システム：ユニバーサルメモリーを開発し、低環境負荷で高性能という特徴を兼ね備えた新しい概念の記憶技術の獲得と普及を目指し、低炭素型高度情報通信処理システムの実現に貢献したい。

2. 研究の目的

本研究では、エレクトロマイグレーション (EM) 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う。今回、本課題で提案する電界放射電流誘起型 EM 法とは、ナノギャップ電極に対して高電界 Fowler-Nordheim トンネル電流を誘起することでナノギャップ間での原子の EM を発現させ、原子移動に伴うナノギャップ間隔の変動を素子のコンダクタンス変化としてモニターしながら所望のデバイス特性を「その場」制御しつつ単電子トランジスタを形成する技術である。これより、“通電処理のみ”という非常に簡単な手法にて単電子トランジスタの簡易作製技法とその集積化技術の開拓を行い、単電子機能発現・制御手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究の研究期間は 3 年を予定している。具体的には、エレクトロマイグレーションにより駆動される原子移動過程の「その場」制御手法を新たに開発することで、【ナノギャップ電極での原子移動制御】、【ナノギャップ電極のトンネル抵抗制御】、【強磁性単電子デバイスの作製】、【素子特性の均一化】、【歩留まりの向上】、【集積化による新規な記憶機能性の発現】を簡便かつ一気に達成する斬新な低消費電力単電子デバイス作製技術を検討する。エレクトロマイグレーション現象を原子の移動技術の観点から単電子デバイスの作製・集積化技術として検討した例は殆ど無く、本課題の革新性は高いと考えられる。即ち、エレクトロマイグレーションという、従来の半導体集積回路技術では「悪役」であった現象を逆に活用することで、「低消費電力単電子デ

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 24 年度) では、これまでに我々が提案してきた、数十 nm 程度のナノギャップを有する電極間に強制的に通電を行うことでナノギャップ電極でのマイグレーションを発現させる「アクティベーション法」の高度化を図った。今回は、多数のナノギャップを直列に接続した状態でアクティベーション法を適用し、各々のナノギャップの電気的特性や構造制御について詳細に検討を行った。

はじめに、電子線リソグラフィとリフトオフプロセスにより、100 nm 程度の初期ギャップ幅を有する Ni ナノギャップを、同一基板上に複数個直列に接続した状態で作製した。次に、これらのナノギャップに対し、100 nA 程度の電流を通電することによりアクティベーション法を実行した。その後、アクティベーション前後における 8 個の直列接続型ナノギャップの SEM 像から、直列に接続された 8 個のナノギャップが、アクティベーション後において一様に一括して狭窄化されている様子が明瞭に確認できた。この結果は、これまで報告してきた単一ナノギャップの構造制御の検討結果と同様の傾向であることから、本手法によりさらに多数のナノギャップを同時且つ self-regulated に制御することが可能であるものと示唆される。

(2) 第 2 年度 (平成 25 年度) では、アクティベーション法を用い、ナノギャップの集積化と単電子トランジスタの検討を行った。はじめに、電子線リソグラフィとリフトオフプロセスにより、数 10nm 程度の初期ギャップ幅を有する直列接続型 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、100-300nA の電流を通電することによりアクティベーション法を実行した。その結果、30 個のナノギャップの電気的特性やナノギャップ構造を一括して集積化制御することに成功した。更に、アクティベーション法により Ni ナノギャップ系強磁性単電子トランジスタを作製した。室温での素子の電気・磁気特性の評価から、クーロンブロック領域において素子の磁気抵抗 (MR) が 100% 以上に増大していることが確認された。これは、Ni で予想されている MR (11 %) よりもはるかに大きく、アクティベーション法によって作製された Ni 系強磁性単電子トランジスタにおいて MR の増強現象が室温で発現したものと考えられる。本手法により、単電子トランジスタの簡易な作製および集積化技術の可能性が示された。

(3) 最終年度 (平成 26 年度) では、単電子トランジスタ (SET) の更なる集積化を目指し、直

列接続された複数のナノギャップに対し本手法を適用し、5 素子の SET の集積化と電気的特性の同時制御について検討を行った。電子線リソグラフィにより直列に接続された Ni ナノギャップを作製した。これに対して同一電流を通電することで、各ナノギャップの一括した電気的特性制御を行った。設定電流を 100nA、300nA、500nA と順次増加させながら本手法を適用し、その都度、5 個のナノギャップの電流-電圧特性を測定した。これより、全てのナノギャップが室温において単電子帯電効果を発現していることが確認できた。以上から、直列に接続した複数個のナノギャップに対して本手法を適用することで、各ナノギャップの電気的特性を同時に制御しながら、アイランド構造を有するナノギャップ (SET 構造) が同時に作製されたものと考えられる。本手法により、単電子トランジスタの簡易な作製および集積化技術の可能性が示された。

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 1 1 件)

Y. Kanamaru, M. Ando and J. Shirakashi
"Ultrafast Feedback-Controlled Electromigration Using a Field-Programmable Gate Array"
J. Vac. Sci. Technol. B 33 (2015) 02B106.
査読有
DOI: 10.1116/1.4903929.

Y. Kanamaru, M. Ando, R. Suda and J. Shirakashi
"A Fully Customized Hardware System for Ultra-Fast Feedback-Controlled Electromigration Using FPGA"
Conference Proceedings, 2014 14th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (2014) 719-722. 査読有
DOI: 10.1109/NANO.2014.6968058.

K. Takikawa, R. Suda, M. Ito, T. Toyonaka and J. Shirakashi
"Resistive Switching Effects in Electromigrated Ni Nanogaps"
Conference Proceedings, 2014 14th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (2014) 715-718. 査読有
DOI: 10.1109/NANO.2014.6968014.

N. Koshida, R. Suda, M. Yagi, A. Kojima, R. Mentek, B. Gelloz, N. Mori and J. Shirakashi
"Low-Temperature Deposition of Thin Si, Ge, and SiGe Films Using Reducing Activity of Ballistic Hot Electrons"
ECS Trans. 64 (2014) 405-410. 査読有
DOI: 10.1149/06406.0405ecst.

N. Koshida, N. Ikegami, A. Kojima, R. Mentek, R. Suda, M. Yagi, J. Shirakashi, B. Gelloz and N. Mori

"Ballistic Hot Electron Effects in Nanosilicon Dots and Their Photonic Applications"
ECS Trans. 61 (2014) 47-54. 査読有
DOI: 10.1149/06105.0047ecst.

R. Suda, S. Akimoto, K. Morihara and J. Shirakashi
"Electrical Properties of Nanogap-Based Single-Electron Transistors Fabricated by Field-Emission-Induced Electromigration"
Conference Proceedings, 2013 13th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (2013) 87-90. 査読有
DOI: 10.1109/NANO.2013.6720862.

M. Ando, S. Akimoto, R. Suda and J. Shirakashi
"Tuning of Resistance of Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration with Feedback Control Scheme"
Conference Proceedings, 2013 13th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO) (2013) 1141-1144. 査読有
DOI: 10.1109/NANO.2013.6721060.

T. Saito, W. Lin and J. Shirakashi
"In-Situ Observation of Temperature Distribution of Microheaters Using Near-Infrared Charge Coupled Device Imaging System"
Nanosci. Nanotechnol. Lett. 5 (2013) 1076-1080. 査読有
DOI: 10.1166/nnl.2013.1671.

R. Suda, M. Yagi, T. Watanabe and J. Shirakashi
"Formation Scheme of Quantum Point Contacts Based on Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"
J. Nanosci. Nanotechnol. 13 (2013) 883-887. 査読有
DOI: 10.1166/jnn.2013.6072.

S. Akimoto, M. Ito, S. Ueno and J. Shirakashi
"Control Parameters for Fabrication of Single-Electron Transistors Using Field-Emission-Induced Electromigration"
J. Nanosci. Nanotechnol. 13 (2013) 993-996. 査読有
DOI: 10.1166/jnn.2013.6073.

X. Jiang, G. Wu, Z. Du, K. J. Ma, J. Shirakashi and A. A. Tseng
"Nanoscale Scratching of Platinum Thin Films Using Atomic Force Microscopy with DLC

Tips"
J. Vac. Sci. Technol. B 30 (2012) 021605. 査
読有
DOI: 10.1116/1.3694242.

〔学会発表〕(計10件)

M. Yagi, M. Ito and J. Shirakashi
"Structural Tuning of Nanogaps Using
Field-Emission-Induced Electromigration with
Bipolar Biasing"
4th International Conference on Manipulation,
Manufacturing and Measurement on the
Nanoscale (3M-NANO 2014), October 27-31,
2014, Taipei, Taiwan.

M. Ito, M. Yagi, K. Morihara and J. Shirakashi
"Simultaneous Fabrication of Nanogaps Using
Field-Emission-Induced Electromigration"
4th International Conference on Manipulation,
Manufacturing and Measurement on the
Nanoscale (3M-NANO 2014), October 27-31,
2014, Taipei, Taiwan.

Y. Kanamaru, M. Ando, R. Suda and
J. Shirakashi
"A Fully Customized Hardware System for
Ultra-Fast Feedback-Controlled
Electromigration Using FPGA"
IEEE NANO 2014 (2014 IEEE International
Conference on Nanotechnology), August 18-21,
2014, Toronto, ON, Canada.

K. Takikawa, R. Suda, M. Ito, T. Toyonaka and
J. Shirakashi
"Resistive Switching Effects in
Electromigrated Ni Nanogaps"
IEEE NANO 2014 (2014 IEEE International
Conference on Nanotechnology), August 18-21,
2014, Toronto, ON, Canada.

〔図書〕(計1件)

M. Ito, S. Akimoto, R. Suda and J. Shirakashi
"Chapter 13: Simultaneously Controlled
Tuning of Tunneling Properties of Integrated
Nanogaps Using Field-Emission-Induced
Electromigration"
Nanoelectronic Device Applications Handbook,
Edited by James E. Morris & Krzysztof
Iniewski, CRC Press, Taylor and Francis Group,
LLC, pp.167-179, 2013.

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.tuat.ac.jp/~nanotech/index.htm>

(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