

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22651039

研究課題名（和文） エレクトロマイグレーションによるナノギャップの原子移動制御と単電子機能発現

研究課題名（英文） CONTROL OF STRUCTURAL AND ELECTRICAL PROPERTIES 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・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00315657

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、以下の研究成果を達成した。

①ナノギャップでの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機構を用いた単電子トランジスタ（SET）作製技術の開発：電流源の極性を交互に変化させたアクティベーション手法を提案・検討した。極性変化を行う事で、ナノギャップ電極の双方から原子の移動が生じ、ナノギャップのより微細な構造制御や狭窄化に成功した。

②複数のナノギャップを直列に接続した集積型ナノギャップでの SET 構造の一括作製・特性制御・集積化技術の開発：アクティベーションにより 2 つの SET 構造の一括作製および集積化を達成した。集積した 2 つの SET はほぼ同一の特性を有し、アクティベーション条件によりナノギャップ系 SET の素子特性を同時に制御・調節しながら、SET を集積化することが可能であることが明らかとなった。さらに、本手法において得られたラテラル型 Ni/真空障壁/Ni 系磁性トンネル接合単体でのトンネル磁気抵抗効果（TMR）から、室温にて 10% 程度の TMR の観測に成功した。

研究成果の概要（英文）：We report a simple and easy method for the simultaneous control of electrical properties of multiple, integrated Ni nanogaps. This method is based on electromigration induced by a field emission current, which is the so-called ‘‘activation.’’ The tuning of tunnel resistance of nanogaps was simultaneously achieved by passing Fowler-Nordheim (F-N) field emission current through three initial Ni nanogaps connected in series. Furthermore, the integration of single-electron transistors (SETs) was also achieved by simultaneously performing the activation for the series-connected nanogaps. Two simultaneously activated devices displayed Coulomb blockade properties, and Coulomb blockade voltage of each device was clearly modulated by the gate voltage. Hence, two SETs with similar electrical properties were successfully integrated by the activation procedure. These results indicate that the activation procedure is suitable for the simultaneous control of structural and electrical properties of multiple nanogaps and allows us to integrate planar-type nanogap-based SETs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	0	1,500,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	480,000	3,580,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ ナノ材料・ナノバイオサイエンス

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

本課題では、「電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーションによるナノデバイス作製技法の開発」と、「電荷とスピンを制御できる強磁性単電子デバイス・システムの実現」を掲げている。具体的には、ナノギャップ電極でのエレクトロマイグレーションにおける物理的・化学的素過程を「その場」制御することで、所望の特性を有するナノデバイスの簡易な作製技術を開発する。実際に「電荷とスピン（電子の2自由度）の制御が可能な強磁性単電子デバイス」を作製し、「強磁性単電子デバイスの集積化」を実現する。強磁性単電子デバイスは申請者が数年前から独自に提案・検討してきた新型デバイスであり、単電子帯電効果（電荷）とスピン依存トンネル効果（スピン）の相互作用により、トンネル磁気抵抗効果の増強現象やヒステリシス現象など、特に記憶素子として有用な新機能を発揮できる。これより、エレクトロマイグレーションを利用した新規な作製技法によりナノデバイスの簡単な作製・集積化に関する知見を明らかにし、次世代ナノエレクトロニクス基盤技術を構築する。

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利活用することで、単電子トランジスタを簡単に作製可能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処理デバイス」の実現が可能となることから、省エネルギーエレクトロニクス基盤の創出が期待される。本課題では、①電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーションにより駆動される原子の移動機構を用いた単電子デバイスの簡単な作製技術を開発する。さらに本技術を用いて、②電荷とスピン（電子の2自由度）の制御が可能な強磁性単電子デバイス集積化技術を開発する。

### 2. 研究の目的

本研究では、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う。本研究にて提案する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”）とは、ナノギャップ電極に対して高電界Fowler-Nordheim（FN）トンネル電流を誘起

することでナノギャップ電極間での原子のエレクトロマイグレーションを発現させ、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シンプルな作製技法とその集積化技術の開拓を行い、室温環境下での単電子機能発現・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2年を予定している。初年度（平成22年度）では、強磁性単電子デバイス構造作製技術として「電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーションによるナノギャップ電極のトンネル抵抗制御技術の開発」に取り組む。続いて、「強磁性単電子トランジスタ構造の作製」を行い、単電子帯電効果の観測を目指す。最終年度（平成23年度）では、「電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーション技法による単電子トランジスタ集積化技術の開発」を行う。ここでは、独自設計のプロブカードとマルチチャンネル出力電源を組み合わせることで10個程度のナノギャップ電極を同時に通電処理し、比較的高スループットで強磁性単電子トランジスタの集積化を達成することが可能な作製技法の検討を行う。

### 4. 研究成果

(1) 初年度（平成22年度）では、電流源の極性を交互に変化させたアクティベーション技法を開発し、実際にナノギャップの狭窄化と作製制御の検討を行った。はじめに、電子線リソグラフィーを用いて、ギャップ幅が数10 nm程度のNiナノギャップを作製した。次にこれらの初期ナノギャップに対し、電流源を用いて、通電毎に印加電流の極性を反転させた極性変化型アクティベーションを複数回適用した。電流源の極性変化を行う事で、双方のナノギャップ電極から交互に原子の移動を生じさせることが可能となり、より微細なナノギャップの作製が期待できる。

実際に、室温での極性変化型アクティベーション時におけるナノギャップのI-V特性より、通電電流を増加させていくにつれ、アク

ティベーション停止時の電圧値が連続的に減少していくことが確認できた。これは、極性変化型アクティベーションでの通電によりナノギャップが安定的に制御・狭窄化されていることを示唆している。さらに、 $100\mu\text{A}$ の通電強度により移動した原子の個数は10万個程度と見積もられた。これより、電流源の極性を通電毎に交互に変化させることで連続的にナノギャップの特性制御が可能となり、極性変化型アクティベーション手法はナノギャップの抵抗制御および微細構造制御の制御性向上に寄与するものと考えられる。

(2) 最終年度(平成23年度)では、昨年度に確立した交互通電型アクティベーション技法を用いて、複数のナノギャップを直列に集積接続し、同時にアクティベーションを適用することで、SET構造の一括作製・特性制御・集積化について検討した。設定電流  $I_s = 10\mu\text{A}$  で同時にアクティベーションを行った後のそれぞれのナノギャップのSEM像から、ギャップ内にドット状の原子(アイランド電極)の形成が確認でき、2つのSET構造の一括作製および集積化が達成された。さらに、低温下(16K)にて詳細に電気的特性の検討を行った結果、ほぼ同一の特性を有する2つのSETを同時に作製することができた。また、集積した2つのSETの帯電エネルギーは設定電流  $I_s$  の増加に伴い2つのデバイスにて一様に減少した。

以上より、本手法は、複数のナノギャップ電極のトンネル抵抗を同時に制御することができ、さらに、ナノギャップからなるSETの素子特性を制御・調整しながらSETを集積化することが可能であることが明らかとなった。さらに、本手法において得られたラテラル型Ni/真空障壁/Ni系磁性トンネル接合単体での室温におけるトンネル磁気抵抗効果(TMR)特性を詳細に検討した結果、室温にて、10%程度のTMRの観測に成功した。また、室温でのバイアス電圧依存性からは  $V_{\text{half}} = 200 - 300\text{mV}$  が得られ、これは、SET動作時に必要とされるドレイン電圧とほぼ同じ設定電圧条件であることから、強磁性単電子トランジスタにおいても室温にてトンネル磁気抵抗効果の観測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14件)

①S. Ueno, Y. Tomoda, W. Kume, M. Hanada, K. Takiya and J. Shirakashi

"Integration of Single-Electron Transistors Using Field-Emission-Induced Electromigration"

J. Nanosci. Nanotechnol. 11 (2011) 6258-6261. 査読有

②A. A. Tseng, C. J. Kuo, S. Jou, S. Nishimura and J. Shirakashi

"Scratch Direction and Threshold Force in Nanoscale Scratching Using Atomic Force Microscopes"

Appl. Surf. Sci. 257 (2011) 9243-9250. 査読有

③安武龍太郎、渡邊敬登、上野俊介、北川潤、白樫淳一

"分割型電圧フィードバックエレクトロマイグレーション法を用いた室温動作可能なプレナー型強磁性トンネル接合素子の作製"

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 110, no. 423, ED2010-195(SDM2010-230), pp.19-23, 2011年. 査読無

④A. A. Tseng, J. Shirakashi, S. Jou, J. C. Huang and T. P. Chen

"Scratch Properties of Nickel Thin Films Using Atomic Force Microscopy"

J. Vac. Sci. Technol. B 28 (2010) 202-210. 査読有

⑤A. A. Tseng, J. Shirakashi, S. Nishimura, K. Miyashita and Z. Li

"Nanomachining of Permalloy for Fabricating Nanoscale Ferromagnetic Structures Using Atomic Force Microscopy"

J. Nanosci. Nanotechnol. 10 (2010) 456-466. 査読有

⑥上野俊介、友田悠介、久米彌、花田道庸、滝谷和聡、白樫淳一

"電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーションによる単電子トランジスタの集積化"

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 109, no. 422, ED2009-202(SDM2009-199), pp.35-39, 2010年. 査読無

⑦滝谷和聡、友田悠介、渡邊敬登、久米彌、上野俊介、白樫淳一

"電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーション法によるプレナー型強磁性トンネル接合の作製"

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 109, no. 422, ED2009-203(SDM2009-200), pp.41-45, 2010年. 査読無

[学会発表] (計 13 件)

① M. Yagi, R. Suda, T. Watanabe and J. Shirakashi

"Fabrication of Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration with Alternating Current Bias"

International Conference on Nanoscience and Technology, China 2011 (ChinaNANO 2011), September 7-9, 2011, Beijing, China.

② K. Takiya, T. Watanabe and J. Shirakashi  
"Fabrication of Planar-Type Ni/Vacuum/Ni Tunnel Junctions Based on Ferromagnetic Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"

55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM-2010), November 14-18, 2010, Atlanta, GA, USA.

③ K. Takiya, Y. Tomoda, W. Kume, S. Ueno, T. Watanabe and J. Shirakashi

"A Newly Investigated Approach for the Control of Tunnel Resistance of Nanogaps Using Field-Emission-Induced Electromigration"

International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T 2010), August 23-27, 2010, Beijing, China.

④ S. Ueno, Y. Tomoda, W. Kume, M. Hanada, K. Takiya and J. Shirakashi

"Integration of Single-Electron Transistors Using Field-Emission-Induced Electromigration"

10th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2010)-Joint Symposium with NANO KOREA 2010, August 17-20, 2010, Seoul, Korea.

⑤ K. Takiya, Y. Tomoda, W. Kume, S. Ueno, T. Watanabe and J. Shirakashi

"Tuning of Tunnel Resistance of Nanogaps by Field-Emission-Induced Electromigration Using Current Source Mode"

10th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2010)-Joint Symposium with NANO KOREA 2010, August 17-20, 2010, Seoul, Korea.

[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

竹村 泰司 (TAKEMURA YASUSHI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30251763