

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360136

研究課題名（和文） 単電子帯電構造を用いた磁性ナノデバイスの作製と
ゲート電界による磁気抵抗の変調制御研究課題名（英文） STUDY OF FERROMAGNETIC SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS
CONTROLLED BY GATE ELECTRIC FIELDS

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エレクトロマイグレーションを用いたナノパターンニング技術の開発：電荷の移動に伴い誘起されるエレクトロマイグレーション現象を「その場」制御し、簡便に 10nm 以下の単電子帯電構造を作製することに成功した。

②強磁性単電子デバイス技術の開発：電荷とスピン（電子の2自由度）の制御が可能な、これまでに無い新しいデバイス技術を開発した。具体的には、Ni系強磁性単電子トランジスタを作製し、室温動作やNi系強磁性トンネル接合からのトンネル磁気抵抗効果の観測に成功した。

研究成果の概要（英文）：We report a novel technique for the fabrication of planar-type Ni-based single-electron transistors (SETs) using electromigration method induced by a field emission current. Coulomb blockade voltage of the devices operated at 300 K was clearly modulated by the gate voltage quasi-periodically, resulting in the formation of multiple tunnel junctions of the SETs at room temperature. In addition, the resistance of the Ni nanogaps was varied by applying magnetic fields, and magnetoresistance (MR) ratio exhibited approximately 9 % at 299 K with the bias voltage of 33 mV. These results clearly imply that electromigration procedure allows us to easily and simply fabricate planar-type Ni-based SETs operating at room temperature.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：ナノエレクトロニクス、ナノテクノロジー

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

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、情報処理技術の高度化を達成するための、高集積・超低消費電力で長寿命な革新的次世代デバイスとして、強磁性材料

により構成される単電子帯電構造デバイス：強磁性単電子デバイス技術の開発を行う。強磁性体で単電子デバイスを実現すればスピンの揃った単電子輸送が可能となり、単電

子系での超低消費電力性能とスピン系での不揮発性能という利点を併せ持つ、高集積化においても低消費電力で不揮発な、電荷とスピン双方を情報記憶量とした新しい概念の高性能記憶システムなどを提案・実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、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デバイス技術の開発を目的とする。強磁性体で単電子デバイスを作製すれば、スピン偏極した単電子輸送が可能となり、電荷とスピン双方に情報を付与することで新しい概念の記憶素子を提案できる可能性がある。このためには、プレナー型構造の強磁性トンネル接合を 10nm 以下に微細化する技術が要求される。

本課題ではこれまでに走査型プローブ顕微鏡を利用したナノリソグラフィ技術を用いてデバイスを開発してきたが、スループットが低い問題があり、短時間で多数のデバイスを作製することが困難であった。そこで本研究期間内では、スループットの向上を目指し、①エレクトロマイグレーションを応用した新しいナノパターンニング技術の開発を行い、②本手法により強磁性単電子帯電構造の作製を行うことで磁気抵抗効果の増強・変調現象を確認し、素子構造・サイズに対するその規則性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の研究期間は 3 年を予定している。初年度（平成 20 年度）では、強磁性単電子デバイス構造作製技術として「エレクトロマイグレーションを用いたナノパターンニング技術の開発」に取り組む。続いて、次年度（平成 21 年度）では、本手法を用いて実際に「強磁性単電子デバイス構造の作製」を行う。最終年度（平成 22 年度）には、強磁性単電子デバイス構造の素子特性を詳細に検討し、「単電子帯電構造のサイズとトンネル磁気抵抗の変調制御特性」にかかる関連性を明らかにし、新しい記憶素子としての可能性を探求する。

4. 研究成果

(1) 初年度（平成 20 年度）では、ナノギャップ電極に対して、高電界トンネル機構に基づく電界放射電流（FN トンネル電流）により誘起されたエレクトロマイグレーションの発現強度を「その場」でコンダクタンス制御

することで、所望の単電子帯電構造（アイランド）を作製・制御する技術を開発した。

はじめに、電子線リソグラフィにて 50nm 以下のギャップ間隔をもつ Ni 系ナノギャップ電極を作製した。作製直後の抵抗は数百 TΩ 程度と、ギャップ間隔を反映した非常に大きな値を示した。次に、作製したナノギャップ電極に対し電圧を印加して電流を流し、ある電流で通電プロセスを止めた時の抵抗の制御性について検討を行った。その結果、ナノギャップ電極に流す電流を大きくするほど通電後の抵抗が小さくなることを確認し、通電前後で 9 桁程度の抵抗減少が見られた。通電前後の典型的なナノギャップ電極の AFM 像から、通電によりギャップ近傍の Ni 原子が移動することで抵抗が減少したと考えられ、本手法では通電電流のみにより抵抗値が制御可能なことを示唆している。これより、エレクトロマイグレーションを用いた新しいナノ加工技術の知見を得ることが出来た。

(2) 第 2 年度（平成 21 年度）では、昨年度に確立したナノギャップ電極間での電界放射電流誘起型エレクトロマイグレーション法を利用したプレナー型ナノスケルトンネルデバイス作製技術（アクティベーション法）により、強磁性材料として Ni を用いたプレナー型強磁性単電子トランジスタ（FMSET）を作製した。

アクティベーション時の各種制御パラメータを検討することで、FMSET の素子特性制御を行った。これらの検討から、室温下において明瞭な単電子帯電効果の観測に成功し、ナノギャップ電極での初期ギャップ幅やアクティベーション時の設定電流値が FMSET 特性を制御する上で重要なパラメータであることが判明した。実際に、これらを調整することで、FMSET の帯電エネルギーを制御することに成功した。以上から、電界放射電流を利用したエレクトロマイグレーション現象の発現による新しいナノ加工技術の知見を得ることが出来た。本手法をナノギャップ電極に対して適用することで単電子トランジスタを簡便に作製でき、アクティベーション法による容易な単電子デバイス特性制御の可能性が示された。

(3) 第 3 年度（平成 22 年度）では、昨年度に確立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）により、強磁性材料として Ni を用いたプレナー型強磁性単電子トランジスタ（Ni-FMSET）の特性制御手法の確立と Ni-FMSET の集積化技術の開発に成功した。

具体的にはナノギャップ電極の初期ギャップ幅とアクティベーション時の設定電流

を組み合わせて調整することで、室温動作が可能な FMSET の帯電エネルギーを詳細に制御することができた。さらに、直列に接続された集積化ナノギャップヘアクティブーションを適用することで、2つの FMSET の同時作製とその集積化に成功した。

また、エレクトロマイグレーション技法を用いて得られたプレナー型 Ni/真空障壁/Ni 系強磁性トンネル接合での室温における磁気抵抗 (MR) 特性の測定結果から、室温下において 9% 程度の MR 比を観測した。抵抗値が増大する磁化反平行状態の磁場範囲は 300~400 Oe 程度であり、これは、当該素子の Ni 電極形状に対するマイクロ磁気シミュレーション (OOMMF) による計算結果と定性的な一致が見られた。即ち、ナノギャップが真空障壁として機能し、ナノギャップの両端にある Ni ソース・ドレイン電極の形状差を反映した形状磁気異方性によりプレナー型 Ni/真空障壁/Ni 系強磁性トンネル接合が形成され、室温にてトンネル磁気抵抗効果が発現したものと考えられる。

以上より、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り単電子トランジスタ構造の簡易作製手法が開発され、強磁性単電子デバイス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 13 件)

- ① W. Kume, Y. Tomoda, M. Hanada and J. Shirakashi
"Fabrication of Single-Electron Transistors Using Field-Emission-Induced Electromigration"
J. Nanosci. Nanotechnol. 10 (2010) 7239-7243. 査読有
- ② S. Itami, Y. Tomoda, R. Yasutake and J. Shirakashi
"Influence of Feedback Parameters on Resistance Control of Metal Nanowires by Stepwise Feedback-Controlled Electromigration"
J. Nanosci. Nanotechnol. 10 (2010) 7464-7468. 査読有
- ③ J. Shirakashi (Invited)
"Scanning Probe Microscope Lithography at the Micro- and Nano-Scales"
J. Nanosci. Nanotechnol. 10 (2010) 4486-4494. 査読有
- ④ Y. Tomoda, M. Hanada, W. Kume, S. Itami,

T. Watanabe and J. Shirakashi

"Fabrication of Planar-Type Ferromagnetic Tunnel Junctions Using Electromigration Method and Its Magnetoresistance Properties"
J. Phys. Conf. Ser. 200 (2010) 062035. 査読有

- ⑤ A. A. Tseng, J. Shirakashi, S. Nishimura, K. Miyashita and A. Notargiacomo
"Scratching Properties of Nickel-Iron Thin Film and Silicon Using Atomic Force Microscopy"
J. Appl. Phys. 106 (2009) 044314. 査読有
 - ⑥ Y. Tomoda, K. Takahashi, M. Hanada, W. Kume, S. Itami, T. Watanabe and J. Shirakashi
"Magnetoresistance Properties of Planar-Type Tunnel Junctions with Ferromagnetic Nanogap System Fabricated by Electromigration Method"
IEEE Trans. Mag. 45 (2009) 3480-3483. 査読有
 - ⑦ Y. Tomoda, K. Takahashi, M. Hanada, W. Kume and J. Shirakashi
"Fabrication of Nanogap Electrodes by Field-Emission-Induced Electromigration"
J. Vac. Sci. Technol. B 27 (2009) 813-816. 査読有
 - ⑧ K. Takahashi, Y. Tomoda, S. Itami and J. Shirakashi
"Control of Channel Resistance on Metal Nanowires by Electromigration Patterning Method"
J. Vac. Sci. Technol. B 27 (2009) 805-809. 査読有
 - ⑨ S. Kayashima, K. Takahashi, M. Motoyama and J. Shirakashi
"Wide-Range Control of Tunnel Resistance on Metallic Nanogaps Using Migration"
J. Phys. Conf. Ser. 100 (2008) 052022. 査読有
- [学会発表] (計 16 件)
- ① S. Ueno, Y. Tomoda, W. Kume, M. Hanada, K. Takiya and J. Shirakashi
"Field-Emission-Induced Electromigration Method for the Integration of Single-Electron Transistors"
International Conference on Nanoscience and Technology (ICN+T 2010), August 23-27, 2010, Beijing, China.
 - ② W. Kume, Y. Tomoda, M. Hanada and J. Shirakashi
"Fabrication of Single-Electron Transistors

Using Field-Emission-Induced Electromigration"
International Conference on Nanoscience and
Technology China 2009 (ChinaNANO 2009),
September 1-3, 2009, Beijing, China.

- ③ Y. Tomoda, K. Takahashi, M. Hanada,
W. Kume and J. Shirakashi
"Fabrication of Nanogap Electrodes by
Field-Emission-Induced Electromigration"
The 2008 International Conference on
Nanoscience + Technology (ICN+T 2008), July
21-25, 2008, Keystone, CO, USA.

〔図書〕（計2件）

- ① A. A. Tseng, L. Pellegrino and J. Shirakashi
"Nanofabrication Using Atomic Force
Microscopy"
Encyclopedia of Nanoscience and
Nanotechnology, Chapter 287, pp.1-37, Edited by
Hari Singh Nalwa, American Scientific
Publishers, June 2010.

- ② 白樫淳一
“第5章プロセス技術 第2節ナノシリコン構
造形成 SPM 技術”
『ナノシリコンの最新技術と応用展開』（越
田信義監修、シーエムシー出版）, pp.222-235,
2010年6月.

〔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