

## 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 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246050

研究課題名（和文） 極限構造制御によるマルチフェロ融合スピントロニクス

研究課題名（英文） Multiferro fusion spintronics by ultimately controlled technique.

研究代表者

田畑 仁（TABATA HITOSHI）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：00263319

研究成果の概要（和文）：究極のメモリとして、酸化物磁性半導体（ZnO）をチャンネル層に、マルチフェロ酸化物のガーネット型フェライトをゲート絶縁層としたヘテロ接合素子において、MOS-FETタイプのマルチフェロゲート型スピントランジスタ試作を試みた。酸化物ヘテロ接合において、酸化物スピントロニクスのチャンネル電流（電荷＋スピン情報）を、強磁性強誘電体（マルチフェロ）ゲートで制御する事で、電界制御によるスピン差異運動を変調制御可能なCMOSトランジスタの優位点を活かした新タイプのデバイスのプロトタイプは、高付加価値の多値情報処理型の超高密度メモリとして、日本初のオリジナルなリコンフィギュラブルメモリ（不揮発メモリ機能を有し、適宜情報の書き換えが可能なメモリ）への適用が期待される。

研究成果の概要（英文）：“Multifunctionality” is one of the key words in recent electrical industry. If we have four-state computer memories or the memories with the function of transistor, we could have smaller computers. In order to create the new multifunctional devices, developing new functionality in materials is recent trend in material science field. We have developed new functionalities in rare earth iron garnet films and epitaxial growth of non-garnet films on garnet substrates. Nowadays, rare earth iron garnets are well known as the materials exhibit large Verdet constants and ferrimagnetism. Because of their large magneto-optical properties in infrared light region, iron garnets are utilized as optical isolators. If we could develop a new property in rare earth iron garnet, the optical isolators may have a new functionality such as enhancement of Faraday rotation with applying an electrical field.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	19,600,000	5,880,000	25,480,000
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
年度			
年度			
総計	33,600,000	10,080,000	43,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子・電気材料工学

キーワード：マルチフェロ、スピントロニクス、誘電体、磁性体、ヘテロ接合

### 1. 研究開始当初の背景

現在、Flash memory に代表されるシリコン系不揮発性メモリに加えて、次世代のメモリとして、強誘電体分極や磁性体スピン、カルコゲン系相変化、あるいは抵抗変化を利用した各種メモリの研究が世界規模で活発に実施されている。これらのメモリはその原理、素子構造に起因した長所、短所を有している。

### 2. 研究の目的

スピントロニクス、不揮発性強誘電体メモリ、マルチフェロイックス (強磁性強誘電体) の研究成果を統合することにより、従来の単一機能によるメモリを凌駕する、新しいメモリ (多値情報処理) 創製をめざした。さらに、従来の電子ビームリソグラフィ、露光技術に代表されるトップダウン技術と、自己組織化ナノ構造形成 (ボトムアップ技術) の融合による極限構造制御により、電子デバイス分野で日本発の新しい技術の潮流源となる基礎技術を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

酸化物ヘテロ接合において、酸化物スピントロニクスのチャネル電流 (電荷+スピン情報) を、強磁性強誘電体 (マルチフェロ) ゲートで制御する事で、電界制御によるスピン差異運動を変調制御可能な CMOS トランジスタの優位点を活かした新タイプのデバイスのプロトタイプを作製した。これに加えて微細加工技術におけるボトムアップナノテクノロジーという新規軸を付与を目指した。

### 4. 研究成果

本研究において、究極のメモリとして、酸化物磁性半導体 (ZnO) をチャネル層に、マルチフェロ酸化物のガーネット型フェライトをゲート絶縁層としたヘテロ接合素子において、MOS-FET タイプのマルチフェロゲート

型スピントランジスタ基礎技術を実現した。本成果は、高付加価値の多値情報処理型の超高密度メモリとして、日本初のオリジナルなリコンフィギュアラブルメモリ (不揮発メモリ機能を有し、適宜情報の書き換えが可能なメモリ) を可能とし、今後の半導体テクノロジーにおけるイノベーションと、その礎となる学理を構築するものと期待される。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 24 件)

- [1] “Lattice strains and polarized luminescence in homoepitaxial growth of a-plane ZnO” H. Matsui and H. Tabata, Applied Physics Letters, Vol. 101, Issue 23, 231901(2012) 査読有 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4769036>
- [2] “Heteroepitaxial growth and characterization of ZnO films on Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> garnet substrates” Y. Ono, H. Matsui and H. Tabata, J. Appl. Phys. Vol. 112, 103530(2012) 査読有 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4767119>
- [3] “Metallic mesh-based terahertz biosensing of single- and double-stranded DNA” T. Hasebe, S. Kawabe, H. Matsui and H. Tabata, Journal of Applied Physics, Volume 112, Issue 9, 094702(2012) 査読有 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4761966>
- [4] “Enhanced Photocurrent in Rh-Substituted  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition” M. Seki, H. Yamahara and H. Tabata, Applied Physics Express, Vol. 5, No. 11, 115801(2012) 査読有 DOI: 10.1143/APEX.5.115801
- [5] “Analysis of Sharp Dip Structures on Terahertz Transmission Spectra of Metallic Meshes” T. Hasebe, Y. Yamada,

- and H. Tabata, JJAP. Vol. 51, No. 4, 04DL03. (2012) 査読有 DOI: 10.1143/JJAP.51.04DL03
- [6] “The contribution of quantum confinement to optical anisotropy of a-plane Cd<sub>0.06</sub>Zn<sub>0.94</sub>/ZnO quantum wells” H. Matsui and H. Tabata, Appl. Phys. Lett. 100, 171910 (2012) 査読有 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4707384>
- [7] “Epitaxial thin films of p-type spinel ferrite grown by pulsed laser deposition” M. Seki, H. Tabata, H. Ohta, K. Inaba, S. Kobayashi, Appl. Phys. Lett. 99, 242504 (3pages) (2011) 査読有 <http://dx.doi.org/10.1063/1.3670045>
- [8] “Correlation between structural and luminescent properties of Eu<sup>3+</sup>-doped” W. Badalawa, H. Matsui, T. Osone, N. Hasuike, H. Harima, and H. Tabata, J. Appl. Phys. 109, 053502 (2011) 査読有 DOI:10.1063/1.3549633
- [9] “Epitaxial strain-induced magnetic anisotropy in Sm<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> thin films grown by pulsed laser deposition” H. Yamahara, M. Mikami, M. Seki, H. Tabata, J. Mag. Mag. Mat. 32, pp. 3143-3146 (2011) 査読有 DOI: 10.1016/j.jmmm.2011.06.074
- [10] “Optical dynamics of energy transfer from a CdZnO quantum well to a proximal Ag nanostructure” H. Matsui, W. Nomura, T. Yatsui, M. Ohtsu, and H. Tabata, Optics Letters, Vol. 36 NO. 19(2011) 査読有 doi: 10.1364/OL.36.003735.
- [11] “In-plane light polarization in nonpolar m-plane Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>/ZnO quantum wells” H. Matsui and H. Tabata, Appl. Phys. Lett. 2011 Appl. Phys. Lett., 98, 261902(2011) :DOI:10.1063/1.3603931 (3 pages) 査読有 DOI:10.1063/1.3603931
- [12] “Surface plasmon modes guided by Ga-doped ZnO layers bounded by different dielectrics” W. Badalawa, H. Matsui, A. Ikehata, and H. Tabata, Appl. Phys. Lett. 99, 011913 (2011); DOI:10.1063/1.3608313 (3 pages) 査読有 <http://dx.doi.org/10.1063/1.3608313>
- [13] “Label-free THz sensing of living body-related molecular binding using a metallic mesh” T. Hasebe, Y. Yamada, and H. Tabata, Biochem. Biophys. Res. Comm., 414, 192-198 (2011) 査読有 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21946066>
- [14] “Fabrication of Aligned Magnetic Nanoparticles Using Tobamoviruses” M. Kobayashi, M. Seki, H. Tabata, Y. Watababe and I. Yamashita, Nano Letters, DOI:10.1021/nl902405s (2010) 査読有
- [15] “Antiferromagnetic interaction between paramagnetic Co ions in the diluted magnetic semiconductor Zn<sub>1-x</sub>CoxO” M. Kobayashi, Y. Ishida, J. I. Hwang, Y. Osafune, A. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Saeki, T. Kawai, and H. Tabata, Phys. Rev. B81, (2010) Published February 5, (2010) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevB.81.075204
- [16] “Nano-scale resistivity reduction in single-grain of lead phthalocyanine” S. Tabuchi, Y. Otsuka, M. Kanai, H. Habata, T. Matsumoto, T. Kawai, Organic Electronics Vol.11, 916-924 査読有

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2010.02.011>
- [17] “Carrier recombination process and magneto-photoluminescence in Zn<sub>1-x</sub>CoxO layers” Z. Xiao H. Matsui, K. Katayama, K. Miyajima, T. Itoh and H. Tabata, J. Appl. Phys. 108, 013502 (6 pages) (2010) 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3455854>
- [18] “In situ Measurement of Combustion Gas Using Terahertz Time Domain Spectroscopy Setup for Gas Phase Spectroscopy” T. Uno and H. Tabata, JJAP49, (2010) 04DL17, DOI:10.1143/JJAP.49.04DL17 査読有
- [19] “Growth of epitaxial TmFeCuO<sub>4</sub> thin films by pulsed laser deposition” M. Seki, F. Iwamoto, Y. Ono, H. Tabata, J. Cryst. Growth, Vol. 312, 2273-2278 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.04.042>
- [20] “Epitaxial Thin Films of InFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and InFeO<sub>3</sub> with Two-Dimensional Triangular Lattice Structures Grown by Pulsed Laser Deposition” M. Seki, T. Konya, K. Inaba, H. Tabata, Appl. Phys. Express Vol. 3, 105801 (3 pages) 査読有 DOI: 10.1143/APEX.3.105801
- [21] “Band alignment and Excitonic localization in Cd<sub>0.08</sub>Zn<sub>0.92</sub>O/ZnO quantum wells” H. Matsui, T. Osone and H. Tabata, J. Appl. Phys. Vol.107, 093523 (7 pages) 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3359720>
- [22] “A noise-driven attractor switching device” N. Asakawa, Y. Hotta, T. Kanki, T. Kawai, H. Tabata, Phys. Rev. E, Vol. 79, 021902 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevE.79.021902
- [23] “In-plane anisotropy of polarized photoluminescence in M-nonpolar ZnO and multiple-quantum wells” H. Matsui and H. Tabata, Appl. Phys. Lett. Vol. 94, 161907 (3 pages) (2009) 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3124243>
- [24] “Experimental observation of bulk band dispersions in the oxide semiconductor ZnO using soft x-ray angle-resolved photoemission spectroscopy” M. Kobayashi, G. S. Song, T. Kataoka, Y. Sakamoto, A. Fujimori, T. Ohkochi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, H. Yamahara H. Saeki, T. Kawai and H. Tabata, J. Appl. Phys. Vol. 105, 122403 (2009) 査読有  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3116223>
- [学会発表] (計 87 件)
- [1] “Hetero Epitaxial p-n Junctions of Spinel Type Magnetic Semiconductors and Their Polaron Conducting and Magnetic Properties (Invited)”, H. Tabata, 2012 MRS Fall Meeting, Boston, Massachusetts, U.S.A, Nov. 28 (開催期間 Nov. 25-30, 2012)
- 他
- [図書] (計 4 件)
- [1] “New Developments in Photon and Materials Research, Editor: J. I. Jang”, pp. 59-81. H. Matsui and H. Tabata Nova Science Publishers, Inc. (2011) pp. 59-81. “HIGHLY POLARIZED LIGHT EMISSIONS FROM OXIDE QUANTUM NANOSTRUCTURES”
- [2] “Growth and electro-magneto-optics of oxide quantum structures based on ZnO” “H. Matsui and H. Tabata, Springer book. (2011) pp. 46 (2011)
- [3] “ 実用薄膜プロセス—機能創製・応用展開—” 田畑 仁 (共同執筆), 技術教

育出版社, 第 10 章 バイオデバイスへの  
応用 428 ページ (2009. 8. 5.)

- [4] “Electro-magneto-optics in  
polarity-controlled quantum  
structures based on ZnO、Progress in  
Nano-Electro-Optics VII, Springer  
Series in optical sciences 155 “H.  
Matsui, H. Tabata, Springer(2009)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: “自己組織化材料または微粒子を基板  
上に固定化する方法、および当該方法を用い  
て作製した基板”

発明者: 川合 知二、田畑 仁、大塚 洋一、  
山田 郁彦、松本 卓也

権利者: 同上

種類: 特許

番号: N051P38 2001. 5. 8

出願年月日: 2010 年 9 月 10 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

名称: “薄膜結晶の形成方法”

発明者: 田畑 仁、川合 知二

権利者: 同上

種類: 特許

番号: K014P06

取得年月日: Dec. 17, 2010

国内外の別: 国内

名称: “Method for immobilizing  
self-organizing material or fine particle  
on substrate, and substrate manufactured  
by using such method”

発明者: T. kawai, H. Tabata, Y. Otsuka, F.  
Yamada. And T. Matsumoto

権利者: T. kawai, H. Tabata, Y. Otsuka, F.  
Yamada. And T. Matsumoto

種類: 特許

番号: US7, 829, 546B2

取得年月日: Nov. 9, 2010

国内外の別: 海外

[その他]

ホームページ等

<http://www.bioxide.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田畑 仁 (TABATA HITOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 00263319

### (2) 研究分担者

関 宗俊 (SEKI MUNETOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 40432439

### (3) 研究分担者

松井 裕章 (MATSUI HIROAKI)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号: 80397752