

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820285

研究課題名(和文)三次元磁性量子セルラ・オートマトンによる論理演算

研究課題名(英文)Logic operation with three dimensional magnetic cellular automata

研究代表者

野村 光(Nomura, Hikaru)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20506258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2層の磁性層を有する3つの微小磁性体を用いた三次元磁性量子セルラオートマトン(3D-MQCA)によるNAND/NORゲートを提案した。MQCAは、情報の不揮発性、荷電粒子に対する高い耐性を有する。これまでNAND/NORゲートは2次元平面内でのみ実証されており、情報入出力のための端子数が制限されていた。3D-MQCAでは入出力用の端子数を増加させることができ、高機能ゲートの実現が期待される。さらに、磁気力顕微鏡を用いた、複数の磁性層からなる微小磁性体の各磁性層に対する磁化状態制御・検出手法を開発した。本手法は磁性多層膜を用いた他の研究分野での基礎研究に応用する事が可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed NAND/NOR gates based on a three dimensional magnetic quantum cellular automata (3D-MQCA). The 3D-MQCA NAND/NOR gates were composed of nanodots with magnetic multilayer. The MQCA gates have advantage of information non-volatility and high resistivity to an ionized particle. In previous studies, MQCA NAND/NOR gates were only demonstrated with two dimensional structures. Therefore, a number of input/output was limited. With 3D-MQCA, we can increase the number of input/output and create a more functional gate in a near future. To demonstrate the 3D-MQCA gates, we developed a reading and writing method for an individual magnetic layer in nanodots by magnetic force microscopy (MFM). This method will become a powerful tool for basic researches with magnetic multilayer structure.

研究分野：金属物性・材料

キーワード：磁性量子セルラオートマトン 磁気力顕微鏡

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体集積回路の微細化に伴い、リーク電流等の問題が顕在化し、基本要素である COMS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)型のトランジスタに代わる新たな材料、動作原理を導入する研究が盛んに行われている。その候補の一つとして、磁性量子セルラ・オートマトン(MQCA: Magnetic Quantum Cellular Automaton)が提案されている。1) R. P. Cowburn and M. E. Welland, Science 287 (2000) 1466.

MQCA は微小磁性体からなる磁性セルの集合体であり、磁性セル間に働く静磁気相互作用を用いて演算を実行する。室温環境下で動作し、さらに、演算実行時に磁性セルに電流を流す必要が無いためリーク電流の問題が発生しない。また、荷電粒子に対する高い耐性を持ち、動作時に素子の振る舞いを変えられるフィールドプログラマビリティを持つ。2) A. Orlov, et al. J. Nanoelectron. and Optoelectron. 3 (2008) 55. これらの利点から次世代の記憶演算素子のみならず、近年需要が高まっている原子炉近傍や宇宙空間等の特殊環境下に適した素子として注目を集めている。

微小磁性ドットを用いた MQCA に関する研究は、二次元的に配置されたものに限られていた。しかし、磁性セル間の磁気的相互作用は、二次元平面だけでなく、三次元的にも分布している。従って、三次元磁性セルラ・オートマトン(3D-MQCA: Three Dimensional Magnetic Quantum Cellular Automaton)を作製することは理論的に可能である。磁性セルを三次元的に配置することにより、さらなる高密度・高機能な素子の開発が期待される。しかしながら、三次元的に配置された磁性セルの磁化状態の読み取り・制御が困難なことから 3D-MQCA は実現されていなかった。

### 2. 研究の目的

上述した背景を受け、本研究では、磁性多層膜からなる磁性ドットを用いた論理演算ゲートの実現を最終目的とし、その目的のため以下に示す3つの目的を具体的な研究目的とした。

- (1) 磁性多層膜からなる微小磁性ドットに対する磁気力顕微鏡法を用いた磁化状態制御手法の開発。
- (2) 磁性多層膜からなる微小磁性ドットの各磁性層の磁化状態検出手法の確立。
- (3) 磁性多層膜からなる磁性ドットを用いた論理演算ゲートの構築。

### 3. 研究の方法

磁性多層膜からなる微小磁性ドットとして、Ni-20at.%Fe ならびに SiO<sub>2</sub> から構成される微小磁性ドットを Si 基板上に作製した。作製には、電子線リソグラフィ装置、イオンビームスパッタリング装置を用い、リフトオフ法を用いた。磁気力顕微鏡装置には、日

立ハイテクサイエンス社製の磁気力顕微鏡装置(SII-A300)へ、LabVIEW FPGA/Real Time OS を用い開発した独自の制御装置を付加したものを使用した。磁気力顕微鏡探針には、市販の SI-DF-40 に対して磁性薄膜を製膜し使用した。探針に対する磁性薄膜の製膜には、イオンビームスパッタリング装置を用い、四角錐状の探針の一面にのみ Co-Pt 薄膜を製膜した。磁性セルの磁化状態の取得には、磁気力顕微鏡法を用いた三次元フォースマッピング手法を用いた。磁性セルの磁化状態走査には、磁気力顕微鏡探針から発生する漏洩磁場ならびに、磁気力顕微鏡に取り付けられた外部磁場を用いた。上記の実験とは平行に、磁性体の磁化挙動をシミュレーションにより解析するため、National Institute of Standards and Technology (NIST)の開発した、The Object Oriented MicroMagnetic Frame work (OOMMF)を用いた。

### 4. 研究成果

各研究目的に対応し、以下に示す研究成果が得られた。

(1) 磁性多層膜からなる微小磁性ドットに対する磁気力顕微鏡法を用いた磁化状態制御手法の開発。

磁化状態制御(磁性マニピュレーション)手法を確立するため、Au (3 nm)/Ni-20at.%Fe (20 nm)/SiO<sub>2</sub> (40 nm)/Ni-20at.%Fe (20 nm)/Si subst. からなる微小磁性ドット(図 1(a))を用いた。探針の磁化は探針先端方向を向くよう初期化した。また外部磁場を用いることで、磁性ドットの各磁性層の磁化を同一に向けた状態を初期磁化状態とした。

図 1(b)には無磁場下にて初期磁化状態の磁性ドットに対する探針位置の変化に伴う、探針の位相信号を示している。探針高さが 90 nm 近傍まで近づいた際、位相信号に急峻な変化が観測された。これは、磁性ドットの磁化状態が変化したことに伴い、探針・試料間に働く磁気的な相互作用が変化したことを表している。その後、20.7 kA/m の外部磁場を印加しながら、再び探針位置を変化させた(図 1(c))。このとき、探針高さが約 5 nm となったところで位相信号に急峻な変化が観測された。試料の各磁性層の磁化の向きを評価するため、得られた測定データから探針が受ける磁気的ポテンシャルを計算した結果を図 1(d)に示す。赤線、青線はそれぞれ、一度目、二度目の磁性マニピュレーションに於ける探針のポテンシャル変化を示す。この図 1(d)より一度目のマニピュレーションがおこる直前まで、磁気力顕微鏡探針は正のポテンシャルを受けている。一方、二度目の磁性マニピュレーション時には、探針は同様の位置で負のポテンシャルを受けている。このことから、一度目の磁性マニピュレーションによって上層の磁化の向きを反転させたことが分かる。二度目の磁性マニピュレーション時は、磁化反転直前で探針の受けるポテンシ

ヤルが上昇している．このことから，一度目の磁性マニピュレーションでは下層の磁化状態は変化させていないことが分かる．以上の結果から，本手法を用いる事で，磁気力顕微鏡探針の高さを制御する事で，磁性多層膜からなる微小磁性体の各磁性層の磁化状態を個別に制御可能であることが示された．

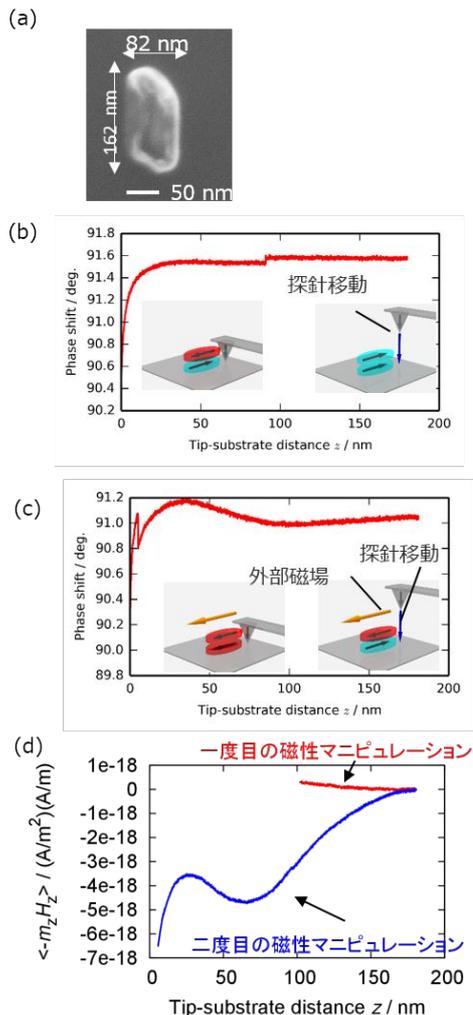


図 1. (a)磁化状態走査手法(磁性マニピュレーション)の検証に用いた磁性ドットの走査型電子顕微鏡像，(b)上部ならびに(c)磁性層を磁性マニピュレーションした際の磁気力探針の位相変化，(c)磁性マニピュレーションの際の探針が受けたゼーマンエネルギー．

(2) 磁性多層膜からなる微小磁性ドットの各磁性層の磁化状態検出手法の確立．

磁性多層膜からなる微小磁性ドットの各磁性層の磁化状態を検出するため，磁気力顕微鏡探針を微小磁性ドット近傍にて，基板に対して垂直方向に走査し画像化を取得した(y-z 磁気力像)．試料には Au (3 nm)/Ni-20at.%Fe (20 nm)/SiO<sub>2</sub> (20 nm)/Ni-20at.%Fe (20 nm)/ Si subst. からなる長軸半径 60 nm，短軸半径 30 nm の楕円柱状の磁性ドットを用いた．

図 1(a)実際に作製した試料に対して測定した高さ一定モード磁気力顕微鏡像を，図

2(b),(c)には，図中に示した模式図の方向に各磁性層の磁化状態を設定したシミュレーション像を示す．図 2(b),(c)より，一般的に用いられる基板に対して平行に走査する磁気力顕微鏡像では，上層部の磁性ドットの磁化状態が支配的であり，下層部の磁化状態を判別することは難しい事が分かる．

図 3(a)に，基板に対して垂直方向に磁気力探針を走査した際の磁気力顕微鏡像(y-z スキャン像)を示す．また，図 3(b),(c)には，各磁性層の磁化の向きが図 2(b),(c)とそれぞれ同様の場合の y-z スキャン像のシミュレーション結果を示す．図 3(b),(c)の間には，図 2(b),(c)の間では見ることのできなかった明瞭な差を確認できた．また，実際に測定された図 3(a)の結果は，図 3(b)の像と類似している事から，測定した試料の各磁性層の磁化の向きは平行であったことが分かる．以上の結果から，基板に対して磁気力探針を垂直に走査することにより，磁性多層膜からなる磁性ドットの各磁化状態を識別可能であることが示された．

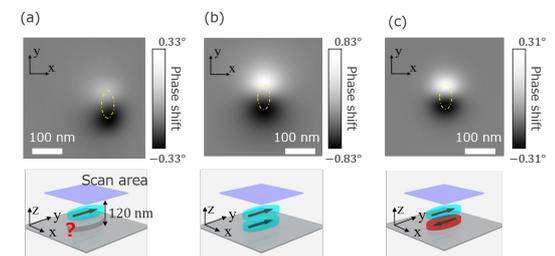


図 2 (a) 高さ一定モードで得られた磁気力顕微鏡像とマイクロマグネティクスシミュレーションにより計算された磁性層の磁化の向きが(b)平行，(c)反平行の場合の磁気力像．

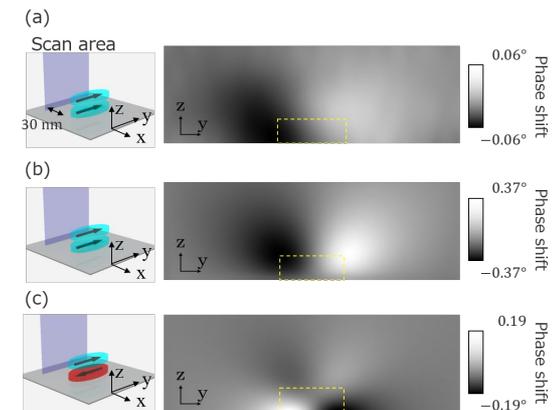


図 3 (a) 実際の試料に対する y-z スキャン磁気力像と，マイクロマグネティクスシミュレーションにより計算された磁性層の磁化の向きが(b)平行，(c)反平行の場合の y-z スキャン磁気力像．

(3) 磁性多層膜からなる磁性ドットを用いた論理演算ゲートの構築

Au (3 nm)/Ni-20at.%Fe (20 nm)/SiO<sub>2</sub> (120 nm)/Ni-20at.%Fe (20 nm)/ Si subst. 構成される 4 微小磁性ドットを用い，3D-MQCA 素子を試作した．図 4(a)に試作した 3D-MQCA 素子の走査型電子顕微鏡像を示す．図 4(b)~(e)

には、 $-25 \text{ kA/m}$  の外部磁場下での磁気力像を示す。図 4(b) は高さ一定モードによる磁気力像を、図 4(c)、図 4(d) は図中右に示した模式図の位置での  $y$ - $z$  スキャン像を示す。図 4(e) には、図 4(b) ~ (c) の磁気力像から予測される各磁性層の磁化状態を示した模式図を示す。また、図 4(f) ~ (i) には外部磁場を  $+3 \text{ kA/m}$  に変化させた際の磁気力像と、各磁性層の磁化状態の模式図を示す。これらの結果から、3D-MQCA はトリガとなる外部磁場の変化に伴い、その磁化状態を変化させる、すなわち演算を実行することが示された。

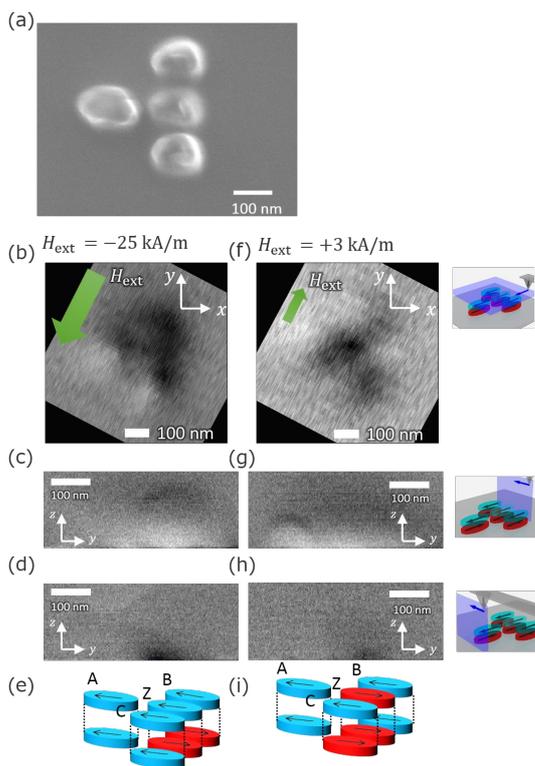


図 4 (a) 3D-MQCA 素子の走査型電子顕微鏡像。(b) ~ (e) は  $-25 \text{ kA/m}$  の外部磁場下での、(f) ~ (i) は外部磁場  $+3 \text{ kA/m}$  下での磁気力顕微鏡像と各磁性セルの磁化状態を示す模式図。(b)、(f) 中の矢印は外部磁場の向きを表す。

本研究により、三次元的に配置した磁性セルを用いて、演算が可能なが実験的に示された。また、本研究により確立された、三次元的に配置された磁性セルに対する情報の読み込み・書き込み手法は、今後多層化が予測される他の磁性デバイスに対する基礎的研究において強力なツールとなる。

## 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)

[学会発表](計 9 件)

吉岡 直倫, 野村 光, 中谷 亮一, "Shift register based on magnetic quantum cellular automata", 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月 19 日, 東京工業大学(東京都・目黒区)。

吉岡 直倫, 野村 光, 中谷 亮一, "磁性量子セルラオートマタに基づくシフトレジスタ", 材料工学談話会, 2016 年 1 月 27 日, 京都大学(京都府・京都市)。

Hikaru Nomura, Keisuke Iwaki, Ryoki Wakasa, Masashi Kusakawa, Ryoichi Nakatani, "Input and output methods for three dimensional magnetic logic gate with magnetic force microscopy (招待講演)", The International Symposium on Recent Trends in Analysis Techniques for Functional Materials and Devices, 2015 年 12 月 4 日, 大阪大学(大阪府・吹田市)。

岩城 圭亮, 若狭 凌生, 野村 光, 中谷 亮一, "磁気力顕微鏡法による 3 次元的に配置された磁性ビットへの情報入出力手法の提案", 磁気記録・情報ストレージ研究会(MR), 2015 年 10 月 22 日, 大阪大学(大阪府・吹田市)。

野村 光, 中谷 亮一, "磁性論理演算素子による磁性コンピュータのための基本素子 (招待講演)", 応用物理学会関西支部第 2 回講演会, 2015 年 9 月 30 日, 大阪大学中之島センター(大阪府・大阪市)。

岩城 圭亮, 野村 光, 中谷 亮一, "マイクロマグネティクスシミュレーションを用いた 3D-MQCA NAND/NOR ゲートの提案", 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 9 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)。

Hikaru Nomura, Naoto Tanigaki, Fumihiko Nakamura, Soichiro Miura, Ryoichi Nakatani, "Hybrid fan-out element with magnetic quantum dot cellular automata and domain wall logic", 20<sup>th</sup> International Conference on Magnetism, 2015 年 7 月 7 日, Barcelona (SPAIN)。

Keisuke Iwaki, Ryoki Wakasa, Hikaru Nomura, Ryoichi Nakatani, "Data input and output method for 3D-MQCA with MFM", 20<sup>th</sup> International Conference on Magnetism, 2015 年 7 月 7 日, Barcelona (SPAIN)。

岩城 圭亮, 野村 光, 中谷 亮一, "磁性多層膜を有する微小ドットの磁気力顕微鏡による磁化状態操作", 第 38 回日本磁気学会学術講演会, 2014 年 9 月 3 日, 慶応義塾大学(神奈川県・横浜市)。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野村 光 (Hikaru Nomura)

大阪大学・工学(系)研究科(研究員)・助教  
研究者番号: 20506258