

磁気を使った新しい論理演算素子



技術解説

中谷 亮一*, 野村 光**

New magnetic logic devices

Key Words : Magnetic dots, Logic devices, Nano-fabrication

1. はじめに

磁気を利用した機能デバイスは、ハードディスク装置に代表される情報記憶装置¹⁾、商品管理システムとして街中で見かける磁界センサなど、高度情報産業から生活に密着した民生用機器まで、幅広い分野でなくてはならない存在となっている。近年、ナノ・リソグラフィなどの超微細加工技術が磁気デバイス材料の研究手法として一般的になり、その結果、磁気を担う電子スピンの相互作用を利用するスピントロニクス分野²⁾が飛躍的に進歩している。現在、この分野において、最も盛んに研究が行われているのが、半導体メモリであるDRAMの情報揮発性の欠点を本質的に克服した磁性ランダムアクセスメモリ (Magnetic Random Access Memory, MRAM)³⁾、および、スピン・トランスファー・トルク現象⁴⁾を利用したマイクロ波オ

ッシレータ⁵⁾の開発である。これに対し、本講演者等は、微小磁性体を近接して配置した素子において、微小磁性体間の磁気的な相互作用を用いた論理演算素子を考案し⁶⁾、研究を進めてきた⁷⁻⁸⁾。

2. 磁性論理演算素子と磁性コンピュータ

磁性論理演算素子は、図1に示すように、150 nm程度以下のサイズを有する楕円形の微小磁性体(磁性セル)を4個配置した構造を有する。磁性体の厚さは20 nm程度以下である。また、磁性体の材料は典型的にはNi-20at%Fe (パーマロイ)である。

図のように、3個のInput A~Cの磁性セルが情報入力用の磁性セルである。また、Output Zは情報出力用の磁性セルである。情報は、磁化の向きが、図の右向きか左向きかをそれぞれ「1」および「0」に対応させる。Input A~Cの磁性セルに情報を入力すると情報出力用の磁性セル Output Zと磁気的な相互作用を生じる。



*Ryoichi NAKATANI
1959年7月生
名古屋大学大学院工学研究科 博士前期課程 金属工学及び鉄鋼工学専攻 (1984年)
現在、大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授 工学博士 磁性材料学
TEL : 06-6879-4082
FAX : 06-6879-4082
E-mail : nakatani@mat.eng.osaka-u.ac.jp



**Hikaru NOMURA
1980年9月生
大阪大学大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻博士後期課程 (2008年)
現在、大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 助教 博士(工学) 走査プローブ顕微鏡 微小磁性体
TEL : 06-6879-7488
FAX : 06-6879-7489
E-mail : nomura@mat.eng.osaka-u.ac.jp

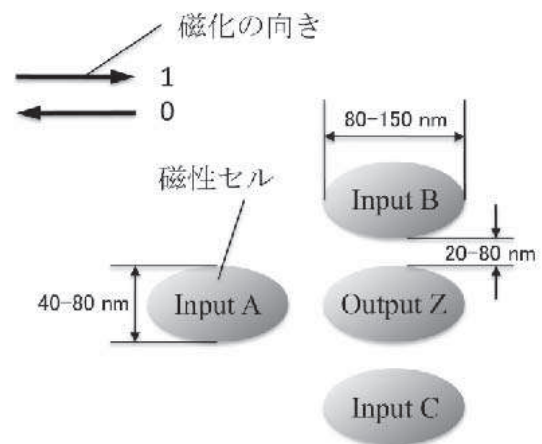


図1. 磁性論理演算素子の平面構造

図2は、生じる2種類の相互作用を模式的に示したものである。図2(a)のように、磁性セルが、そ

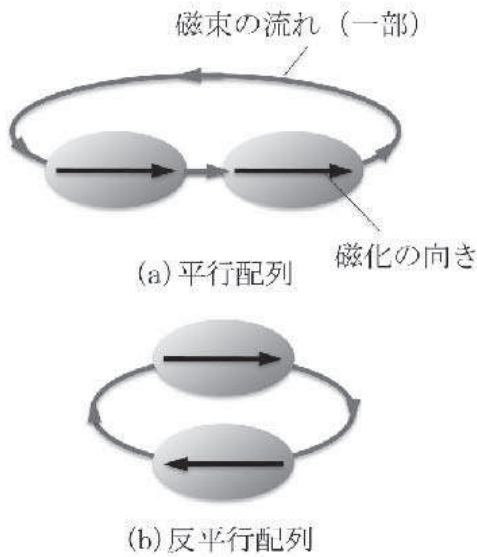


図2. 磁性論理演算素子の各配列における磁気的な相互作用

これらの長軸方向に配列している時、その漏洩磁束により、磁性セルの磁化は平行に配列した方がエネルギー（静磁エネルギー）が低い。これは、N極とS極を有する2本の棒磁石を棒の長手方向に近接させると、磁極の向きが同じ時に、2本の棒磁石が引力を生じることと同じである。この配列は、Input AとOutput Zとの関係に相当する。これに対し、図2(b)のように、磁性セルが、それらの短軸方向に配列している時、磁性セルの磁化は反平行に配列した方がエネルギーが低い。これは、2本の棒磁石を逆向きにして、それぞれの横方向から近接させた時に引力を生じることによって理解できる。この配列は、Input BあるいはCとOutput Zとの関係に相当する。

磁性論理演算素子では、上述の2種類の配列（Input AとOutput Z、Input BとOutput ZおよびInput CとOutput Zの3種類の組み合わせ）により、磁化の向きを右向きあるいは左向きにしようとする磁気力が働く。通常は、それらの磁気力だけでは演算を行わない。これは、Output Zの磁化の向きが反転するエネルギー障壁が高いためである。そのエネルギー障壁に相当する磁場を磁性セルの短軸方向に近い方向に印加すると、上述の磁気力が有効になり、上述の3種類の組み合わせのエネルギーの合計が最低になる向きにOutput Zの磁化は向く。すなわち、Output Zの磁化の向きは、上記3種類の組み合わせにおける多数決で決定されることになる。

Input A～Cに入力する情報に対する出力結果を

表1. 入力情報の組み合わせと得られた出力情報

A	B	C	Z	
0	0	0	1	N O R
0	0	1	0	
0	1	0	0	
0	1	1	0	
1	0	0	1	N A N D
1	0	1	1	
1	1	0	1	
1	1	1	0	

マイクロマグネティクス・シミュレーション⁹⁾で計算した。得られた結果を表1に示す⁶⁾。表に示すように、Input Aに「0」を入力すると、Input BあるいはCの少なくともどちらかに「1」が入力された時にOutput Zは「0」を出力する。また、Input BおよびCに「0」が入力された時にOutput Zは「1」を出力する。英語の「or」と同様に、Input BあるいはCの少なくともどちらかに「1」が入力された時にOutput Zが「1」となり、それ以外では「0」を出力する時の論理演算を「OR」と言う。表1の結果は、全くその逆で英語の「not」の「n」をつけた「NOR」論理演算となっている。

これに対し、Input Aに「1」を入力すると、Input BおよびCに「1」が入力された時にOutput Zは「0」を出力する。それ以外の場合は、「1」が出力される。英語の「and」と同様に、Input BおよびCの両方に「1」が入力された時にOutput Zが「1」となり、それ以外では「0」を出力する時の論理演算を「AND」と言う。表の結果は、全くこの逆であり、英語の「not」の「n」をつけた「NAND」論理演算となっている。

上述のように、Input Aに何を入れるかにより、同一素子で演算の種類を変えることができる。また、NORとNANDの2つの論理演算が可能であれば、実用上、全ての論理演算に対応できる。さらに、本素子は、従来の半導体素子とは異なり、演算機能そのものに電流を用いない。また、万一、演算が止まった場合も、止まった時点の情報を保持している。

現在、コンピュータ内部の記憶素子として用いる

ことが可能な、磁性体で記憶を行う磁性メモリであるMRAMは実用化になっており、また、ハードディスク装置は磁性体としての性質を利用している。従って、磁性論理演算素子が実現できれば、主要部分を磁性体の働きで動作させる磁性コンピュータが実現できる。磁性体は放射線、宇宙線、荷電粒子などに対する耐性は極めて高い。従って、宇宙空間、原子炉付近などの特殊環境においては、磁性コンピュータは極めて信頼性の高いコンピュータとなる。また、近年、太陽フレアやコロナ質量放出による電子機器の破壊が危惧されており、磁性コンピュータは、現在、これらに対する最も信頼性の高いコンピュータである。

3. 磁性論理演算素子の実験的な動作検証

前述のように、シミュレーションは磁性論理演算素子の実現性を示している。そこで、実験的に素子が実現できるかについて検証を行うことにした。図3に検証に用いた素子の走査型電子顕微鏡像を示す。材料としては、厚さ20 nmのNi-20at%Fe合金を用

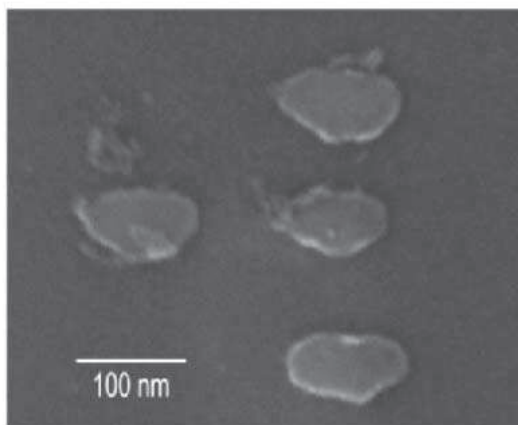


図3. 検証に用いた素子の走査型電子顕微鏡像

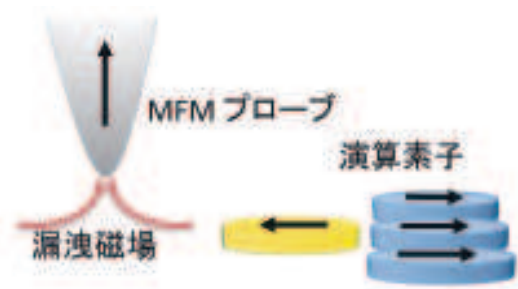


図4. 検証に用いた素子への情報入力方法

いた。作製した素子では、Output Zのサイズを小さくしている。これは、Output Zからの漏洩磁界を低くし、情報入力用のセルの演算過程における磁化状態に大きな影響を与えないことを目的としている。また、演算素子における情報の入力は、図4に示すように磁気力顕微鏡(MFM)のプローブを磁性セルに近接させることによって行った。

図5に、情報を入力した時の磁化状態と演算後の磁化状態の一例を示す。演算前には、Input Aには「1」を、Input BおよびCには「0」を入力した。Input Aに「1」を入力したため、本素子はNAND論理演算を行うはずである。(a)、(b)とも、左側の図が演算前、右側の図が演算後である。また、(a)では、Output Zにあらかじめ「0」を入力してあり、(b)では、Output Zにあらかじめ「1」を入力してある。この素子に、磁性セルの長軸方向から116度傾けた正弦波形のクロック磁界を印加すると、演算が実行される。図の(a)に示すように、Output Zの情報は「0」から「1」に変化する。また、図の(b)に示すように、Output Zの情報が「1」である場合、情報は「1」のままであり、変化しない。この結果より、情報出力セルの状態にかかわらず、NAND論理演算が行われていることがわかる。

図6には、Input A、B、Cに「1」を入力した場合の結果を示す。素子は、図5の場合と同一である。Input Aに「1」を入力したため、本素子はNAND論理演算を行うはずである。前と同様に、(a)、(b)とも、左側の図が演算前、右側の図が演算後である。

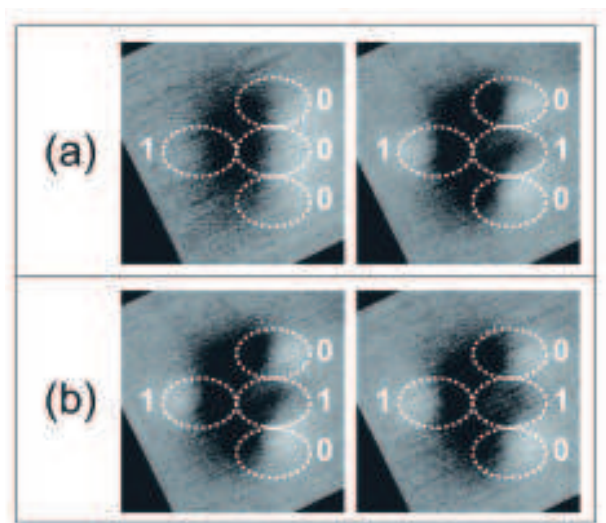


図5. 情報入力した直後と演算後の磁化状態

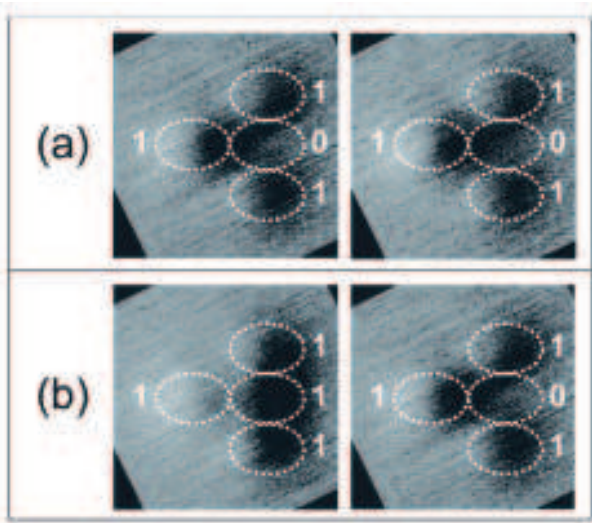


図6. 情報入力した直後と演算後の磁化状態

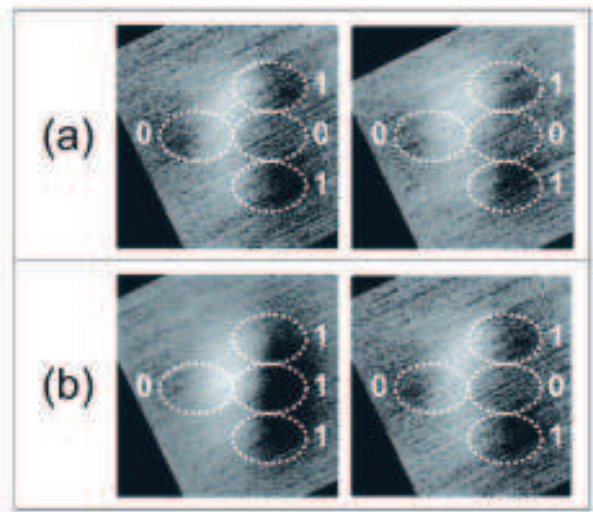


図8. 情報入力した直後と演算後の磁化状態

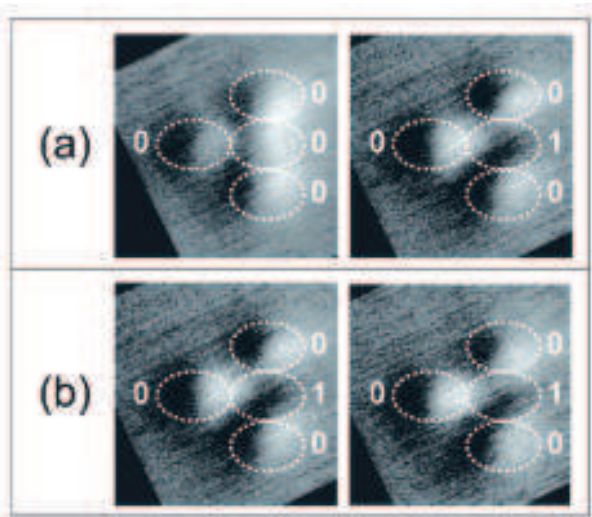


図7. 情報入力した直後と演算後の磁化状態

図の (a) に示すように、情報出力セル Z が「0」の状態になっている場合には、情報は「0」のままであり、変化しない。これに対し、図の (b) に示すように、Output Z が「1」の状態になっている場合には、Output Z の情報は「1」から「0」に変化する。やはり、情報出力セルの状態にかかわらず、NAND 論理演算が行われていることがわかる。

図7に、Input A、B、Cに「0」を入力した場合の結果を示す。Input Aに「0」を入力したため、本素子は NOR 論理演算を行うはずである。素子は、図5および6の場合と同一である。前と同様に、(a)、(b)とも、左側の図が演算前、右側の図が演算後である。図の (a) に示すように、Output Z が「0」の状態になっている場合には、Output Z の情報は「0」から「1」に変化する。これに対し、図の (b) に示

すように、Output Z が「1」の状態になっている場合には情報は「1」のままであり、変化しない。情報出力セルの状態にかかわらず、NOR 論理演算が行われていることがわかる。

図8に、Input Aには「0」を、Input BおよびCには「1」を入力した結果を示す。Input Aに「0」を入力したため、本素子は NOR 論理演算を行うはずである。素子は、上述の結果を示した試料である。また、(a)、(b)とも、左側の図が演算前、右側の図が演算後である。図の (a) に示すように、Output Z が「0」の状態になっている場合には情報は「0」のままであり、変化しない。これに対し図の (b) に示すように、Output Z が「1」の状態になっている場合には、Output Z の情報は「1」から「0」に変化する。従って、情報出力セルの状態にかかわらず、NOR 論理演算が行われていることがわかる。

全ての情報入力状態に対して、上述の実験と同様の検討を行った結果、同一素子において、情報入力セル A に「1」を入力した時には、NAND 論理演算を、情報入力セル A に「0」を入力した時には、NOR 論理演算を実行することが確認できた⁸⁾。

4. まとめ

微小磁性体間の交換相互作用を利用した論理演算素子において、NAND および NOR 論理演算を検証したのは、これが世界唯一である。今後は、さらに高度な演算を行う素子を開発するために、複数の演算素子を配置し、並列あるいは連続的に演算を行う実験を行う予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省研究拠点形成費補助金グローバルCOEプログラム「構造・機能先進材料デザイン教育研究拠点」(大阪大学)、総務省特定領域重点型研究開発(SCOPE-S)の各研究費を受けて遂行された。

References

- 1) 沼澤潤二、梅本益雄、奥田治雄、喜連川優、共著、情報ストレージ技術、コロナ社 (2007)
- 2) 猪俣浩一郎、まぐね、**6**、37-48 (2011)
- 3) 宮崎照宣、水上成美、渡邊大輔、Feng Wu、まぐね、**5**、164-170 (2010)
- 4) J. Z. Sun, D. J. Monsma, D. W. Abraham, M. J. Rooks and R. H. Koch, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2202-2204 (2002)
- 5) W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek and T. J. Silva, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 027201 (2004)
- 6) S. A. Haque, M. Yamamoto, R. Nakatani and Y. Endo, *J. Magn. & Magn. Mater.*, **282**, 380-384 (2004)
- 7) R. Nakatani, H. Nomura and Y. Endo, *J. Phys. Conf. Ser.*, **165**, 012030 (2009)
- 8) H. Nomura and R. Nakatani, *Appl. Phys. Exp.*, **4**, 013004 (2011)
- 9) M. R. Scheinfein and J. L. Blue, *J. Appl. Phys.* **69**, 7740 (1991)

