

# Fabrication of Regularly Aligned Y-Shaped Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> Arrays by the Damascene Technique and Their Characterization

T. Yamamoto\*, K. Machida\*\*, T. Yamamoka\*\*\*, T. Ishibashi\*, and K. Sato\*

\*Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, *Koganei, Tokyo 184-8588, Japan*

\*\*Materials Science, Science & Technical Research Laboratories, NHK, *Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan*

\*\*\*SHI NanoTechnology Inc., *Chuo-ku, Tokyo 104-0041, Japan*

Regularly aligned arrays (linear and honeycomb arrangements) of Y-shaped Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> (permalloy) nanodots buried in silicon wafers were fabricated using the damascene technique, and electron beam lithography (EB). The distributions of surface magnetization were observed by means of magnetic force microscopy (MFM), and the internal spin distributions were analyzed by a micromagnetic simulation using the Landau-Lifshitz-Gilbert equations (LLG eq.). Spin distributions are determined by the effects of geometric shapes and magnetostatic interactions working between adjacent dots.

**Key words:** magnetic structure, permalloy, magnetic force microscope, LLG simulation

## ダマシン法によるY字型Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>構造規則配列の作製と磁気的評価

山本尚弘\*・町田賢司\*\*・山岡武博\*\*\*・石橋隆幸\*・佐藤勝昭\*

\*東京農工大学大学院工学教育部, 東京都小金井市中町 2-24-16 (〒184-8588)

\*\*NHK放送技術研究所, 東京都世田谷区砧 1-10-11 (〒157-8510)

\*\*\*エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社, 東京都中央区新富 2-15-5 (〒104-0041)

### 1. はじめに

高密度磁気記録デバイス, 不揮発性磁気メモリに代表される磁気応用デバイスの更なる微細化・高密度化のためには, ナノスケールの磁性体の磁化分布, 磁化反転過程の解明が不可欠であると考えられている<sup>1)</sup>. ナノスケールの磁性体に複雑な磁気構造が現れることは以前から知られているが<sup>2)</sup>, 特に, サブミクロンサイズ以下に加工された磁性体では, 磁壁形成の臨界サイズ (数百nm程度) に近く, 隣接間距離の減少により静磁的相互作用による影響も大きく寄与してくるようになり, 従来のマクロな磁性体には見られない磁気的挙動を示すことが知られている.

我々はこれまでにサブミクロンサイズの磁性体構造の磁気秩序に注目し, ダマシン法を用いSi基板に様々な形状に加工した埋め込み型微小パーマロイ (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>) 規則配列を作製し, MFM(Magnetic Force Microscope)による表面磁化分布の観察を行うとともに, Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を数値的に解く手法<sup>3)</sup>を用いた三次元マイクロ磁気シミュレータを開発し, 微細構造内部の磁化分布や磁化反転過程について詳細に解析し報告を行ってきた<sup>4,5)6)</sup>.

4本の腕から構成される十字型形状のパーマロイドット規則配列構造においては, 2本の腕端部に正の磁極, 残りの2本の腕端部に負の磁極を形成し, 腕部内の磁化は全て長手方向に単磁区となる独特な磁化分布の解析に成功した<sup>6)</sup>. また, 隣接ドット間で静磁的相互作用が影響したと考えられる整然と並んだ正負磁極の磁気秩序も観測された. 本研究では, 十字型から腕を一本外し, 3本の腕とした幾何学的にフラストレーションを持つY字形状に着目し, 静磁的相互作用の弱い系と強い系の2種類のドット配列における磁化分布を, MFM, マイクロ磁気シミュレーションによって詳細に解析した.

### 2. 実験方法

#### 2.1 試料作製

熱酸化Si(100)基板にEB(Electron Beam)リソグラフィレジスト (日本ゼオン製, ZEP-520A)を, 第一段階は回転数500 rpmで5秒間, 第二段階は回転数5000 rpmで60秒間スピコートし, 180°C, 2分間のベーキング処理後, EBリソグラフィ装置(ELIONIX製, ELS-7300ULH)でパターンの描画を行った. 描画パターンは幅300 nm, 長さ1.4 μmの腕を, 中心角度120°でY字型に結合させた単位構造を, 6 μm間隔で直線状に配列させたもの(以降, 直線状配列と称す), 隣接単位構造間距離400 nmで蜂の巣格子状に配列させたもの(以降, 蜂の巣格子状配列と称す)の2種類のパターンを設計した. 次に, 現像処理によりマスクパターンを形成し, CF<sub>4</sub>ガスを用いた400 WのRFプラズマ源によるドライエッチング処理で基板にパターンの転写を行った. その際のエッチングレートは1.5 nm/secとした. その後, 磁性材料としてパーマロイ (Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>)を電子ビーム蒸着法により堆積し, 表面の余分な凸凹を化学的機械研磨法(Chemical Mechanical Polishing, CMP)および綿棒で磨き表面の平坦化を施すことにより, Si埋込型規則配列を作製した.

#### 2.2 磁気的評価

パーマロイ構造規則配列の残留磁化状態における磁化分布は, MFM(SPI4000 Nano-Navi/E-sweep, SHI NanoTechnology製)を用いて行った. この装置は, 探針からの漏洩磁界を軽減した低モーメント探針(CoPtCrコーティング膜厚: 24 nm)を用い, Q値制御が可能な高分解能真空中MFM装置<sup>7)</sup>である.

次に, 外部磁場の印加方向に対応した磁極配置の観察を行なうために, 直流消磁によって磁極配置をランダムにした状態の試料に対し, 永久磁石によって80 Oe程度の外部磁場を面内に印加し, 再び磁場を取り去った時の残留磁化状態における磁極配置を

Saturation magnetization (Ms)	800 emu/cm <sup>3</sup>
Exchange stiffness constant (A)	1.3 × 10 <sup>-6</sup> erg/cm
Anisotropic constant (Ku)	1000 erg/cm <sup>3</sup> (x 方向)
Gyromagnetic constant (γ)	-1.76 × 10 <sup>7</sup> rad/(s · Oe)
Damping constant (α)	0.1
Cell size	20 nm cubic

Table 1 Parameters for 3-D simulation using the LLG eq.

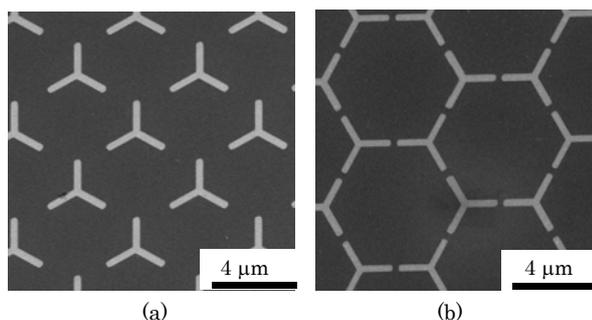


Fig. 1. SEM images of regularly aligned Y-shaped permalloy arrays, with (a) the linear arrangement and (b) the honeycomb arrangement.

MFMによって観察した。外部磁場は、面内において角度 60° 間隔の 6 方向から印加した。

また、磁性体微細構造内部の磁化分布の理論計算を行うために、三次元マイクロ磁気シミュレータ<sup>8)</sup>を開発し、単一Y字型パーマロイ構造内部の磁化分布の解析を行った。計算モデルのサイズは、長さ 1.4 μm、幅 200 nm、深さ 100 nm の三本の腕を持つY字形状とし、試作したY字型ドットに比較的近い大きさとした。初磁化方向は面直方向とし、ステップ時間 5ps. にて緩和計算を行った。LLG計算に用いた各種パラメータをTable 1 に示す。

### 3. 実験結果と考察

作製した試料の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を Fig. 1. に示す。Fig. 1. (a) は直線状配列、Fig. 1. (b) は蜂の巣格子状配列である。研磨処理を施すことにより、試料表面の平均自乗面粗さ(RMS)は 0.9 nm 程度となっており、非常に表面平坦性の高い試料が作製されている。いずれの試料においても作製した Y 字型構造の深さは 130 nm である。

次に、外部磁場印加による磁極配置の制御実験の結果を Fig. 2. (a)~(g) に示す。この観測には通常の高モーメント探針(CoPtCr コーティング膜厚:50 nm)を備えた MFM 装置(SPI3800N, SII NanoTechnology 製)を用いた。Fig. 2. (a) は試料に直流消磁を施した後、残留磁化状態において測定した MFM 像である。消磁後、磁極に対応する白黒の強いコントラストの配置はランダムとなっていることがわかる。

Fig. 2 (b)~(g) には予め消磁処理によって磁極配置をランダム

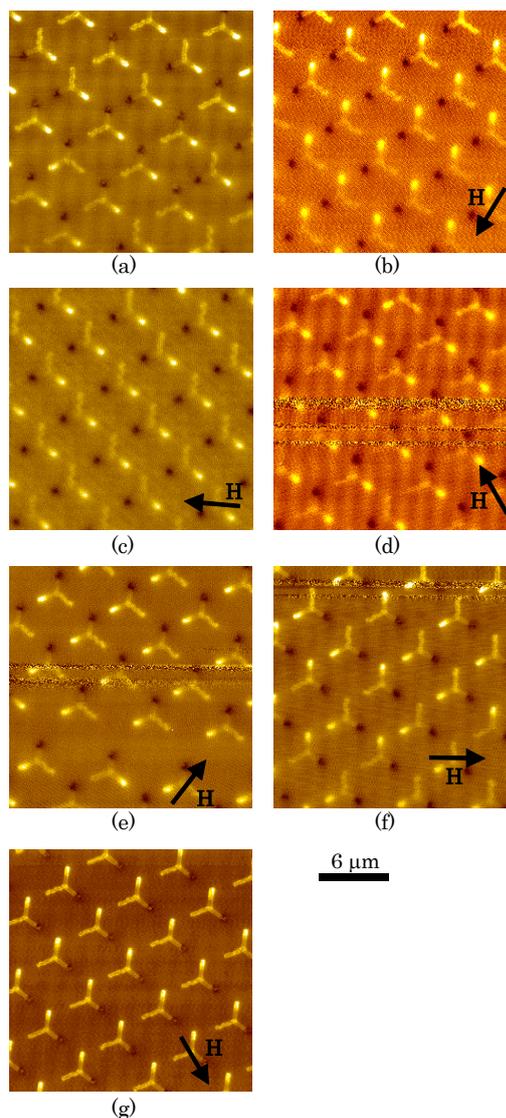
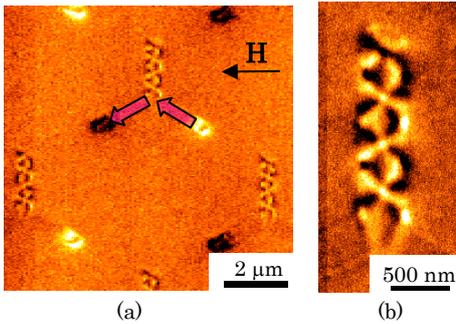


Fig. 2. MFM images of the magnetic pole arrangements controlled by the external magnetic field. (a) Remnant state image after dc demagnetization. (b-g) Remnant state images after application of an external magnetic field. Arrows indicate the direction of the field.

にした後に、図中の矢印が示す方向に外部磁場を印加し残留磁化状態の MFM 像を示す。それぞれの MFM 像には、二本の腕の先端部に磁極の存在を示す一対の白黒のコントラストが観測され、外部磁場印加方向に対応して磁極の位置が変化している。外部磁場印加により 6 種類の磁極配置を規則的に制御できることを示しており、同時にこれらの磁区構造がそれぞれ安定であることが確認された。この、6 種類の等価な安定状態が存在することは、6 値メモリとしての可能性を示している。

Fig. 3. (a) は、低モーメント探針を用いて測定した直線状配列の MFM 像を示す。試料は、図中矢印の方向に磁場が印加された後の残留磁化状態であり、Fig. 2. (c) の状態を高分解能で測定した画像である。Y 字型構造を構成する三本の腕のうち二本の腕先端部



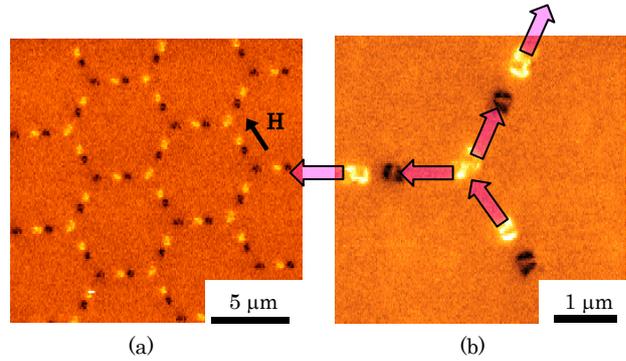
**Fig. 3.** MFM images of the linearly aligned arrays : (a) Y-shaped dots and (b) magnified image of the arm without poles.

には磁極を表す一対の白黒のコントラストがそれぞれ観測され、磁極の現れる腕内部では磁化の向きが、それぞれ腕の長手方向に揃い、単磁区構造を形成している。これは、印加磁場の長手成分によって二本の腕の磁化が単磁区化されたものと考えられる。一方、残りの腕部の磁区構造は、Fig. 3. (b)に示すように、カイラリティが反転した還流磁区<sup>9)</sup>が複数個並んで多磁区構造を形成することが確認された。これは、腕の長手方向に対して外部磁場印加の方向が垂直となっており、静磁エネルギーを減少させるためにこのような多磁区を形成したと考えられる。Fig. 3. に示すY字型ドットの詳細な磁気構造は、低モーメント探針を用いたQ値制御を行う真空中高分解能MFM測定によって、はじめて明らかになった。

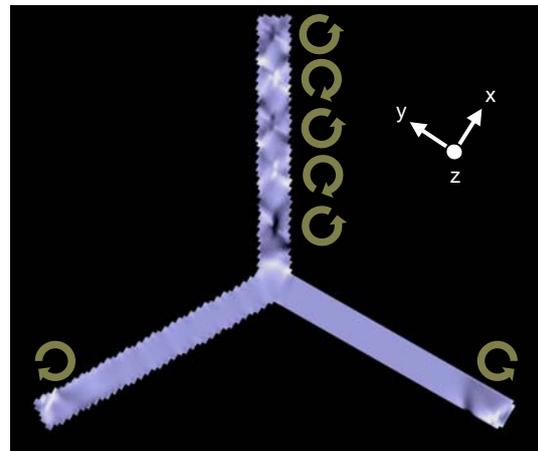
次に、蜂の巣格子状配列の面内磁場(図中矢印方向)印加後の残留磁化状態のMFM像(低モーメント探針を用いて測定)をFig. 4. に示す。MFM像の強いコントラストは、Y字型構造の各腕の先端部分と腕の結合部付近にのみ現れており、全ての腕部の磁化が外部磁場によって長手方向に揃い、単磁区となっていると考えられる。また、隣接して向かい合う腕端部の磁極は異符号となっており静磁的相互作用により影響を受けているものと考えられる。また、腕の結合部の磁化の流れは、2in-1outもしくは1in-2outのみに限定されており、全ての磁化が中心に向かう3inや、全ての磁化が外を向く3outが存在せず、Ref. 10. に記述された規則(アイスルール)と同様の結果となっている。

次に、直線状配列の場合と同様に、外部磁場の印加により磁極配置の制御を試みたが、80 Oe程度の面内磁場では元の配置から変化することはなかった。従って、隣接間距離を狭め、蜂の巣格子状に配列化することで、系全体で安定な磁極配置をとるように静磁的に結合しているものと考えられる。

Fig. 5. に単一Y字型パーマロイ構造内の三次元マイクロ磁気シミュレーション解析によって得られた、磁化の三次元方向全ての変化分を定量化した $-\text{div}\mathbf{M}$ コントラスト像を示し、図中矢印に磁化の流れを示す。直線状配列のMFM像に非常に良く似た結果となっており、Y字型構造の三本中二本の腕部の磁化が単磁区となり、残りの1本の腕は多磁区となる磁化分布が安定であることが理論的にも支持された。単磁区となっている腕の先端部分には磁化がVortex構造を形成し、Vortex中心部分の磁化が面直方向を向



**Fig. 4.** (a) MFM image of the honeycomb arrangement. (b) Magnified MFM image of specific dots, where arrows show the spin flow in each bar.



**Fig. 5.** Magnetization configuration contrasted for  $-\text{div}\mathbf{M}$  of magnetizations, which was calculated by 3-D simulation using the LLG eq.

くことで磁極を形成している。多磁区となっている腕部の磁化は、直線状配列のMFM測定結果のところで記述したように、カイラリティが反転した還流磁区が並んで存在している。

この計算結果とMFM像を対比させると、直線状配列ではY字型構造の幾何学形状に特有の磁化分布をとっていることがわかる。また、単一Y字型構造の計算結果と異なった磁化分布を示す蜂の巣格子状配列では、静磁的相互作用による影響を強く受け、全ての腕の磁化が単磁区となるように磁化分布が決定されている。

#### 4. まとめ

ダマシン法を応用してY字型パーマロイ構造規則配列を作製し、MFM、三次元マイクロ磁気シミュレーションにより磁気的評価・解析を行った。

相互作用が弱い系(直線状配列)の場合には、一つの要素内で幾何学的な形状の異方性と外部磁場印加方向によって磁化分布が決定される。二本の腕部の磁化は単磁区となり先端に磁極が生じ、残りの腕部の磁化は複数の還流磁区が存在する多磁区構造となった。

また、外部磁場印加により結合部分の磁化の流れを制御することで、磁極配置の外部磁場による制御にも成功した。

隣接する要素間の距離が小さくなり相互作用が支配的に働く系(蜂の巣格子状配列)の場合には、系全体で安定な磁化分布をとり、全ての腕部の磁化は単磁区となり、先端には磁極が形成された。

**謝辞** この研究は、東京農工大学 21 世紀 COE プログラム「ナノ未来材料」の一環として行われている。

### References

- 1) A. Hubert, and R. Schäfer: *Magnetic Domains* (1998)
- 2) R. D. Gomez, T. V. Luu, A. O. Pak, K. J. Kirk and J. N. Chapman: *J. Appl. Phys.* **85**, (1999) 6163
- 3) Y. Nakatani, Y. Uesaka, and N. Hayashi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **28** (1989) 2458.
- 4) T. Matsumoto, T. Tezuka, T. Ishibashi, Y. Morishita, A. Koukitu, and K. Sato: *Trans. Magn. Soc. Jpn.* **3** (2003) 103.
- 5) T. Tezuka, T. Yamamoto, K. Machida, S. Shimizu, T. Ishibashi, Y. Morishita, A. Koukitu, and K. Sato: *Trans. Magn. Soc. Jpn.* **4** (2004) 241.
- 6) K. Machida, T. Tezuka, T. Yamamoto, T. Ishibashi, Y. Morishita, A. Koukitu, and K. Sato: *J. Magn. Magn. Mater.* **290-291** (2005) 779.
- 7) T. Yamaoka, K. Watanabe, Y. Shirakawabe, and K. Chinone: *J. Magn. Soc. Jpn.* **27** (2003) 429.
- 8) K. Machida, N. Hayashi, Y. Yoneda, J. Numazawa, M. Kohro, and T. Tanabe: *J. Magn. Magn. Mater.* **226-230** (2001) 2054.
- 9) J. M. Garcia, A. Thiaville, J. Miltat, K. J. Kirk, J. N. Chapman, and F. Alouges: *J. Appl. Phys.* **79** (2001) 656.
- 10) E. Saitoh, M. Tanaka, and H. Miyajima: *J. Appl. Phys.* **93** (2003) 7444.

2005年10月19日受理, 2006年1月16日採録