

MAMR を用いた二層記録における上層と下層の間の交換結合の影響について

Effect of Exchange Coupling between Top & Bottom Layers in Dual Layer Microwave Assisted Magnetic Recording

菊地忠裕・Simon Greaves・村岡裕明

東北大学電気通信研究所, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

T. Kikuchi, S. Greaves, and H. Muraoka

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai Miyagi 980-8577, Japan

In this work we model microwave-assisted magnetic recording on ECC grains and granular media with two recording layers. Magnetostatic interactions between layers make it difficult to selectively record on only one layer. By introducing antiferromagnetic exchange coupling between the two recording layers the effect of magnetostatic interactions can be reduced. When the antiferromagnetic coupling strength was optimized the SNR of recorded tracks was increased by around 3 dB. This allows the media to support shorter bit lengths and higher areal densities.

Key words: MAMR, ECC media, Dual Layer Recording, antiferromagnetic coupling

1.序論

ハードディスクの大容量化に伴い、新しい記録方式が研究されている。その一つにマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)を用いた二層記録という方法がある。MAMR では媒体に記録する際に、ヘッドからの印加磁界のほかにスピントルク発振器(STO)から高周波磁界を印加する。これにより媒体の磁化反転を高周波磁界でアシストし、反転に必要な磁界を小さくすることができる(1)。媒体のパラメータやヘッドから媒体までの距離などの要素により、ある媒体を反転させる際に最適な高周波磁界の周波数が異なることが分かっており、一般に媒体の歳差運動の周波数が高い媒体ほど、最適な高周波磁界の周波数は高くなる。これを利用し、上層と下層で磁化反転に最適な周波数の異なる媒体を用いて二層記録することができる。STO の高周波磁界の周波数を変化させることで、二つの層から一つの層を選択して記録することが可能となるためである(2)(3)。

また、本論文ではECC(Exchange-coupled composite)媒体(4)(5)を用いた。ECC 媒体は低い異方性磁界(H_k)の軟磁性層と高い H_k の硬磁性層を磁氣的に結合させた媒体であり、磁化反転の際は、軟磁性層につられて硬磁性層が反転する仕組みになっている。同じ大きさのヘッド磁界で、単層媒体よりも大きな H_k を持つ ECC 媒体を磁化反転することができる。二層記録では、ヘッドから距離が離れている下層にかかるヘッド磁界が小さいと磁化反転が難しくなる。しかし、下層にかかるヘッド磁界を大きくするために下層とヘッドの間の距離を短くすると、上層の媒体の体積が小さくなり熱安定性を保つことが困難になる。そこで ECC 媒体を用いることで、上層により大きな H_k を持つ媒体を使用し、下層とヘッドの間の距離をより短くすることができる。また、ヘッド磁界を固定した場合に、STO の高周波磁界の周波数による媒体の反転可能な H_k の最大値の増加幅も単層媒体より ECC 媒体の方が広い。これは二層記録において、媒体の H_k の取れる値の範囲が広がることに繋がる(6)。

一方で、MAMR を用いた二層記録には依然としていくつかの問題があり、静磁気相互作用が特定の層のみを記録することを難しくすることも、その問題の一つである。具体的には、例えば下層の

磁化を上向きから下向きに反転する際に、上層の磁化が上向きか下向きかによって、下層の磁化反転に影響が出ると考えられる。本論文では、反強磁性結合を上層と下層の間に導入することで、静磁気相互作用による記録への影響を少なくし、二層記録の精度を向上させることができるかどうかを調べた。

2.計算方法

本研究では Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式によるシミュレーション(7)を行った。Table 1 に単粒子での計算条件を示した。また、Fig 1 にシミュレーションで用いた媒体のモデルを示した。ECC 媒体の上層の最上面とヘッドは 4 nm の距離がある。ECC 媒体の上層は、ヘッドに近い側から 3 nm が軟磁性層、残りの 2 nm が硬磁性層の積層構造となっている。軟磁性層と硬磁性層の間には交換結合が働き、大きさは 6.0 erg/cm^2 である。下層は非磁性層 2 nm を挟んで、4 nm が軟磁性層、残りの 3 nm が硬磁性層、交換結合は 4.0 erg/cm^2 である。上層と下層の間には非磁性層があるが、今回のシミュレーションでは上層の最下部と、下層の最上部の間に弱い交換結合が働くことを想定した。その値は $-0.4 \sim 0.2 \text{ erg/cm}^2$ とした。

粒子の最上部における書き込みヘッドと STO の z 軸(垂直)方向の最大ヘッド磁界分布を Fig 2 に示した。ヘッドのメインポールは 30 nm (下部は 36 nm) $\times 60 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ の鍵穴型のヘッドを用いた。ヘッドの飽和磁化 M_s を 1910 emu/cm^3 、軟磁性裏打ち層(SUL: Soft under layer)の M_s を 1600 emu/cm^3 とした。STO は $40 \text{ nm} \times 15 \text{ nm} \times 40 \text{ nm}$ のモデルを用い、 M_s は 1591 emu/cm^3 とした。粒子の最上部の高さではヘッドの最大磁界は約 15 kOe であり、STO の最大磁界は約 5 kOe である。

単粒子のシミュレーションでは粒子に対してヘッドが下向きに磁界を印加しながら 5 m/s で動く。STO の高周波磁界の周波数は $0 \sim 60 \text{ GHz}$ の範囲を取り、周波数それぞれにおいて、反転可能な硬磁性層の異方性磁界(H_k)を、上層と下層の間の交換結合の値を変えて調べた。

SNR(Signal-noise Ratio)を求めるシミュレーションも行った。ここでは単粒子ではなくグラニューラ媒体を想定し計算した。Table 2 にグラニューラ媒体での計算条件を示した。単粒子でのシミュレーションと同様に、ヘッドから 4 nm 離れたところに上層の最上面を

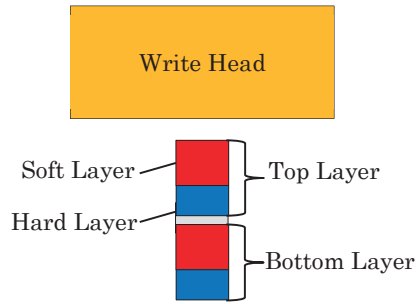


Fig 1. Structure of media and write head

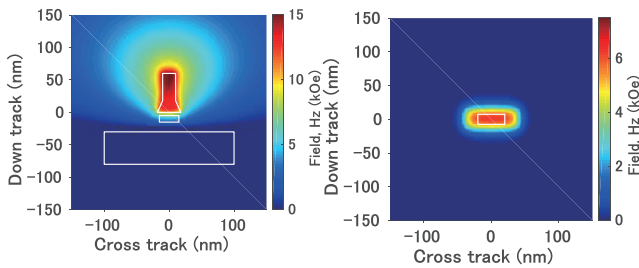


Fig 2. Head field distributions in top layer of media
(Left) Write head (Right) STO

想定し、また上層、下層のヘッドからの距離も同じにした。グラニュー媒体の初期状態の磁化方向はどちらの層もランダムであり、上層と下層の磁化の相対方向もランダムである。飽和磁化、異方性定数の値は、単粒子でのシミュレーションの結果を考慮して、それぞれ決定した。ヘッドが磁界を印加しながら 5 m/s で動き、400 nm のトラックを記録する。SNR は書き込まれたグラニュー媒体を再生ヘッドで読み込んで、読み込んだ磁化波形を平均して求めた。再生ヘッドの Free 層は 30 nm×5 nm×30 nm(クロストラック方向×ダウントラック方向×垂直方向)のサイズであり、ギャップ長 25 nm の中央に位置する。読み込みには再生感度関数を用いた(8)。

3. 計算結果

3.1 単粒子

まず、単粒子についての結果を示す。Fig 3 は下層における STO の高周波磁界の周波数と反転可能な H_k の関係を示したものである。磁界をかける前は下層の粒子の磁化は上向きであり、ヘッドから磁界をかけて反転することのできる最大の H_k をプロットした。上層の磁化の向きは反転の前後で固定してあり、下向きで固定した場合を①、上向きで固定した場合を②とした。Fig.3 (a)は上層と下層の間の交換結合(E C)が 0.0 erg/cm² のときであり、(b)は-0.2 erg/cm² のときのグラフである。下層の粒子を反転させる際に、上層の磁化の向きにより反転可能な H_k に差が生じることが分かった。ここで周波数 25 GHz と 45 GHz における①と②の差を ΔH_k とする。 ΔH_k は、上層と下層の間の交換結合が働いていないときよりも、反強磁性結合させたとき(負の交換結合が働いているとき)の方が小さくなることが分かった。これは、静磁気相互作用の効果を、交換結合により発生する磁界で打ち消しているためであると考え

Table 1. Single Grain Parameters

Grain Size(Top Layer)	7 nm×7 nm×5 nm
Grain Size(Bottom Layer)	7 nm×7 nm×7 nm
M_s	750 emu/cm ³
Temperature	4.2 K
K_u (Top Soft Layer)	5.0×10^6 erg/cm ³
K_u (Bottom Soft Layer)	3.0×10^6 erg/cm ³
K_u (Hard Layer)	Variable
Damping Constant	0.03

Table 2. Granular Media Parameters

Average Grain Size	7.6 nm
Grain Boundary	10%
Grain Size Distribution	15%
M_s	750 emu/cm ³
Temperature	4.2 K
K_u (Top Soft Layer)	5.0×10^6 erg/cm ³
K_u (Bottom Soft Layer)	3.0×10^6 erg/cm ³
K_u (Top Hard Layer)	3.0×10^7 erg/cm ³
K_u (Bottom Hard Layer)	1.5×10^7 erg/cm ³
H_k (Top Hard Layer)	80 kOe / 90 kOe
H_k (Bottom Hard Layer)	40 kOe / 60 kOe
Damping Constant	0.03

られる。反強磁性結合は記録層と反強磁性体との境界面に適応されるものであるが、記録層の厚さが厚いほどその影響が小さくなる(9)。これは、境界面付近での影響が強いことを表していると考えられる。また下層において、反転可能な H_k が最大となるのは 30~35 GHz 程度となった。

Fig 4 は同様のシミュレーションを上層に対して行ったものである。下層の磁化を下向きで固定した場合を①、上向きで固定した場合を②とした。Fig.4 (a)は上層と下層の間の交換結合が 0.5 erg/cm² のときであり、(b)は-0.5 erg/cm² のときのグラフである。反転可能な H_k が最大となるのは 45~55 GHz 程度となった。下層よりも大きな周波数となったのは、上層の粒子の方がヘッドからの距離が近いために、ヘッドから受ける磁界が大きくなり、より大きな H_k をもつ磁性粒子を反転することができることに由来する。Fig 3 を見ると、下層では最大で 90 kOe 程度の大きさの H_k を持つ媒体を反転することができる。Fig 4 を見ると、上層では最大で 110 kOe 程度の大きさの H_k を持つ媒体を反転することができる。そして、粒子の H_k が大きいほど、反転の際の歳差運動の周波数が高くなるため、必要な STO の高周波磁界の周波数も高くなるためである。また、 ΔH_k は上層と下層の間に正の交換結合が働くときに大きくなることが分かった。

Fig 5 に上層と下層の間の交換結合と ΔH_k の関係を示した。下層の方が、交換結合の値による ΔH_k の変化の割合が大きくなることが分かった。層の粒子の方がヘッドからの距離が遠いことや、上層の粒子の H_k が下層の粒子と比較して大きくなることなどの影響で、相対的に静磁気相互作用が大きくなるためであると考えられる。

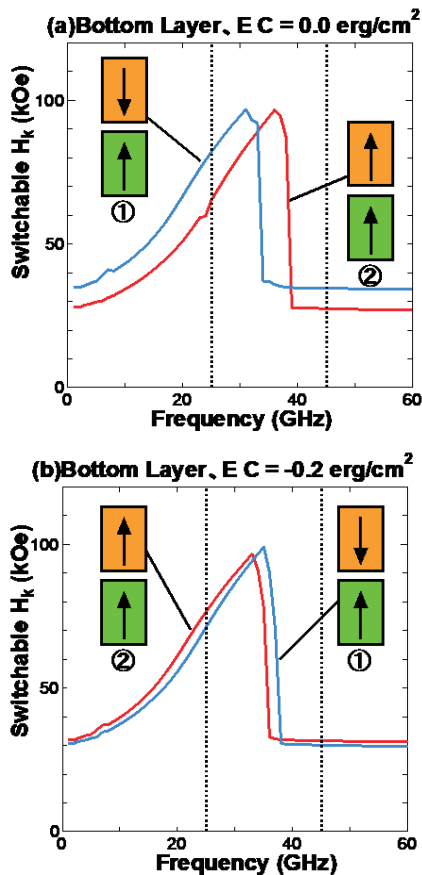


Fig 3. Maximum Switchable H_k of Single Grain vs STO Field Frequency (Bottom Layer)

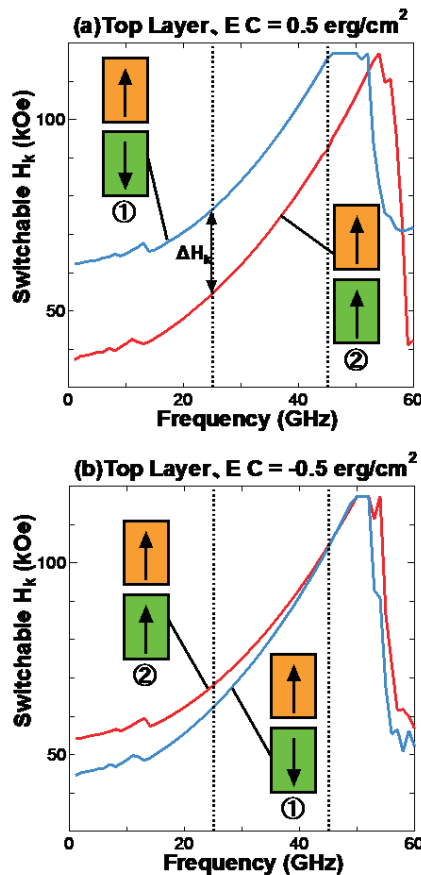


Fig 4. Maximum Switchable H_k of Single Grain vs STO Field Frequency (Top Layer)

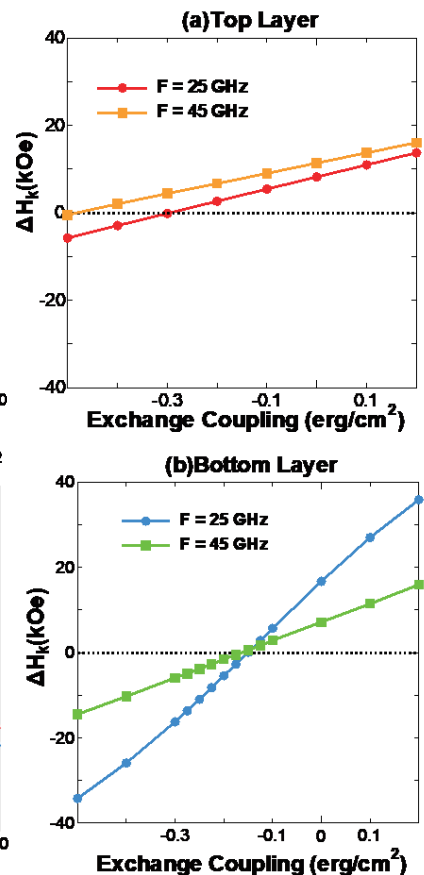


Fig 5. ΔH_k vs EC between Top and Bottom Layer

下図より下層において、上層と下層の間の交換結合が、 $-0.2 \sim -0.1 \text{ erg/cm}^2$ 程度のときに ΔH_k が 0 に近くなることが分かった。

3.2 グラニュラ媒体

Fig 6 に示したのは、グラニュラ媒体に対して 10 bit の書き込みを行った際の、STO の高周波磁界の各周波数における SNR を示したものである。エラーバーは、SNR を 10 回計算し平均した際の標準偏差である。また、媒体のパラメータは Table 2 に示したものをを用い、ビット長は 40 nm である。下層において、媒体の H_k が 40 kOe のときの方が、60 kOe のときよりも SNR が高くなっている。Fig 3 での理論的に反転可能な H_k よりも低いが、単粒子ではなくグラニュラ媒体であることに起因する。具体的には、グラニュラ媒体では粒子の位置がヘッドの中心とは限らないことや、周囲の粒子から反磁界などの影響を受けることが原因と考えられる。グラニュラ媒体を用いた際の SNR が最大となる STO の高周波磁界の周波数は、上層においては 40~45 GHz、下層においては 20 GHz 程度となった。単粒子で行ったシミュレーションでの反転可能な H_k が最大となる STO の高周波磁界の周波数よりもどちらの層も低くなっている。各層の媒体の H_k を低く設定したために、反転に適切な STO の周波数も低くなったためであると考えられる。

Fig.7 は、上層と下層それぞれでビット長による SNR の変化を表したグラフである。ここでは上層を記録するときは STO の高周

波磁界の周波数は 45 GHz に設定し、同様に下層においては 20 GHz に設定した。上層の H_k は 80 kOe、下層の H_k は 40 kOe とし、上層と下層の間の交換結合は 0.0 または -0.2 erg/cm^2 として、シミュレーションを行った。また tanh 関数を用いてフィッティングした。その際、エラーバーの短い母点の重みを大きくした。

どちらの層でもビット長が長い時の方が SNR は大きくなった。上層においてはビット長が 20 nm~30 nm のときに、上層と下層の間の交換結合が 0.0 erg/cm^2 のときよりも、 -0.2 erg/cm^2 のときの方が、SNR が 3 dB 程度高くなった。ビットの境界付近では、ヘッド磁界の向きが変わるために、ヘッド磁界の立ち上がり時間 (0.11 ns) や隣り合うビットからの反磁界の影響で書き込みにエラーが生じやすいが、そこで下層の媒体からの影響を受けやすくなっている可能性がある。10 nm 付近では、反強磁性結合することによる優位性がなくなっている。10 nm 付近で SNR が急激に落ちていることから、粒子サイズがビット長に対して大きいことや、ヘッドの磁場勾配が足りないことなどにより、SNR が落ちたために上層と下層の間の交換結合による影響が小さくなったと考えられる。

下層においては、ビット長の長さによらず、上層と下層の間に負の交換結合が働いているときの方が、SNR が平均して 3 dB ほど大きくなった。これは上層と下層の間の交換結合が、下層の SNR に対して一定の影響を与えていることを示している。これは上層と比較してヘッドからの距離が遠いために、ヘッド磁場勾配が小

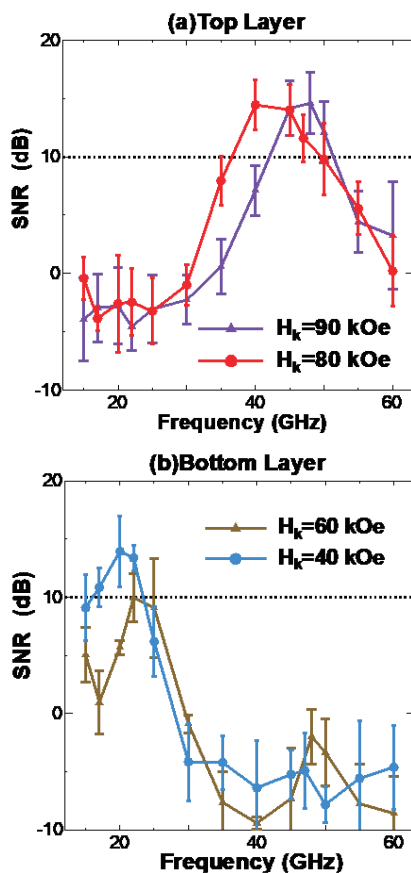


Fig 6. SNR of Granular Media vs STO Field Frequency (Bit Length = 40nm)

さくなり、転移の広がりが大きくなることに起因していると考えられる。

それぞれの層においてフィッティングカーブを基準に、SNR が 10dB を超えるところをビット長と決めるとする。上層と下層の間に交換結合が働いていないときは、上層のビット長は 21 nm、下層のビット長は 32 nm となる。上層と下層の間に -0.2 erg/cm^2 の交換結合が働いているときは、上層のビット長は 18 nm、下層のビット長は 28 nm となり、交換結合を働かせることで上層は 3 nm、下層は 4 nm 程度ビット長を短くすることができると考えられる。

4. 結論

ECC 構造の単粒子とグラニュー媒体それぞれについて、MAMR のヘッドを用いた書き込みのシミュレーションを行った。

単粒子での磁化反転では、上層と下層それぞれの反転可能な H_k を STO の高周波磁界の各周波数において計算した。下層の粒子を反転させる際に、上層の粒子の磁化の向きにより反転可能な H_k に差が生じることが分かった (ΔH_k)。 ΔH_k の値は、上層と下層の間の交換結合の大きさによって異なり、どちらの層においても交換結合が正の値のときには ΔH_k は大きくなった。また、上層と下層の間に交換結合が働かないときよりも、適切な値で負の交換結合が働いているとき (反強磁性結合させたとき) の方が、 ΔH_k を小さくすることができる。これは、静磁気相互作用の効果を、交換結合により発生する磁界で打ち消しているためである。

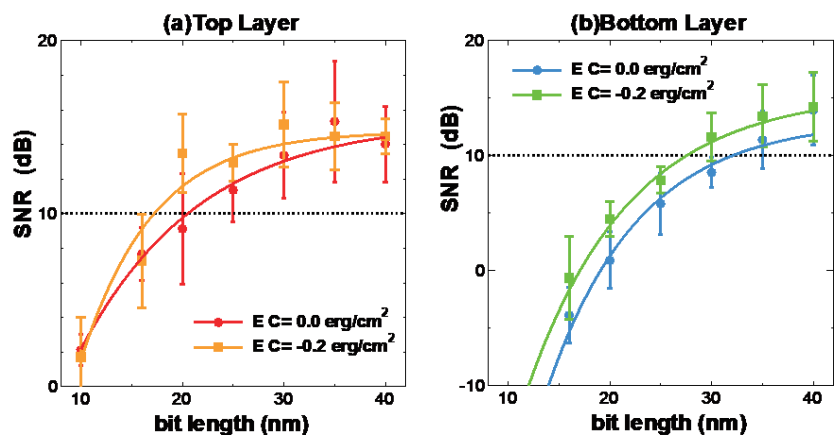


Fig 7. SNR of Granular Media vs Bit Length

グラニュー媒体を用いてトラックに記録し、SNR を計算した。上層では STO の高周波磁界の周波数が 40~45 GHz のときに最も SNR が大きくなり、下層では 20 GHz 程度のときに最も SNR が大きくなった。また、その最大値はどちらも 15 dB 程度であった。単粒子でのシミュレーションよりも最適な STO の高周波磁界の周波数が小さくなったが、それぞれの層で設定した H_k が、単粒子でのシミュレーションで求めた反転可能な H_k の最大値よりも小さいためである。

上層と下層の間の交換結合の影響は、ビット長が 40 nm の場合には上層ではほとんど無かったが、ビット長を短くした場合には、上層においても、特にビット長が 20~30 nm の範囲において SNR の大きさに差が生じ、上層と下層の間の交換結合が -0.2 erg/cm^2 のときの方が、SNR が良くなった。下層においては、ビット長の長さによらず、上層と下層の間の交換結合が -0.2 erg/cm^2 のときの方が、SNR が 3 dB 程度大きくなった。

仮に SNR を 10 dB のところを媒体のビット長とすると、上層と下層の間に -0.2 erg/cm^2 の交換結合を働かせることで上層は 3 nm、下層は 4 nm 程度ビット長を短くすることができると考えられる。

5. 参考文献

- 1) J.-G. Zhu, X. Zhu, Y. Tang, *IEEE Trans Magn.*, **44**, 125 (2008).
- 2) G. Winkler et al., *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 232501 (2009).
- 3) S. Li, B. Livshitz, H. N. Bertram, E. E. Fullerton, V. Lomakin, *J. Appl. Phys.*, **105**, 07B909 (2009).
- 4) J.-P. Wang, W. Shen, J. Bai, *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3181-3186, (2005).
- 5) D. Suess, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 113105 (2006).
- 6) S. Greaves, Y. Kanai, H. Muraoka, *IEEE Trans Magn*, **53**, (2017).
- 7) S. Greaves, *High Performance Computing on Vector Systems 2007*, **229-244**, Springer Berlin Heidelberg ISBN 978-3-540-74383-5
- 8) S. Greaves, Y. Kanai, H. Muraoka, *IEEE Trans Magn*, **41** (2005).
- 9) K. A. Seu, H. Huang, J. F. Lesoine, H. D. Showman, W. F. Egelhoff, L. Gan, A. C. Reilly, *Appl. Phys. Lett.*, **93** (2003).

2017年10月18日受理, 2017年12月9日再受理, 2018年2月9日採録