<Paper>

スピントルク発振素子のみを用いた二層選択記録の検討

Investigation of selective dual-layer recording only using spin torque oscillator

斎藤若[†]・Simon Greaves ・田中陽一郎 東北大学電気通信研究所,仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

W. Saito [†], S. Greaves, and Y. Tanaka

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

In this paper, we investigate the effect of anti-ferromagnetic exchange coupling (AFC) on the magnetization switching of two discretized recording layers using only a spin torque oscillator (STO). Switching probabilities were calculated as functions of STO frequency, and exchange coupling constant of AFC to evaluate the effect of AFC on the magnetization switching. The results show that optimizing AFC value increases the switching probability.

Key words: microwave assisted magnetic recording, dual-layer recording, spin torque oscillator, anti-ferromagnetic coupling.

1. はじめに

垂直磁気記録におけるトリレンマの問題の解決策として、エネ ルギーアシスト磁気記録が研究されている. その一つのマイクロ 波アシスト磁気記録(MAMR)では、コイル励磁型の書き込みへ ッド(メインポール)による直流磁界に加え、スピントルク発振素 子(STO)による高周波磁界(HF磁界)を記録媒体に印加する. HF磁界の周波数(f_{STO})を記録層の強磁性共鳴周波数(F_R)と一 致させれば、記録媒体の磁化がHF磁界からエネルギーを吸収し、 磁化反転に必要な磁界を低減することが可能となる. この F_R は 外部からの印加磁界と磁性粒子の異方性磁界によって決まる¹⁾. いま、異なる F_R を持つ複数の独立した記録層を考える. MAMR方 式では、STOにより各記録層の F_R に等しい、もしくは近しい周 波数のHF磁界を印加することで、複数の記録層の内任意の層の 磁化方向を反転させることができる²⁾⁻⁴⁾.

複数記録層を想定したとき, STO からの HF 磁界強度と, 記録 層間の静磁気相互作用が記録性能に及ぼす悪影響との間には互い にトレードオフの関係にある. HF 磁界強度は STO から離れる にしたがって急速に低下する. そのため各記録層間距離は可能な 限り短いことが望ましい. しかし各記録層間距離が短いと, 記録層 間の静磁気相互作用が各記録層の磁化方向を互いに平行に向かせ ようとする. 記録層間に反強磁性共有結合 (AFC)を導入すること でこの静磁気相互作用を打ち消すことができると報告されている ⁵.

本検討では、コイル励磁型の書き込みヘッドを用いず、STO の みを用いた磁化反転を目標としている.これは、書き込みヘッドの 磁界強度増大と f_{STO} の高周波化がトレードオフ関係にあり、か つヘッド磁極内での STO の安定な発振が難しい、という問題を 避けるためである.STO のみを用いた磁化反転は、単一の記録層 に関しては報告されている^{6).8)}.本検討では、二層の記録層間に AFC を導入し、STO のみを用いて磁化反転させることを目標と する.

なお本検討では、「二層媒体」は二層の記録層(RL1, RL2)を持つ単一の媒体を、「単層媒体」は一層の記録層(RL1, または RL2 のみ)を持つ単一の媒体を、それぞれ指すものとする.

2. モデル

本検討では、全ての計算をマイクロマグネティックモデルに基 づく Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式で行った。STO 及び記録媒 体のモデルを fg. 1 に示す。STO には、一定の周波数で回転する 単一のマクロスピンによる、一様に磁化した磁界生成層 (FGL) を 想定している。FGL の寸法は 30 nm × 30 nm × 10 nm で、飽 和磁化は $M_s = 1591 \text{ emu/cm}^3$ である。シミュレーションの開 始から 0.25 ns 後に STO による HF 磁界を 2.0 ns 印加し、その



Fig. 1. Schematic illustration of the model.



Fig. 2. Field from STO vs. distance from bottom of STO.

Table. 1	Parameters	of the	model.

	RL1		RL2
$M_{\rm s}~({\rm emu/cm^3})$	750		750
Damping constant α	0.02		0.02
V (Morg (cm ³)	Hard	6.1	8.1
R _u (Merg/chi)	Soft	1.0	
$H_{\rm c}$ (kOe)	7.165 1		11.33
T (K) 30		0	300
Exchange coupling constant (AFC) J _{IL} (erg/cm ²)	-0.474, -0.948,-1.432		

後 1 ns 経過する時点まで計算した. 記録媒体の上面と STO の 下面の間隔は 1 nm である. 記録媒体の磁性粒子は直径 20 nm の円柱型であり, 記録層 RL1 の厚さは 5 nm, RL2 の厚さは 3 nm とし, 記録層間の非磁性層 IL の厚さは 2 nm とした. 両記 録層は一軸異方性を有し, 磁化容易軸は垂直方向である. 特に明言 しない限り, 両層の磁化の初期状態は上向きである. RL1 には上 部に軟磁性層を設けた交換結合複合媒体 (ECC 媒体)を採用した. 軟磁性層が厚くなるに従い, ECC 媒体の F_R が低くなる⁸⁾ こと を利用し, 両層の F_R の差を大きくすること, STO から遠い RL1 の反転確率を高めることが目的である. ECC 媒体の軟磁性層を STO に近い側へ配置し, 軟磁性層と硬磁性層の間に, 5 erg/cm² の交換結合を導入した. シミュレーションでは, 記録層を 1 nm 厚の層に分割し, 同じ材料間の交換結合定数を 10 erg/cm² とし た. 両記録層の詳細なパラメータを table. 1 に示す.

HF 磁界は、FGL の単一のマクロスピンが一定の周波数で回転 することによって生成される.マクロスピンの回転は面内にあり、 回転軸は STO 中心軸に等しいため、STO 中心軸上において HF 磁界の面直成分はゼロとなる. STO 中心軸上の HF 磁界の大き さを、STO の底面からの距離の関数として fig.2 に示す.RL の中 央において、HF 磁界の面直成分はゼロとなる. 網掛けの領域は、 記録層を示している.

本検討では、両記録層間に AFC を導入することでより確実な 磁化反転を目指す.磁化反転の確実さの度合いとして反転確率を 計算した.これは、磁化が初期状態から反転した回数を、全体の試 行回数で割った値である.AFC の反転確率への影響を見るため、 AFC を導入しなかった場合も計算した.

3. 計算結果

3.1 AFC 導入無し

単層媒体および二層媒体(AFC 導入無し)の反転確率の f_{STO} 依存性を計算した結果を fig. 3 に示す.反転確率は試行回数 100 回の平均である. 点線は RL1,実線は RL2 の反転確率を示す. RL1 および RL2 は、それぞれの反転確率が増大する f_{STO} の領 域を互いに共有しないことがわかる. 例として、二層媒体に $f_{STO} = 9$ GHz の HF 磁界を印加した場合の各記録層の磁化の 様子を fig. 4 (a) に、 $f_{STO} = 22$ GHz の場合を (b) に示す. この 結果から、各記録層の F_R に等しいか、もしくは近い値の HF 磁 界を印加することで磁化反転させる記録層の選択が可能であるこ とが示された. また、二層媒体の RL2 における磁化反転の様子を



Fig. 3. Switching probability of each recording layer vs. STO frequency, f_{STO} .



Fig. 4. Magnetization switching with only HF field.



Fig. 5. Magnetization switching of RL2 without AFC. (a) Initial state. (b) 0.627 ns after applying field. (c) Final state.

fig. 5 に示す. Fig. 5 (b) から, 磁化反転の際磁壁を形成することが わかる. これは, 磁壁移動による磁化反転では一斉磁化反転に比べ, 同時に困難軸方向を向く磁化の数が少なくなり, 超えるべきエネ ルギー障壁が低くなるためであると考えられる. 単層媒体におい て, $f_{STO} = 8$ GHz, および 9 GHz で RL1 の反転確率 (P_{RL1}) と, $f_{STO} = 24$ GHz, および 25 GHz で RL2 の反転確率 (P_{RL2}) が, それぞれ 1 に到達している. 一方二層媒体では,最大値(最大反転 確率) が $P_{RL1} = 0.93$, $P_{RL2} = 0.83$ であった.1 より小さくなっ た理由は両記録層間に働く静磁気相互作用の影響であると考えら れる⁵⁾.

3.2 AFC 導入有り

二層媒体に AFC を導入した場合の、 fsto および AFC の交換



Fig. 6. AFC effect for switching probability.



Fig. 7. Change in switching probability due to initial magnetization state.

結合定数 J_{IL} に対する反転確率を fig.6 に示す.J_{IL}= -0.474 erg/cm² の AFC を導入した結果(試行回数 100)では, 最大反転確率がそれぞれ $P_{RL1} = 0.98$, $P_{RL2} = 0.89$ となり, AFC を導入する前の結果と比べ向上していることが分かった. J_{IL} を -0.948 erg/cm², -1.432 erg/cm² と変化させると, 曲 線は上へとシフトした. 最大反転確率は $J_{IL} = -0.948 \text{ erg/cm}^2$ で $P_{\text{RL1}} = P_{\text{RL2}} = 1$ となり, $J_{\text{IL}} = -1.432 \text{ erg/cm}^2$ としても 低下しなかった. より強い AFC を導入することで, 磁化は初期 状態である互いに平行な状態(以下,平行状態)より,反転後の状 態である互いに反平行な状態(以下,反平行状態)に変化し易くな る. Fig.6 に見られる反転確率の変化はこの効果が反映された結果 であると考えられる. また, AFC 効果の強化に伴い RL1 におけ る意図せぬ反転の確率が増大している様子も見られた. fsro = 20 GHz で、AFC 導入前は $P_{\text{RL1}} = 0$ であったのに対し、 $J_{\text{IL}} =$ -1.432 erg/cm^2 では $P_{\text{RL1}} = 0.18$ となっている. この意図 せぬ反転は, $J_{\rm IL}$ = -1.432 erg/cm^2 において $f_{\rm STO}$ = 16 GHz で $P_{\text{RL1}} = 0.7$ と,最も高い値をとる.この f_{STO} では,強い AFC 効果が働く中で RL2 の磁化が歳差運動をすることで、RL1 の軟磁性層の磁化も影響を受け、歳差運動をするのではと考えら れる. RL1 の軟磁性層と硬磁性層の間には交換結合が働くため,



Fig. 8. Switching probability vs. STO frequency, f_{STO} , for various anti-ferromagnetic exchange coupling constant, J_{IL} .



Fig. 9. Switching probability vs. antiferromagnetic exchange coupling constant, J_{IL} .

RL1 全体にエネルギーがアシストされ、RL1 が反転しやすくなるのではと考えられる. 比較として、RL2 は空気層とし、RL1 の硬磁性層のみを STO 中心軸上の STO 底面下 6 nm に設置し、反転確率の f_{STO} 依存性を計算した. 結果は、 f_{STO} が 12 GHz から15 GHz の範囲で反転確率が 0.9 以上となり、 $f_{STO} = 16$ GHzで反転確率は 0.6 を少し超える値であった.

二層の記録層間に強い AFC を導入すると, 記録層の磁化同士 を互いに反平行にしようとする交換結合磁界が強くなる. そのた め, 磁化が互いに反平行な状態から互いに平行な状態への磁化反 転が難しくなるのではないかと懸念された. そこで反平行状態で の各記録層の反転確率を求め, 平行状態の反転確率とともに fg. 7 に示す(試行回数 50, $J_{\rm IL} = -1.432 \ {\rm erg/cm^2}$). ここで, RL1, RL2 のどちらの反転確率も, 磁化が上を向いている状態から下を 向く確率を示している. つまり, RL1 の反転確率を計算する際 RL2 の磁化の初期状態は下向き, RL2 の反転確率を計算する際 RL1 の磁化の初期状態は下向きである. 初期状態が反平行状態の 場合でも, 両記録層において反転確率が 1 に届くことがわかった. fg.8 に, RL1 の磁化が下向きの場合における $P_{\rm RL2}$ の $f_{\rm STO}$ 依存 性を $J_{\rm IL} = -1.432 \ {\rm erg/cm^2}$ について示す(試行 回数 50). この結果から, 記録層間に導入する AFC が強くなる ほど、低周波数側における反転確率が低下することが分かった.

次に, $J_{\rm IL}$ の値が反転確率に与える影響を見るために, $f_{\rm STO}$ を 27 GHz に固定して,各記録層の反転確率の $J_{\rm IL}$ 依存性を計算し, 結果を fig. 9 に示す(試行回数 100). $J_{\rm IL}$ の値を負に大きくし、 導入する AFC を強くしていくと,平行状態における $P_{\rm RL2}$ が 1 に近づいていくことがわかる.これは、両記録層の磁化を互いに反 平行にしようとする AFC の作用によるものと考えられる.また、 fig. 9 に示した $J_{\rm IL}$ の範囲では、反平行状態における $P_{\rm RL2}$ は最低 で 0.98 までしか低下しなかった. $J_{\rm IL}$ の値を更に負に大きくして いけば、両記録層の磁化を反平行状態にしようとする AFC の作 用が更に強くなるため、反平行状態における $P_{\rm RL2}$ は低下してい くと考えられる.なお、fig. 6 に示すように、 $J_{\rm IL} = -0.948$ erg/ cm² で平行状態での $P_{\rm RL2}$ は 1 に到達しているため、この $J_{\rm IL}$ の範囲での $P_{\rm RL2}$ の低下は問題にならないと言える.

これまで様々な JIL の値を変更しその影響を見てきたが、JIL の 値は IL の材質と膜厚を変えることで変更可能である. 特に, IL を膜厚 0.43 nm のルテニウムとすると、 $J_{IL} = -2.2 \text{ erg/cm}^2$ (膜厚 0.95 nm では $J_{\rm IL} \approx -0.7 \ {\rm erg/cm^2})^{9)}$, 膜厚 0.5 nm のイリジウムとすると, $J_{\rm IL} = -2.6 \ {\rm erg/cm^{2}}^{10}$ とすることが できると報告されている. イリジウムの採用を想定し, IL 1 nm, $J_{III} = -0.7 \text{ erg/cm}^2$ として, 試行回数 50 で反転確率を計算し, その結果を fig. 10 に示す. この結果では, $f_{STO} = 7$ GHz, および $f_{\text{STO}} = 8$ GHz で $P_{\text{RL1}} = 1$, $P_{\text{RL2}} = 0$ となり, $f_{\text{STO}} = 20$ GHz $\label{eq:prod} \tilde{\mbox{\circlearrowright}} \ P_{\rm RL2} = 1 \ , \ P_{\rm RL1} = 0.28 \ , \ f_{\rm STO} = 23 \ {\rm GHz} \quad \tilde{\mbox{\circlearrowright}} \ P_{\rm RL2} = 1 \ ,$ $P_{\text{RL1}} = 0.24$ となった. また, RL1 の意図せぬ反転については, $f_{STO} = 17$ GHz で $P_{RL1} = 0.64$ となった. これは, IL 膜厚 2 nm, $J_{\rm IL}=-0.948~{\rm erg/cm^2}$ \bigcirc $f_{\rm STO}=17~{\rm GHz}$ \circlearrowright $P_{\rm RL1}=$ 0.36 と比べて二倍近い値である. IL 膜厚を小さくするとその分 RL1 は STO に近づくため、同程度の Ju. であってもこのような 差が生まれると考えられる.この想定では、上記のように両記録層 の最大反転確率がどちらも 1 であり、かつ $P_{RL1} = 1$ のとき $P_{\text{RL2}} = 0$ であるため、RL2 を反転させた後 RL1 を反転させる という手順で二層記録層の選択記録が可能となる.

5. 結論

STO のみを用いた二層媒体における選択的磁化反転可 能性を検討した.

各記録層における反転確率を、AFC の導入の有無それぞ れについて計算したところ、AFC を導入すると、平行状態



Fig. 10. Switching probability vs. f_{STO} for a 1 nm IL with $J_{\text{IL}} = -0.7 \text{ erg/cm}^2$.

の各記録層において最大反転確率が向上することが明らか になった. $J_{IL} = -0.948 \text{ erg/cm}^2$ まで負に大きくするこ とで,両層の最大反転確率が 1 となった. STO のみで二 層媒体の選択的反転が可能となることが確認できた.

ただし RL2 記録時に RL1 の意図せぬ反転の確率が最 大 0.7 まで増大するという問題も明らかになった. AFC を導入したとき増大する RL1 の意図せぬ反転の原因を解 明し,解決策を見出すことが,今後の課題である.

References

- 1) J. G. Zhu, X. Z, Y. Tang, IEEE Trans Magn., 44, 125 (2008).
- H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, T. Kanao, K. Mizushima, R. Sato, *Phys. Rev. Appl.*, 5, 014003 (2016).
- 3) G. Winkler, D. Suess, J. Lee, J. Fidler, M. A. Bashir, J. Dean, A. Goncharov, G. Hrkac, S. Bance, T. Schrefl, *Appl. Phys. Lett.*, 94, 232501 (2009).
- S. Greaves, Y. Kanai, H. Muraoka, *IEEE Trans. Magn.*, 53, 3000510 (2017).
- S. Greaves, T. Kikuchi, Y. Kanai, H. Muraoka, *IEEE Trans. Magn.*, 54, 11, 300185 (2018).
- H. Suto, T. Kanao, T. Nagasawa, K. Mizushima, R. Sato, *Sci. Rep.*, 7, 13804 (2017).
- 7) T. Taniguchi, Appl. Phys. Expr., 8, 083004 (2015).
- 8) S. Greaves, IEEE Trans. Magn., 54, 11 (2018)
- 9) K. Yakushiji, H. Kubota, A. Fukushima, S. Yuasa, *Appl. Phys. Expr.*, 8, 083003 (2015).
- 10) K. Yakushiji, A. Sugihara, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 092406 (2017).

2019年10月31日受理, 2019年12月12日採録