

スピントルク発振素子を用いた2層の反強磁性結合記録磁化における 選択的共鳴読み出し：マイクロマグネティックシミュレーション

Micromagnetic Simulation of Selective Resonance Reading from Double-Layer Antiferromagnetically-Coupled Recording Magnetization Using Spin-Torque Oscillator

金尾太郎[†]・首藤浩文・永澤鶴美・水島公一・佐藤利江
東芝研究開発センター，神奈川県川崎市幸区小向東芝町1（〒212-8582）

Taro Kanao[†], Hirofumi Suto, Tazumi Nagasawa, Koichi Mizushima, and Rie Sato

Corporate Research & Development Center, Toshiba Corporation, 1, Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 212-8582, Japan

A reading method that uses a spin-torque oscillator (STO) and the ferromagnetic resonance (FMR) of a recording layer has been proposed for three-dimensional magnetic recording. With this reading method (or resonance reading), a recording layer to be read is selected by matching the oscillation frequency of the STO to the FMR frequency of the recording layer. By micromagnetic simulation, we demonstrate layer-selective resonance reading from double-layer antiferromagnetically-coupled recording magnetization. FMR excitation is selectively induced in each recording layer by tuning the magnetic field and current for the STO. At the FMR, the oscillation power of the STO decreases because of additional dissipation by the FMR, which is used for the reading. Reading within a time scale of 1 ns is demonstrated by simulations in which the STO moves over the recording magnetization.

Key words: three-dimensional magnetic recording, read head, ferromagnetic resonance, spin-torque oscillator, micromagnetic simulation

1. はじめに

磁気記録の記録密度を向上させる技術として、複数の記録層をもつ3次元磁気記録が提案されている^{1)~3)}。3次元磁気記録での読み出し方法として、我々はスピントルク発振素子 (spin-torque oscillator, STO) によって記録層に誘起される FMR (ferromagnetic resonance) を利用した共鳴読み出しを提案してきた⁴⁾。STO は 10 nm から数 10 nm の磁気抵抗素子であり、直流電流によるスピントルクにより磁化が発振する⁵⁾。発振により近傍にマイクロ波磁場が生じ、同時に磁気抵抗効果によりマイクロ波帯の電気信号が出力される。STO の発振周波数が記録層の FMR 周波数に近いとき、マイクロ波磁場により記録層に大きな磁化振動が誘起され、STO の発振が影響を受ける。3次元磁気記録では各記録層の FMR 周波数を異なるようにし、STO と記録磁化の間の周波数に依存する相互作用を利用して選択的に各層の磁化方向を読み出すことができる³⁾。

これまでに磁性多層膜での FMR 測定により層選択的な読み出しが可能であることが示されてきた^{6), 7)}。さらに STO を用いた共鳴読み出しの原理実証実験が、STO と記録磁化を近接させた素子で行われている⁴⁾。また、マイクロマグネティックシミュレーションにより共鳴読み出しに適した STO が提案され、記録磁化が1層の場合に読み出しの際の磁化ダイナミクスが調べられている⁸⁾。

本論文では記録層が2層ある場合に選択的共鳴読み出しが可能であることをマイクロマグネティックシミュレーションにより示す。シミュレーションの設定を示した後、まず、STO による各記録層の磁化振動の選択的励起と STO の応答をみる。次に、記録磁化に読み出し磁場を加えることで記録層の磁化方向が判別できることを確認する。最後に、STO を記録層の上で移動させたシミュレーションを行い、各記録層の磁化方向に依存した STO の応答が 1 ns のオーダーの時間内に得られること示す。

2. シミュレーションの設定

Fig. 1 に、STO と 2 層の記録磁化 (recording magnetization, RM) の設定を示す。磁気ヘッドでの TMR (tunnel-magnetoresistive) センサの配置⁹⁾ を模して、STO の各層を記録磁化の各層に対して垂直に向けた。STO として、面外発振自由層・面内固定層をもった STO を用いた。この STO では磁気抵抗効果による出力信号が大きい¹⁰⁾。また、大きなマイクロ波磁場が発生する [cf. マイクロ波アシスト磁気記録^{11), 12)}]。STO には面直方向に電流 I と外部磁場 H_x^{STO} を加えており、発振パワーと

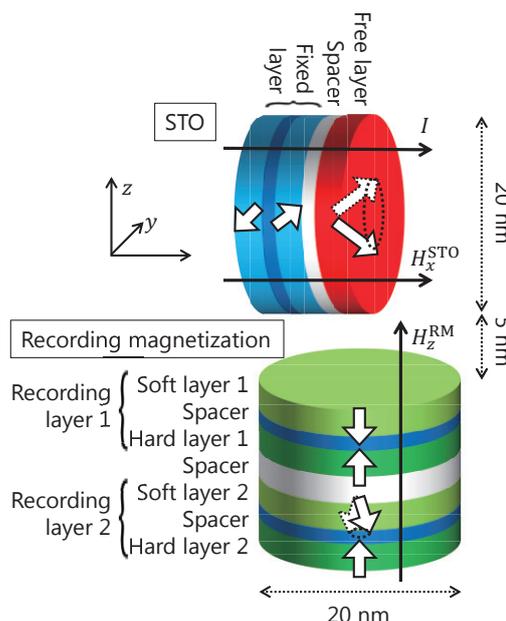


Fig. 1 Schematic of spin-torque oscillator and double-layer recording magnetization.

Table 1 Parameters for STO.

Layer	Thickness (nm)	Gilbert damping	Saturation magnetization (kemu/cm ³)	Perpendicular magnetic anisotropy (Merg/cm ³)	Interlayer coupling (erg/cm ²)
Free layer	2	0.01	1.2	6.0	—
Spacer	1	—	—	—	0
Fixed layer 1	2	—	0.8	—	—
Spacer	1	—	—	—	—
Fixed layer 2	2	—	0.8	—	—

Table 2 Parameters for recording magnetization.

Layer	Thickness (nm)	Gilbert damping	Saturation magnetization (kemu/cm ³)	Perpendicular magnetic anisotropy (Merg/cm ³)	Interlayer coupling (erg/cm ²)
Soft layer 1	2	0.02	1.2	7.0	—
Spacer	1	—	—	—	-2.0
Hard layer 1	2	0.02	0.67	7.0	—
Spacer	2	—	—	—	0
Soft layer 2	2	0.01	1.2	6.0	—
Spacer	1	—	—	—	-2.0
Hard layer 2	2	0.02	1.99	29.0	—

発振周波数を調整した。固定層は2層の磁性層からなり、互いの漏れ磁場を打ち消すように磁化が反対方向を向いた反強磁性配置を取っている。この磁化配置により漏れ磁場の発振への影響を減らしている。ただし、 x 方向の磁場 H_x^{STO} による面直方向への磁化の立ち上がりをモデル化するために、自由層に隣接する側の固定層磁化を y 方向から 5° だけ x 方向に傾けて固定した。この面直方向への傾きにより、STOの発振閾電流が小さくなる^{13), 14)}。記録磁化にはSTOに近い側から記録層1と記録層2があり、各記録層は反強磁性結合した2層の磁性層からなっている。2層の磁性層はそれぞれ垂直磁気異方性が小さいソフト層と大きいハード層からなる。ソフト層はSTOの発振周波数と近いFMR周波数を持ち読み出しに用いられる。ハード層は十分高い垂直磁気異方性を持ち情報を保持する。ハード層のFMR周波数はソフト層に比べて十分高く、STOの発振周波数近くではほとんど磁化振動が励起されない。Fig. 2(a)に示すように、各記録層はソフト層とハード層の磁化が反対方向を向いた2通りの安定な磁化配置をとる。この配置により漏れ磁場が小さくなり、周りの磁化への影響が抑えられる。以下ではこれら2通りの磁化配置をソフト層の磁化の向きに応じ

てそれぞれ down, up と呼ぶ。記録層の磁化の向きに依存してFMR周波数が異なるようにするために[Fig. 2(b)], 記録磁化には読み出し磁場 H_z^{RM} を z 方向に加える⁴⁾。

STOと記録磁化はともに直径20 nmの円柱状とした。記録磁化のサイズは1層当たりの記録密度2 Tbit/inch²を目安に、1つの代表値として選んだ。直径20 nmの円を平面上に最密に敷きつめると(六方充填)、密度は1.86 Tbit/inch²となる。STOのサイズは空間分解能や共鳴時の応答の観点から記録磁化と同程度の値を選んだ。STOと記録磁化の距離は5 nmであり、STO自由層が記録磁化の中心直上にある。

Table 1とTable 2にSTOと記録磁化のパラメータを示す。また、すべての磁性層の交換スティッフネス定数を1.6 μ erg/cmとしている。STOのパラメータはTMR膜からなるものを念頭に設定した。スピン分極率は0.65とした。簡単化のため、固定層に磁化ダイナミクスはないとした。記録磁化については次のように設定した。理由については後述する。ソフト層2の垂直磁気異方性をソフト層1より小さくした。Table 2のパラメータでは微小な磁化振動により求めたソフト層1, 2のFMR周波数はそれぞれ12.9 GHz, 7.3 GHzとなった。ソフト層2のギルバート緩和定数は0.01、ソフト層2以外は0.02とした。ハード層1, 2の飽和磁化をソフト層に比べてそれぞれ小さく、または大きくした。各ハード層の垂直磁気異方性は、膜で評価した有効垂直磁気異方性定数 K_u^{eff} による熱安定性定数 $\Delta = K_u^{eff}V/(k_B T)$ が60以上になるように設定した。ここで V はハード層の磁化の体積、 k_B はボルツマン定数、 $T = 300$ Kは温度である。(ただし以下のシミュレーションでは有限温度における磁化の熱ゆらぎの影響は取り入れていない。) 膜の場合 $K_u^{eff} = K_u - 2\pi M_s^2$ より、飽和磁化 M_s が大きいほど大きな垂直磁

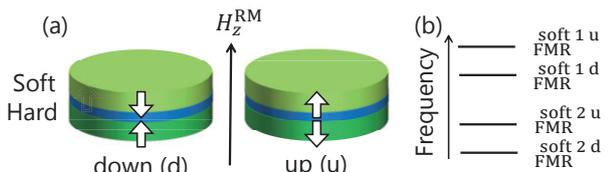


Fig. 2 (a) Down and up states of recording layer. (b) Schematic of distribution of FMR frequencies of soft layers in down and up states under reading field.

気異方性定数 K_u が必要となる。Table 2のパラメータでFig. 1の円柱状の形状において求めたハード層1, 2のFMR周波数はそれぞれ68 GHz, 34 GHzだった。

ソフト層2の垂直磁気異方性とギルバート緩和定数を上述のように選んだのは、STOから離れた位置にあるソフト層2の共鳴によるSTOの応答をなるべく大きくするためである。より小さな垂直磁気異方性を用いることで、STOから加わる振動磁場の影響をより大きくできる¹⁵⁾。ギルバート緩和定数に関しては複数の値においてシミュレーションを行い、STOの応答が最大となる0.01を選んだ。これより大きな値の場合にはソフト層に励起される磁化振動が小さくなりSTOへの影響が小さくなる。一方、値がより小さい場合には磁化振動は大きくなるものの、緩和が小さいためSTOの振幅の減少幅は小さくなる。ソフト層2以外のギルバート緩和定数は典型的な値を採用した。

各ハード層の飽和磁化を上述のように選んだのは、各ソフト層のFMR周波数が記録磁化の磁化方向(4通りの安定な反強磁性配置)によらないようにするためである。ハード層1の飽和磁化を小さくすることで、ソフト層2の位置における記録層1からの漏れ磁場を打ち消すことができる。同様に、ハード層2の飽和磁化を大きくすることで、ソフト層1の位置における記録層2からの漏れ磁場を打ち消すことができる。この結果、ハード層2では飽和磁化が現実の物質に比べて大きくなったが、モデルとしてこの値を用いた。ハード層2をより厚くすることや、ソフト層の飽和磁化を小さくすることにより、小さい飽和磁化で同等の状態を実現できる。また、前述のハード層のFMR周波数は現状のマイクロ波アシスト磁化反転の観点では高いが、膜では有効垂直磁気異方性定数が過小評価されるため、 K_u をより下げてFMR周波数をより低くすることはできる。

3. シミュレーション結果

マイクロマグネティックシミュレーションには当研究グループで開発してきたシミュレータを用いた¹⁶⁾。今回シミュレーションを行った条件では、STOの自由層磁化は面外発振を、記録磁化の各ソフト層の磁化はz方向を軸とした歳差運動を示した。ハード層の磁化振動の振幅は小さかった。磁化振動の際、それぞれの磁化は空間的に一様だった。したがって以下では各磁化の状態を、飽和磁化で規格化した磁化の空間平均により表す。特にy成分 m_y に注目する。これは、固定層の磁化がほぼy方向を向いているためy成分が磁気抵抗効果により電気信号として出力されるからである。

まず、STOによる各記録層の磁化振動の選択的励起と対応するSTOの応答をみる。Fig. 3に、電流0.1 mAを加えてSTOを発振させたときの、STOの発振周波数[Fig. 3(a)]と、STO自由層と記録磁化ソフト層1, 2の m_y の発振パワー[Fig. 3(b)]の、外部磁場 H_x^{STO} 依存性を示す。ここで、シミュレーションは10 ns間おこなない、発振パワーは $[m_y(t) - \overline{m_y}]^2$ の時間平均とした。 $\overline{m_y}$ は $m_y(t)$ の時間平均である。発振パワーは磁化が静止しているとき0に、磁化がx-y(またはy-z)平面内で面外発振しているとき0.5になる。図にはSTOのみの場合と、STOと記録磁化がFig. 1の配置にあり記録層1, 2の磁化配置がともにdown(Fig. 2参照)の場合の結果を示した。ここでは読み出し磁場 H_z^{RM} はゼロである。Fig. 3(a)に

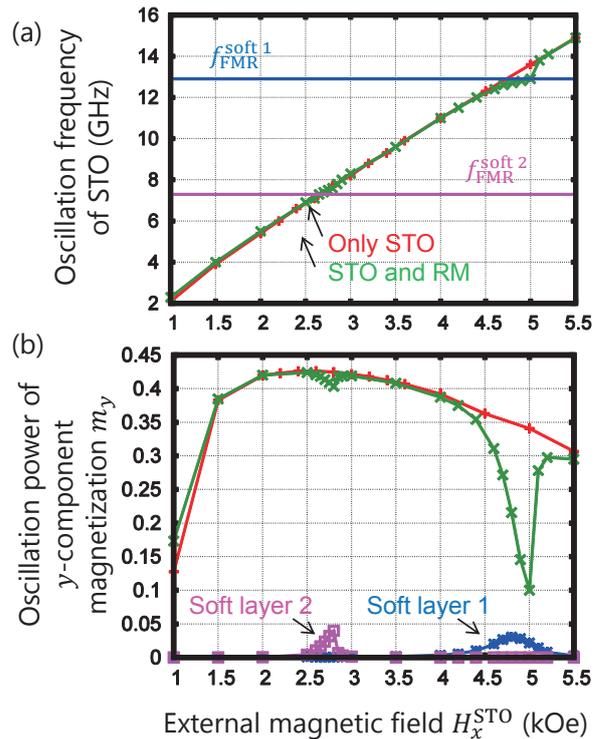


Fig. 3 (a) Oscillation frequency of STO and (b) oscillation power of y-component magnetization of STO free layer and soft layers of recording magnetization as function of x-direction external field for current $I = 0.1$ mA and no reading field. Recording layers 1 and 2 are in the down state.

は各ソフト層のFMR周波数も示した。STOの発振周波数は H_x^{STO} を大きくするにしたがってほぼ線形に増加していき、STOの発振周波数が各ソフト層のFMR周波数に近くなったとき、STOとの磁気双極子相互作用によりソフト層に磁化振動が励起され、同時にSTOの発振パワーが減少していることがわかる。STOの発振パワーが減少するのは、STOとソフト層磁化が共鳴的に同期振動し、STOに対する実効的な緩和が増加したためである。この結果から、STOの発振周波数を変えることにより、各記録層に選択的にFMRを励起できることがわかる。

ソフト層1のFMRでは、STOの発振パワーは大きく減少した。ソフト層2ではSTOからより遠く離れているため磁気双極子相互作用が小さく、FMRが励起されたときのSTOの発振パワーの応答はソフト層1の場合に比べて小さい。

そこで、STOから遠いソフト層2においてFMRが励起されたときのSTOの発振パワーの変化を相対的に大きくするために、次のようにSTOに加える電流を小さくした。Fig. 4に電流が $I = 0.05$ mAのときの、STOと記録磁化ソフト層2の m_y の発振パワーの H_x^{STO} 依存性を示す。電流が0.1 mAの場合[Fig. 3(b)]と比べると、STOの発振パワー自体は小さくなっているが、共鳴時のSTOの応答は相対的に大きくなっている。STOの応答が相対的に大きくなるのは、電流が発振閾値に近づき、ソフト層のFMRによる緩和の影響を受けやすくなったためである。また、STOの発振パワーの変化はSTOと記録磁化の位置関係にも依存して大きくなる。Fig. 4に示すように、STOの自由層が記録磁化の左端(Edge)の上

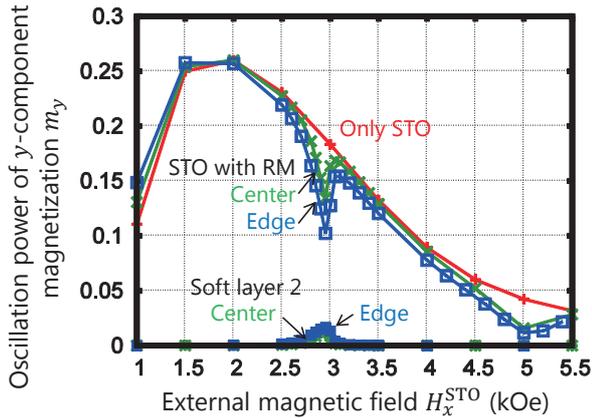


Fig. 4 Oscillation power of y-component magnetization of STO free layer and soft layer 2 as function of x-direction external field for current $I = 0.05$ mA and no reading field. Recording layers 1 and 2 are in down state.

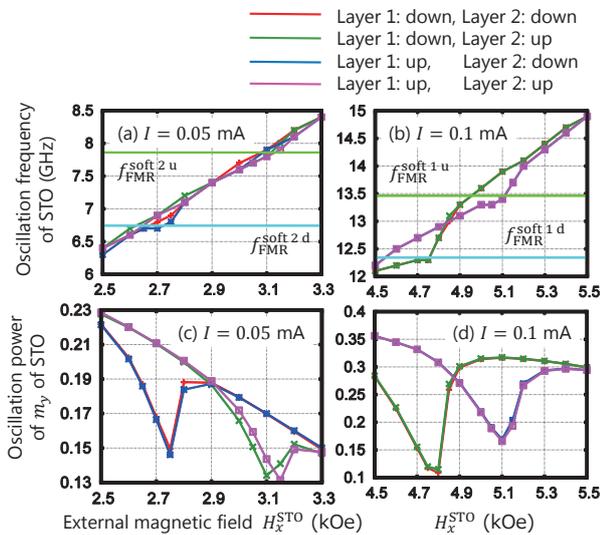


Fig. 5 (a)(b) Oscillation frequency of STO and (c)(d) oscillation power of y-component magnetization of STO as function of x-direction external field for reading field 0.2 kOe and for current (a)(c) $I = 0.05$ mA and (b)(d) $I = 0.1$ mA. Results for four antiferromagnetically-coupled magnetization states of recording magnetization are shown.

にあるとき(中心から $-x$ 方向に9 nm移動したとき),中心(Center)の上にあるときに比べてSTOの発振パワーの変化が大きくなった。この発振パワーの変化の増大は,STOが左端にある場合にはSTOから記録磁化に加わるマイクロ波磁場が円偏光的になり,マイクロ波磁場の回転の向きが,down方向を向いたソフト層の磁化の歳差運動の向きと一致するため,より大きな磁化振動がソフト層に励起されたことによる^{17)~19)}。

次に,記録磁化に読み出し磁場 $H_z^{RM} = 0.2$ kOeを加えて各記録層のFMRによるSTOの応答が磁場方向によって変化することを見る。Fig. 5に,記録磁化の4通りの安定な磁化配置に対してSTOの発振周波数[Fig. 5(a)(b)]および発振パワー[Fig. 5(c)(d)]の H_x^{STO} 依存性を示す。Fig. 5(a)(b)にはそれぞれソフト層2と1の磁化配置down, upでのFMR周波数も示した。対応する磁化配置のとき,発振周波数がFMR周波数に近づくと(c)(d)のように発振パワーが

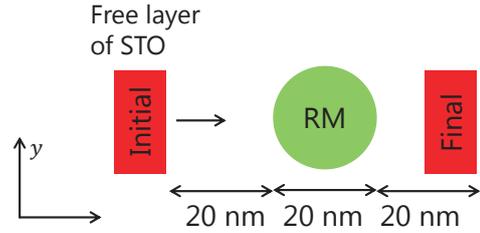


Fig. 6 Initial and final positions of STO free layer and position of recording magnetization.

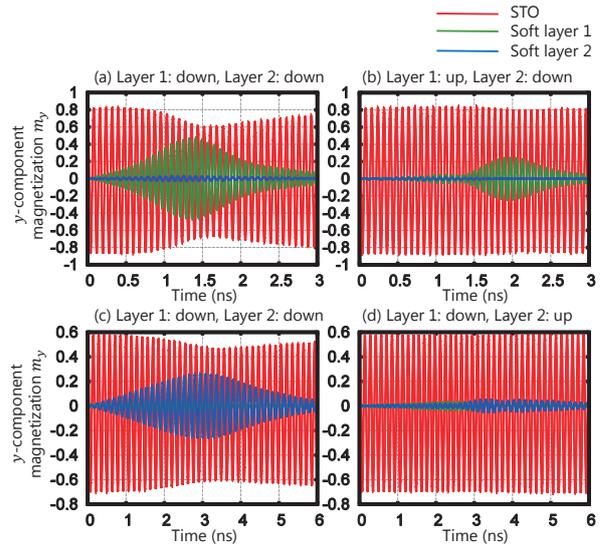


Fig. 7 Waveform of y-component magnetization of STO free layer and soft layers of recording magnetization for reading field 0.2 kOe. (a)(b) For current $I = 0.1$ mA, x-direction external field 4.6 kOe, and velocity $V = 20$ m/s. Recording layer 2 is in down state, and recording layer 1 is in (a) down state and (b) up state. (c)(d) For current $I = 0.05$ mA, x-direction external field 2.75 kOe, and velocity $V = 10$ m/s. Recording layer 1 is in down state, and recording layer 2 is in (a) down state and (b) up state.

減少する。発振パワーが減少する H_x^{STO} の範囲は磁化配置がdownとupの場合に対して異なっている。したがって H_x^{STO} を調整することで一方の磁化配置の場合にのみSTOの発振パワーを応答させることができ,磁化方向を判別することができる。さらに, Fig. 5(c)(d)ではFMRによる磁化振動を起こさないう一方の記録層の磁化の向きによる影響がほとんど表れていない。したがって,STOの発振周波数を変化させることで各記録層を選択的に読み出すことができる。

最後に,STOを記録磁化の上で等速直線運動させた場合のシミュレーションを行い,ナノ秒オーダーの時間でSTOが応答できることを示す。Fig. 6に動かす際のSTOと記録磁化の位置関係を示す。STOの自由層が記録磁化から20 nm離れた地点より記録磁化へ向かって動き出し,記録磁化の中心直上5 nmを通過し,20 nm離れるまでのシミュレーションを行った。記録磁化には読み出し磁場 $H_z^{RM} = 0.2$ kOeが加わっている。STOの設定を,記録層1または2を読み出す場合に対してそれぞれ $H_x^{STO} = 4.6$ kOe, $I = 0.1$ mAまたは $H_x^{STO} = 2.75$ kOe, $I = 0.05$ mAとした。この設定ではFig. 5(c)と5(d)のように,down配置の記録層に対して

STOが応答する。STO自由層の初期条件は記録磁化がない場合の定常発振状態と同じコーン角(面直方向となす角)とした。記録層1, 2を読み出す場合にそれぞれ $55^\circ, 35^\circ$ である。

Fig. 7(a)と7(b)に記録層1を読み出した場合の波形(STO自由層の m_y)を示す。ここでSTOの速さを $V = 20$ m/sとしており、STOは1 ns間で記録磁化上を通過する。Fig. 7(a)のように、記録層1がdown配置のときソフト層1の磁化振動が励起され、STOの発振振幅が減少する。一方、Fig. 7(b)のように、up配置のときはソフト層1の励起は小さく、STOの発振振幅はほとんど変わらない。また、どちらの場合もソフト層2の磁化振動の振幅は小さい。すなわち、STOの発振振幅はdown配置の記録層1に対して選択的に応答し、その応答は1 nsのタイムスケールで起こることがわかる。このSTOの応答を用いて記録層1の磁化の向きを知ることができる。

Fig. 7(c)と7(d)に記録層2を読み出した場合の波形を示す。ここで、STOの速さを $V = 10$ m/sとしており、STOは2 ns間で記録磁化上を通過する。STOの速さを $V = 10$ m/sと遅くしたのは、記録層2はSTOから遠い位置にあるためSTOとの磁気双極子相互作用が小さく、ソフト層における磁化振動の励起とSTOの発振振幅の応答に時間がかかるからである⁸⁾。Fig. 7(c)のように、記録層2がdown配置のときソフト層2の磁化振動が励起されてSTOの振幅が減少し、それ以外の場合にはソフト層1, 2の励起は小さく、STOの振幅はほとんど変わらないという結果が得られた。したがって、記録層1の場合に比べて長い時間がかかるものの、記録層2についても磁化方向を知ることができる。

4. まとめ

面内固定層をもった面外発振STOと2層の反強磁性結合した磁性層からなる記録磁化を用いた層選択的共鳴読み出しのマイクロマグネティックシミュレーションを行った。STOの発振周波数が各記録層のFMR周波数に近いとき、STOの発振パワーが減少する応答が得られた。記録層に読み出し磁場を加えたとき各記録層のFMR周波数が磁化方向に依存することを利用して磁化方向を知ることができる。STOと記録磁化を相対的に動かしたシミュレーションにより1 nsオーダーの時間でSTOの発振パワーの応答が起こることを示した。

謝辞 シミュレータを作成されこの研究に関して有益な助

言を下された工藤究氏に感謝する。本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援によっておこなわれた。

References

- 1) G. Winkler, D. Suess, J. Lee, J. Fidler, M. A. Bashir, J. Dean, A. Goncharov, G. Hrkac, S. Bance, and T. Schrefl: *Appl. Phys. Lett.* **94**, 232501 (2009).
- 2) S. Li, B. Livshitz, H. N. Bertram, E. E. Fullerton, and V. Lomakin: *J. Appl. Phys.* **105**, 07B909 (2009).
- 3) H. Suto, K. Kudo, T. Nagasawa, T. Kanao, K. Mizushima, and R. Sato: *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 07MA01 (2016).
- 4) H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima, and R. Sato: *Nanotechnology* **25**, 245501 (2014).
- 5) Z. Zeng, G. Finocchio, and H. Jiang: *Nanoscale* **5**, 2219 (2013).
- 6) T. Yang, H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima, and R. Sato: *J. Magn. Magn. Mater.* **332**, 52 (2013).
- 7) T. Yang, H. Suto, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima, and R. Sato: *J. Appl. Phys.* **114**, 213901 (2013).
- 8) T. Kanao, H. Suto, K. Kudo, T. Nagasawa, K. Mizushima, and R. Sato: *J. Appl. Phys.* **123**, 043903 (2018).
- 9) H. Okamura and M. Hattori: *Hard Disk Sochi no Kozo to Oyo* (in Japanese), (CQ Shuppan, Tokyo, 2010).
- 10) H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Tamaru, M. Konoto, T. Nozaki, S. Ishibashi, T. Saruya, S. Yuasa, T. Taniguchi, H. Arai, and H. Imamura: *Appl. Phys. Express* **6**, 103003 (2013).
- 11) J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang: *IEEE Trans. Magn.* **44**, 125 (2008).
- 12) S. Okamoto, N. Kikuchi, M. Furuta, O. Kitakami, and T. Shimatsu: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 353001 (2015).
- 13) D. Houssameddine, U. Ebels, B. Delaët, B. Rodmacq, I. Firastrau, F. Ponthenier, M. Brunet, C. Thirion, J.-P. Michel, L. Prejbeanu-Buda, M.-C. Cyrille, O. Redon, and B. Dieny, *Nat. Mater.* **6**, 447 (2007).
- 14) T. Taniguchi, H. Arai, S. Tsunegi, S. Tamaru, H. Kubota, and H. Imamura, *Appl. Phys. Express* **6**, 123003 (2013).
- 15) H. Suto, K. Kudo, T. Nagasawa, T. Kanao, K. Mizushima, R. Sato, S. Okamoto, N. Kikuchi, and O. Kitakami: *Phys. Rev. B* **91**, 094401 (2015).
- 16) K. Kudo, H. Suto, T. Nagasawa, K. Mizushima, and R. Sato: *Appl. Phys. Express* **8**, 103001 (2015).
- 17) S. Okamoto, N. Kikuchi, and O. Kitakami: *Appl. Phys. Lett.* **93**, 102506 (2008).
- 18) J.-G. Zhu and Y. Wang: *IEEE Trans. Magn.* **46**, 751 (2010).
- 19) H. Suto, T. Kanao, T. Nagasawa, K. Kudo, K. Mizushima, and R. Sato: *Appl. Phys. Lett.* **110**, 262403 (2017).

2017年11月1日受理, 2018年3月27日採録