

負の垂直磁気異方性を持つ発振層材料による MAMR ヘッド用

スピントルクオシレータの発振周波数調整

村上 修一¹、清水 真理子²、藤田 倫仁²、鴻井 克彦²、山田 健一郎¹、竹尾 昭彦²
 (¹東芝研究開発センター、²東芝セミコンダクター&ストレージ社)

Frequency tuning in spin torque oscillator for MAMR
 by using negative- K_u material on field generation layer

S.Murakami¹, M.Shimizu², N.Fujita², K.Koi², K.Yamada¹, A.Takeo²

(¹Corporate R&D Center, ²Semiconductor & Storage Products Company, Toshiba Corporation)

はじめに

高周波アシスト記録(MAMR)ヘッドの高周波磁界源である垂直スピントルク発振子(STO)の周波数は、発振層(FGL)における有効磁界により決まるが、現在想定している記録磁極からのギャップ磁界は12kOe程度であり、そこでは30GHzを超えることが見込まれる。一方で、アシスト効果に最適な周波数は20から30GHzと見積もられており、周波数マッチングが課題となる。¹⁾そこで、STOの発振周波数を低減する目的で、FGL材料に負の垂直磁気異方性(H_k)を付与して、有効磁界を低減する方法を検討した。鉄とコバルトの人工格子構造は負の H_k が報告されており²⁾、また高い飽和磁化(B_s)を反映し十分な高周波磁界強度が見込める。本研究では、上記のFGL材料を用いることによって、発振周波数を低減させることに成功した結果について報告する。

実験方法

FGLとして、正の H_k を付与した材料(FeCo系材料A: $H_k = +2\text{kOe}$, $B_s = 2.1\text{T}$, $t = 12.6\text{ nm}$)と負の H_k を付与した材料(材料B: $[\text{Fe}_{0.4}/\text{Co}_{0.4}] \times 17$ 人工格子, $H_k = -2\text{kOe}$, $B_s = 2.2\text{T}$)との2種類について、それぞれSTOを作製した。STO構成は、 $[\text{Co}/\text{Ni}]$ 人工格子スピン注入層(SIL)/Cu中間層/FGLとし、素子サイズは40から45nm角に加工した。作製した素子の発振スペクトルを膜面垂直方向の磁場下にて測定した。

実験結果

Fig.1にR-Hカーブを示す。高磁界での飽和特性は、それぞれの H_k を反映した結果となった。材料Aでは、5kOe以上で磁化平行状態が達成されているが、材料Bでは、10kOeまで印可しても平行に到達していない。Fig.2にFGL材料A、Bにおける周波数の外部磁界依存性を示す。両材料とも発振周波数は外場に対し、ほぼ線形に増加を示している。負の H_k を持つ材料Bでは、材料Aと比較し、同一の外部磁界において約6GHz低い周波数が観測された。この結果はFGL材料Bが持つ負の H_k によって、FGL内の有効磁界が低減したためと考えられる。得られたBの材料の外部磁界依存性より、12kOe近傍における発振周波数を外挿して見積もると24GHz、となる。材料Aに比較し負の H_k を持つ材料を用いることで、発振の周波数をアシストに最適な領域へコントロールすることができた。

1)A.Takeo et al. Intemag 2014 Dresden, AD-02

2)Vas'ko et al. Appl.Phys.Lett **89**, 092502 (2006)

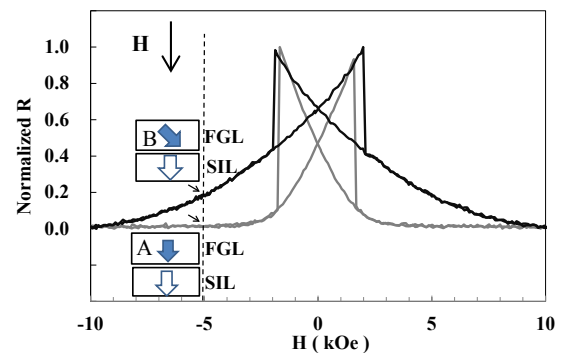


Fig.1 R-H curves for material A (Grey) and B (Black). The arrow shows schematic configuration of magnetization direction and external field.

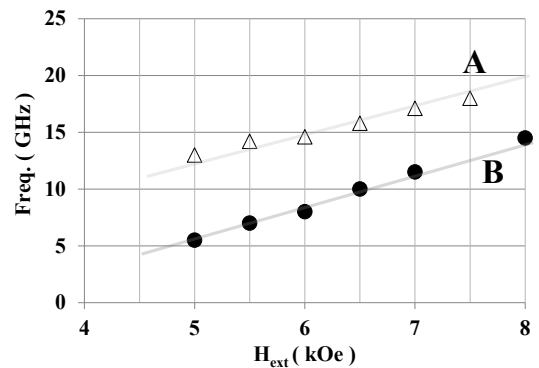


Fig.2 External field dependence of excitation frequency for material A and B. Evaluation voltage is -60mV for both materials.

スピントルク発振器における自己同期現象

常木澄人¹, E. Grimaldi², R. Lebrun², 久保田均¹, 薬師寺啓¹, 福島章雄¹, V. Cros², 湯浅新治¹¹産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター²Unité Mixte de Physique CNRS/Thales and Université

Self-synchronization on spin torque oscillator

S. Tsunegi¹, E. Grimaldi², R. Lebrun², H. Kubota¹, K. Yakushiji¹, A. Fukushima¹, V. Cros², and S. Yuasa¹¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Spintronics Research Center²Unité Mixte de Physique CNRS/Thales and Université

背景と目的

スピントルク発振器(STO)では近年、高い出力と狭い線幅を得るために複数 STO を使ったアレイとその同期現象の理解が必要とされている。¹⁾ここで重要な疑問は、同期される STO と注入される rf 電流間の遅延時間 Δt , または位相差 $\Delta\phi$ が同期現象に対し、どのような役割を果たすかである。²⁾これはアレイ化に対する課題だけではなく、STO の非線形特性を利用したニューラルネットワーク³⁾の実現においても重要な課題であると考えられる。本研究では、delayed feedback 回路を利用することで、同期現象の位相差依存性を調査した。

実験方法

図 1 に delayed feedback 回路の模式図を示す。STO は vortex-STO⁴⁾を使用した。STO に直流電流 3.7 mA, 垂直磁場 3 kOe を印加し、STO から発生した rf 電流を固定端反射により STO に再注入した。STO の出力は方向性結合器を通して測定した。STO と rf 電流の位相差 $\Delta\phi$ は全線路の遅延時間 Δt と STO の周波数 f_{STO} を用いて $\Delta\phi = 2\pi f_{\text{STO}} \Delta t + \pi$ と計算した。

結果と考察

図 2 に規格化出力 p_0 と FWHM の $\Delta\phi$ 依存性を示す。 p_0 , FWHM は $\Delta\phi$ に対し、 2π の周期で変化し、出力の極大値と FWHM の極小値を持つ $\Delta\phi$ には $\pi/2$ の位相差があり、自己同期現象が実現されたことがわかった。この結果は、遅延自己同期を考慮にいたした Thiele の式で理解でき²⁾, 同期現象において Δt , $\Delta\phi$ が重要になることを実験的に示したものである。

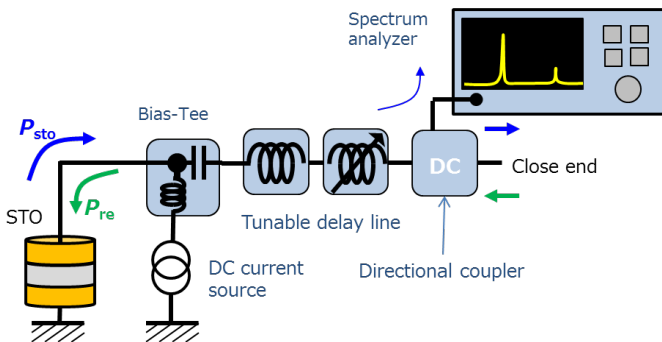
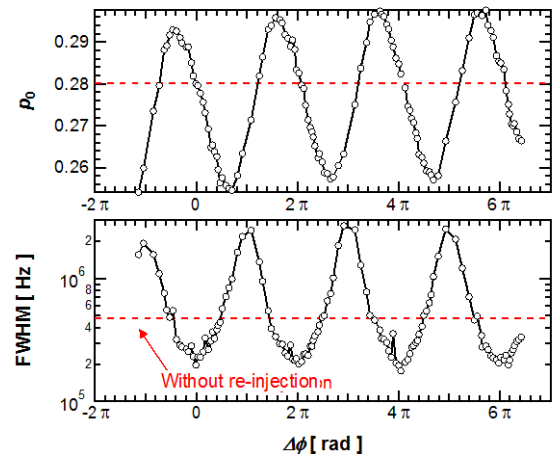


Fig.1 Schematic image of delayed feedback circuit

Fig.2 $\Delta\phi$ dependence of normalized power p_0 and FWHM.

参考文献

- 1) B. Georges, J. Grollier, V. Cros, and A. Fert, Appl. Phys. Lett. 92, 232504 (2008)
- 2) G. Khalsa, M. D. Stiles, J. Grollier arXiv:1505.04102 [cond-mat.mes-hall]
- 3) G. Csaba, et. Al., 13th Int. Workshop Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA), 2012, p. 1.
- 4) S. Tsunegi, H. Kubota, K. Yakushiji, M. Konoto, S. Tamaru, A. Fukushima et. al., APEX. 7, 063009 (2014).

負のスピントルク材料を有するスピントルク発振子の発振特性

清水真理子、鴻井克彦、*村上修一、藤田倫仁、*山田健一郎、竹尾昭彦
(株式会社東芝 セミコンダクター&ストレージ社、*株式会社東芝 研究開発センター)

Oscillation properties for a spin torque oscillator with a negative polarity material as a SIL interface layer

M. Shimizu, K. Koi, *S. Murakami, N. Fujita, *K. Yamada, and A. Takeo

(Toshiba Semiconductor and Storage Products Company, *Toshiba R&D center)

はじめに

高周波アシスト記録技術 (MAMR) は、HDD の次世代記録ヘッド技術として注目されている¹⁾。高周波磁界発生源として用いる垂直スピントルク発振子 (STO) の発振効率を向上させる構成として、スピントルク注入層 (SIL) を2層設ける dual SIL 構成²⁾が提案されている。記録ヘッドの強いギャップ磁界中で動作する STO では、Fig.1 のように発振層 (FGL) と SIL の磁化がギャップ磁界に平行状態となる磁化配列が安定となる。この磁化配列において、2つの SIL からのスピントルクを FGL に対して強め合う方向に作用させるために、一方のスピントルク注入層 (SIL2) の界面に FeCr などの負のスピントルク ($P < 0$) 材料³⁾を適用する構成を検討している。本報告では FeCr のスピントルク注入効率を調べる目的で single SIL STO を作成し、FeCo を用いた場合との比較を行った結果を報告する。

実験方法

STO の膜構成は、Cu 電極/Ta/Pt(2 nm)/SIL/Cu(3 nm)/FGL/キャップ層/Cu 電極とした。SIL は $[\text{Co/Pt}]_n$ 人工格子と界面層の積層構造とし、界面層として FeCo (2 nm) と FeCr (4 nm) のそれぞれについて素子を作成した。FGL には飽和磁化 1.9 T の FeCo 系材料を膜厚 16 nm で用いた。素子はサイズ 50 nm 角に加工した。FGL から SIL へ向かう電流方向を $J > 0$ とし、膜面垂直磁場中で出力と発振スペクトルを測定した。

実験結果

Fig.2 の挿入図に低電流バイアスを印加した際の R-H 特性を示す。ともに垂直 SIL の反転ヒステリシスが見られる。FeCr を用いた素子では、負の MR 比が実現できている。Fig.2 に垂直磁場 9 kOe 中の dV/dI 特性を示す。FeCr は、FeCo を用いた場合とは逆方向の J において、発振による抵抗変化が観測できている。FeCr の MR 比は FeCo の 1/3 程度であった。これは FeCr のスピントルク率が小さいためと考えられるが⁴⁾、一方で発振周波数 (Fig.3) は、同じ垂直磁場 9 kOe 中で、むしろ FeCr の方が低電流密度で同等の周波数に到達した。MR 比とスピントルク注入効率が相関しておらず、これは、FeCr でのスピントルク蓄積がスピントルクに有利に働いているためと考えられる。

参考文献

- 1) K. Yamada et al., TMRC 2013, 2) L. Berger, J. Appl. Phys. 93, 7693 (2003)
- 3) M. AlHajDarwish et al., J. Appl. Phys. 95, 6771 (2004)
- 4) C. Vouille et al., Phys. Rev. B 60, 6710 (1999)

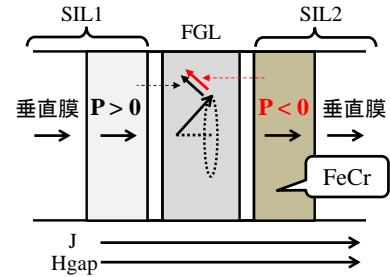


Fig.1 Schematic illustration of STO with dual SIL for MAMR.

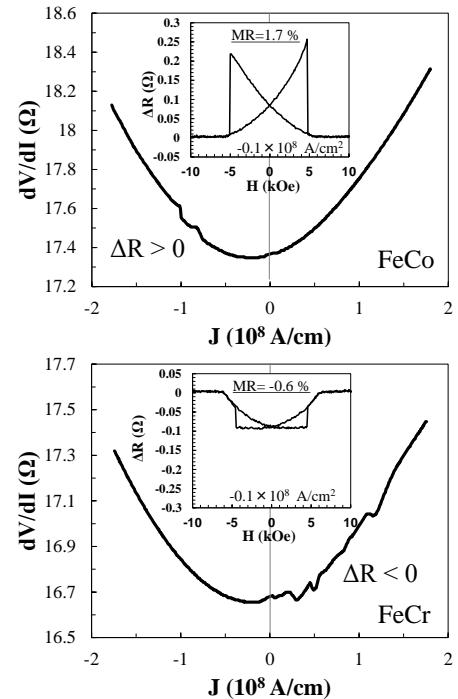


Fig.2 dV/dI vs. J . Inset: ΔR vs. H .

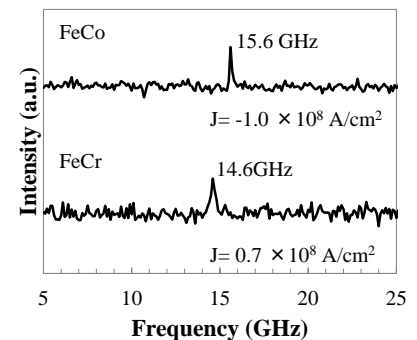


Fig.3 Oscillation spectrum.

Co₂(Fe, Mn)Siホイスラー合金を用いたボルテックス型スピントルク発振素子

山本 竜也¹、関 剛斎^{1,2}、高梨 弘毅¹

1. 東北大金研、2. JSTさきがけ

Vortex Spin Torque Oscillator using a Co₂(Fe, Mn)Si Heusler Alloy

T. Yamamoto¹, T. Seki^{1,2}, K. Takanashi¹

1. IMR, Tohoku Univ., 2. JST-PRESTO

緒言

スピントルク発振素子(STO)は強磁性体/非磁性体/強磁性体から構成されるナノサイズの発振素子である。STOを実用化する上で現在課題となっているのが、発振出力の増大および発振の周波数純度の向上である。ホイスラー合金の一種であるCo₂(Fe, Mn)Si (CFMS)は高いスピン分極率を有し、これらをSTOの強磁性電極として用いることはSTOの高出力化のための有効な手段である^{1,2}。一方で、磁気ボルテックスの磁化ダイナミクスを用いたSTOにおいては、単一の素子においてもQ値4000の非常に高い周波数純度が報告されている³。そこで、本研究ではCFMSをベースとしてボルテックス型STOを作製することで高出力かつ高Q値を同時に実現することを目指した。

実験方法

Fig. 1に作製した素子の模式図を示す。各CFMS層は室温において成膜した後、L₂I規則化を促進するため500 °Cで熱処理を行い、電子線リソグラフィ等を用いて素子構造へ微細加工を施した。本研究では、膜厚30 nmとした上部CFMS層を直径240 nmのディスク形状へと加工することで磁気ボルテックスの安定化を図った。作製した素子の発振特性評価のため、2端子の高周波プローブを用いて素子へ直流電流を印加し、スペクトラムアナライザーを用いて素子両端に生じた高周波電力を測定した。また、ロックインアンプを用いてMR曲線および直流電流に対する微分抵抗変化の測定を行った。

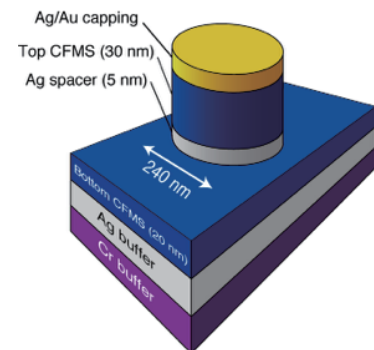


Fig. 1: Schematic illustration of the microfabricated STO. The thickness and the diameter of the top CFMS layer were chosen to stabilize a magnetic vortex.

実験結果

素子面内方向へ磁場を掃引して得られたMR曲線には、上部CFMS中における磁気ボルテックスコアの形成および消滅に起因した特徴的な磁気抵抗曲線が観察された。ボルテックスが存在する面内磁場の条件下においては、2 mA程度の直流電流を印加することで600 MHz近傍に発振ピークが観測された。電流を増加させてゆくに従い、発振周波数が高周波側へシフトするとともに発振が安定化し、発振線幅が200 kHz以下の周波数純度の高い発振が得られた。Fig. 2に面内磁場150 Oe、直流電流13 mAにおいて得られたパワースペクトルを示す。この条件下においては、発振線幅132 kHz、Q値4787の発振が得られた。さらに発振の条件を最適化することにより、10.3 nWの高出力かつ4000を超える高いQ値を得ることに成功した。本研究は、高いスピン分極率を有するホイスラー合金および磁気ボルテックスを用いることで、高出力かつ高Q値を示すSTOを実現出来ることを示唆している。

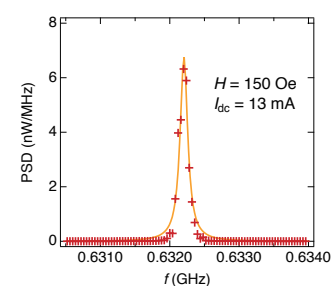


Fig. 2: Power spectrum measured at 150 Oe and 13 mA.

参考文献

- [1] T. Seki *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 092406 (2014).
- [2] T. Yamamoto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 092406 (2015).
- [3] V. S. Pribiag *et al.*, Nat. Phys. **3**, 498 (2007).

スピントルク発振素子を電圧制御発振器として用いたフェーズロック ドループの開発

田丸慎吾、久保田均、薬師寺啓、福島章雄、湯浅新治
(産総研 スピントロニクス研究センター)

Development of phase locked loop using a spin torque oscillator as a voltage controlled oscillator

S. Tamaru, H. Kubota, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa
(AIST, Spintronics Research Center)

はじめに

スピントルク発振素子(Spin Torque Oscillator, STO)は、微小な磁性体積層膜に直流電流を注入する事により歳差運動を励起し、それを磁気抵抗効果によってマイクロ波帯域の電気信号に変換する。STOはそのサイズ(数10~数100 nm)、広い周波数調整帯域、半導体プロセスとの整合性など、従来のマイクロ波発振器には無い数々の利点があるため、次世代マイクロ波発生器として期待されている。しかしながら現状では発振が不安定で位相ノイズが大きいため、実用化には至っておらず、発振を安定化する技術が STO 実用化には必須となる。これまでは STO に高周波信号を注入し発振を同期させることにより安定化する、注入同期(Injection Locking, IL)という手法が主に研究されてきており、既にいくつもの成功例が報告されている[1,2]。だが IL では STO の発振周波数と同じかそれより高い周波数の信号が必要なため、実用上あまり価値があるとは言えない。一方周波数安定化の手法として実用上幅広く用いられる手法に、位相同期回路(Phase Locked Loop, PLL)がある。IL と比べた際の PLL の最大の利点は、PLL では 10 MHz – 100 MHz といったずっと低い基準周波数に電圧制御発振器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)の位相を同期させる事である。この手法が STO に応用できれば、STO の実用化にとって大きな進展となるが、これまで成功例の報告はなかった。そこで我々は本研究において、STO を VCO として用いた PLL 回路を構築する事により、STO 発振の安定化を試みた。

実験方法及び結果

図1に STO を用いた PLL のブロック図を示す。STO は垂直磁化発振層と、面内磁化参照層を持つピラー型 STO である。これに平均で 7.344GHz 発振するようにバイアス磁場及びバイアス電圧をかける。このマイクロ波は、Bias-Tee の高周波パスを通り、2 個の低雑音増幅器(LNA1,2)によって増幅され、1/48 分周器で 153MHz に変換される。この信号は、153MHz の基準信号と位相比較され、その位相誤差に比例する信号(V_{PES})がループフィルタによって積分された後にバイアス電圧と足され、STO に帰還される。これにより、 V_{PES} が常に最小になるように STO の発振周波数が動的に調節される。

図2にフリーラン時と位相同期時における STO 出力のスペクトルを示す。フリーラン時のスペクトルは約 4 MHz の線幅であるのに対し、位相同期時は、7.344GHz の所に極めて鋭いピークが観測され、その線幅は測定限界の 1 Hz 以下となった。これは PLL により STO の発振が安定化された事を明確に示す結果である。講演では、この PLL のより詳細な構成や、位相同期時における残留位相ノイズ源の調査結果などについて報告する。

参考文献

- [1] W. H. Rippard et al., PRL **95**, 067203 (2005)
[2] B. Georges et al., PRL **101**, 017201 (2008).

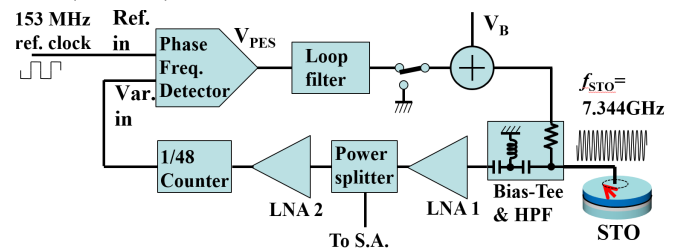


図1, STO を用いた PLL のブロック図

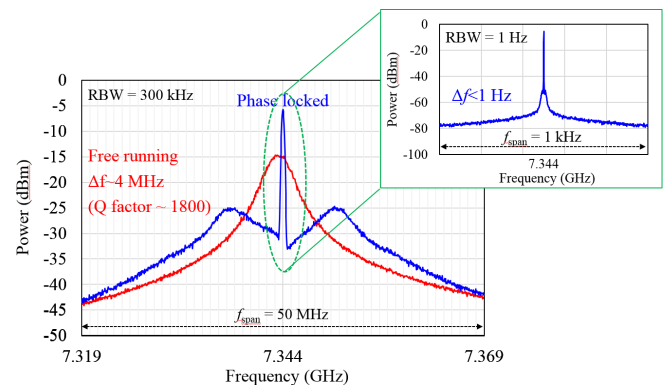


図2,フリーラン時と位相同期時の STO 発振スペクトル