Shape Anisotropy Effect on Spin Torque Noise in CPP-GMR Heads with a Current-Screen Layer

M. Shiimoto, H. Katada, K. Nakamoto, H. Hoshiya, Y. Ikeda, K. Hoshino, and N. Yoshida

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 2880 Kozu, Odawara, Kanagawa 256-8510, Japan

We analyzed the head noise in CPP-GMR heads to clarify the effect of shape anisotropy on spin-torque noise through an experiment and calculations. We fabricated two types of CPP-GMR heads with a current-screen layer (a nano-oxide layer with a confined current path), using two different track widths (50 nm and 90 nm) and the same stripe height (100 nm). The measured and calculated noise of a 50-nm-wide-track head is larger than that of a 90-nm one when the sensing bias voltage is 120 mV and the peak asymmetry is the same. This behavior is explained by considering that the shape anisotropy field enhances the tilt of the magnetization, especially at the edge of the track in the free layer, and that this magnetization configuration increases spin torque. Accordingly, we clarified that spin torque noise is sensitive to a head-internal field such as a shape magnetic anisotropy field, and that controlling the shape anisotropy field is important for reducing the spin-torque noise.

Key words: spin torque, CPP-GMR, spin transfer, noise, nano-oxide layer, read head, read sensor, magnetic fluctuation

カレントスクリーン型 CPP-GMR ヘッドにおけるスピントルクノイズの形状異方性効果

椎本正人・片田裕之・中本一広・星屋裕之・池田悠太・星野勝美・芳田伸雄

日立製作所中央研究所，神奈川県小田原市国府津 2880 番地（〒256-8510）

1. はじめに

ハードディスクドライブの高記録密度化のためには，再生ヘッドのサイズの狭小化，ならびに，高出力化と低ノイズ化が必要である．また，高速転送の観点から，再生ヘッドの抵抗値は適当な範囲（50～200 Ω ）に制御することも必要である．300 Gb/in²以上の面記録密度においては，これらの要求を満たす再生ヘッドの構造として CPP-GMR (Current-Perpendicular-to-the-Plane Giant-Magnetoresistive) ヘッドが最も有力な候補である．CPP-GMR ヘッドには大きく分けて「オールメタル型」と「カレントスクリーン型」の 2 つの種類がある．オールメタル型は，スペーサー層が非磁性金属であるのに対し，カレントスクリーン型はスペーサー層にスクリーン層と呼ばれる局所的に導電領域を有する酸化層を挿入した構成である．スクリーン型 CPP-GMR ヘッドではスクリーン層を最適化することにより，抵抗値を制御することが可能である．さらに電流狭窄効果により高い抵抗変化率（MR 比）を得ることができる¹⁻³⁾．

CPP 構造のヘッドでは，スピントルクノイズと呼ばれる巨大な磁化揺らぎノイズが発生することが理論的にも実験的にも知られている⁴⁻⁶⁾．我々は，トラック幅が 80 nm のカレントスクリーン型，ならびに，オールメタル型ヘッドのスピントルクノイズを実測と数値計算により評価した結果，カレントスクリーン型 CPP-GMR においては自由層と固定層がとほぼ直交した状態（波形非対称性 $\pm 20\%$ 以内）では発生しないが，オールメタル型では直交状態においても発生することを報告した^{7,8)}．これは，オールメタル型 CPP-GMR ヘッドでは大きな電流が流れているために，

電流磁界によって自由層磁化が不均一になっていることが原因であることが数値計算により明らかになった．つまり，スピントルクノイズはヘッド内部の磁界に敏感であることを示唆している．そこで，ヘッド内部磁界のスピントルクに与える影響を実測と数値計算により明らかにすることを目的として，スピントルクノイズの形状異方性依存性を研究した結果を報告する．

2. 実験及び計算方法

我々は，カレントスクリーン型 CPP-GMR ヘッドを試作した．スクリーン層には酸化 CoFe 層を用い，これを Cu 中間層内に挿入した．試作したヘッドのサイズを Table.1 に示す．素子高さ(SH) 100 nm，幾何学トラック幅(Tw) 50 nm の Head A と素子高さ(SH) 100 nm，幾何学トラック幅(Tw) 90 の Head B の 2 種類のヘッドを試作した．面積抵抗 (RA) は 0.25 $\Omega\mu\text{m}^2$ であり，MR 比は 4% である．トラックの両端には，自由層を単磁区化するために，磁区制御膜を設けている．Fig. 1 にヘッドの磁性層の構造と磁化方向の模式図を示す．図に示すように，電子は固定層から自由層へ流した．本研究においては再生出力測定とヘッドノイズ測定を行った．測定は全てバイアス電圧 (Vb) が 120

Table 1. Track width and stripe height for heads A, B, and C.

	Head A Meas. & cal.	Head B Meas. & cal.	Head C Cal.
Track width (nm)	50	90	50
Stripe height (nm)	100	100	50

Fig. 1 Schematic figure of the magnetic layers of CPP-GMR heads.

Fig. 2 Measured normalized magnetic noise vs. peak asymmetry for heads A and B.

mV の一定の条件において行った。ヘッドの膜全体としての電流密度 (J) は、 Vb と RA が一定であるため、一定値 4.8×10^7 A/cm² である。再生出力はヘッドの素子高さ方向に媒体磁場相当の一樣磁場を印加することで測定した。ヘッドノイズスペクトラムはスペクトラムアナライザーを用いて測定した。スピントルクノイズやマグノイズ⁹⁾に起因する磁化揺らぎノイズは、実測のヘッドノイズから抵抗ノイズの計算値を除去することにより求めた。HDDの帯域は約 1 GHz 以下であるので、磁化揺らぎノイズの実測値と計算値もこの帯域の平均値を用いた。また、磁化揺らぎノイズは MR 比に比例するためにこれで規格化したものを議論する。

数値計算は、スピントルクの項¹⁰⁾を考慮した Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を用いたマイクロマグネティクスシミュレーションにより熱やスピントルクに起因する磁化揺らぎノイズを求めた。各磁性層は $10(Tw) \times 10(SH) \times t$ nm のセルに分割し計算した。分極率は 0.3, ダンピングパラメータは 0.015, 計算時間間隔は 10 femto sec とした。

3. 実験・計算結果および考察

3.1 スピントルクノイズの測定結果

Fig. 3 Model of a current-screen layer in micromagnetic simulation.

Fig. 4 Calculated normalized magnetic noise vs. free layer for heads A, B, and C.

Fig.2に Head A と Head B の実測による規格化磁化揺らぎノイズと波形非対称性(ピークアシンメトリ)の関係を示す。波形非対称性は、自由層と固定層の磁化の相対角度を反映した値であり、ゼロのときに自由層と固定層の磁化は直交、マイナスのときに反平行方向であり、プラスのときに平行方向である。Fig.2 から、磁化揺らぎノイズは固定層と自由層が反平行状態になるほど増加している。この振る舞いは、スピントルクノイズの理論や実測の報告^{5,7)}と一致しており、スピントルクノイズの増加によるものであると考えられる。また、Head A の磁化揺らぎノイズは、Head B よりも大きく、スピントルクノイズが大きいと考えられる。

3.2 スピントルクノイズの自由層角度依存性

Fig.3に計算モデルを示す。スクリーン層による電流の絞込みを考慮し、伝導領域のみに電流が流れているモデルを用いた。ヘッドのサイズは、実測したヘッドに対応する Head A と Head B に加えて、比較のために、Head C ($Tw=SH=50$ nm)についても計算した。Fig.4に磁化揺らぎノイズと自由層磁化角度の時間平均の計算結果を示す。自由層磁化角度は、スピントルクにより磁化が曲がる効果を

Fig. 5 Calculated magnetic noise spectra for heads A and B when the magnetization angle in the free layer is about 30 degrees.

Fig. 6 Angle of magnetization in the free layer vs. time for heads A and B when the time-averaged magnetization angle in the free layer is 30 degrees.

含んでいる。自由層磁化角度はゼロのときに固定層磁化と自由層磁化は直交と定義し、マイナスのとき反平行方向であり、プラスのときに平行方向であると定義した。自由層磁化角度は外部から一様磁界を印加することによって変化させた。Fig. 4 から Head A の磁化揺らぎノイズは Head B よりも大きく、数値計算は実験結果を良く再現している。さらに、Head A の磁化揺らぎノイズは、最もサイズの小さい Head C の磁化揺らぎノイズと比較しても大きい。これらの結果から、スピントルクノイズは単純なサイズ効果ではなく、形状異方性磁界が影響していると考えられる。

3.3 ノイズスペクトラムの比較

Fig.5 に Head A と Head B の自由層磁化角度が約 -30° のときの Fig.4 に示す (A1) と (B2) におけるノイズスペクトラムを示す。Head A では Head B よりも大きな $1/f^\alpha$ ノイズが発現している。よって、Fig.4 において Head A の方が磁化揺らぎノイズが大きい原因は、巨大な $1/f^\alpha$ ノイズの発

Fig. 7 Schematic figure of the magnetic layers and head-internal field.

Table 2. Calculated head-internal field for heads A and B.

	Head A	Head B
Track width (nm)	50	90
Stripe height (nm)	100	100
Hard bias field in the track edge (Oe)	1400	1400
Current-induced field in the track edge (Oe)	130	180
Shape anisotropy field	Large	Small
Stiffness field H_{stiff} (Oe)	300	400

生にあることがわかる。Fig.6 に (A1) と (B2) 状態における自由層磁化角度の時間依存性を示す。(A1) 状態では (B2) 状態と比較して、Fig.5 (A1) 中の $1/f^\alpha$ ノイズに対応した長周期の大きな磁化揺らぎが発生していることが確認できる。

3.4 自由層磁化状態の比較

Head A の $1/f^\alpha$ ノイズが、Head B よりも大きい原因を明らかにするために、ヘッド内部磁界と磁化状態を比較する。Fig.7 にヘッド内部に印加されている磁界を模式的に示す。ヘッドには主に磁区制御磁界、電流磁界と形状異方性磁界が印加されている。Table 2 に、トラック端部領域に印加されている磁界の大きさを示す。磁区制御磁界は Head A と Head B で等しく、電流磁界は Head B の方が約 50 Oe 大きい。一方、素子高さ方向への形状異方性磁界は Head A の方が大きい。これは、Head A の実効的な異方性磁界 H_{stiff} の大きさが、Head B よりも約 100 Oe 小さいことからわかる。 H_{stiff} とは磁区制御磁界や形状異方性磁界などの全てのヘッド内部磁界を反映した値であり¹¹⁾、スピントルクがない状態におけるノイズスペクトラムの共鳴周波数を計算することにより導出した。このため、Head A の H_{stiff} が Head B よりも小さいのは、素子高さ方向への形状異方性磁界が大きいためであると考えられる。

Fig.8 に Head A と Head B のトラック端部における自由層磁化角度の時間依存性を示す。Fig.8 からトラック端部においても Head A の磁化揺らぎは Head B よりも大きいことがわかる。Fig.9 に自由層磁化角度が約 -30° である Head A と Head B の自由層の磁化状態を示す。(a)と(b)は時間平均した自由層の磁化状態を、(c), (d), (e), (f)は Fig.8 に示すある時間における磁化状態を示している。Fig.9 から時間平均した磁化状態(a)と(b)は、自由層内において均一に傾いていることがわか

Fig. 8 Dependence of the magnetization in the free layer on time for a CPP-GMR head for heads A and B.

る。一方、自由層が固定層と平行方向に大きく傾いた状態(c)と(d)では、磁化の傾きは Head A 方が大きい。また、この傾向はトラック端部において特に顕著である。自由層が固定層と反平行方向に傾いた状態(e)と(f)においても同様に、Head A の方が磁化の傾きが大きい。これは、Head A では素子高さ方向への形状異方性磁界が大きいために、磁化の傾きが増加しやすいためである。また、磁化同士は磁氣的に結合しているのでトラック端部の磁化の傾きが増大すると、トラック中心部の磁化も大きく傾く。このようにして、形状異方性磁界により磁化が大きく傾き、スピントルクノイズが増大すると考えられる。したがって、スピントルクノイズの抑制には形状異方性磁界などのヘッド内部磁界の制御が重要である。

4 まとめ

ヘッド内部磁界がスピントルクノイズに与える影響を明らかにするために、形状異方性磁界が異なる 2 種類のカレントスクリーン型 CPP-GMR ヘッドのスピントルクノイズを実測と数値計算により評価した結果、①素子高さ方向に形状異方性が大きいヘッドの方がスピントルクノイズは大きいこと②これは形状異方性磁界が特にトラック幅端部における磁化の傾きを増加させることにより、スピントルクノイズによって $1/f^{(n)}$ ノイズが増加すること③スピントルクノイズはヘッド内部磁界に敏感であること、の結論を得た。これらの結論より、スピントルクノイズを低減するためには、従来から知られている電流方向や自由層と固定層の相対角度の制御と共に、形状異方性磁界に代表されるヘッド内部磁界の制御も重要であることが明らかになった。

Fig. 9 Time-averaged (a), (b) and momentary (c), (d), (e), and (f) magnetization configurations of the free layer for heads A and B.

謝辞 日立製作所の目黒賢一氏、渡邊克朗氏、安井感氏、高澤浩幸氏、田中秀明氏、難波明博氏、日立グローバルストレージテクノロジーズの N. Smith 氏、J. Childress 氏、には本研究を行うにあたり多大のご協力を頂きました。ご協力頂いた方に深く感謝致します。

References

- 1) K. Nagasaka, Y. Seyama, L. Varga, Y. Shimizu, and A. Tanaka: *J. Appl. Phys.*, **89**, 6943 (2001).
- 2) H. Fukuzawa, H. Yuasa, S. Hashimoto, K. Koi, H. Iwasaki, M. Takagishi, Y. Tanaka, and M. Sahashi: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 2236 (2002).
- 3) K. Hoshino, H. Hoshiya, H. Katada, N. Yoshida, K. Watanabe, and K. Nakamoto: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 2926 (2005).
- 4) M. Covington, M. AlHajDarwish, Y. Ding, N. J. Gokemeijer, and M. A. Seigler: *Phys. Rev. B*, **69**, 184406-1 (2004).
- 5) J. G. Zhu and X. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 182 (2004).
- 6) N. Smith, J. A. Katine, J. R. Childress, and M. J. Carey: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 2935 (2005).
- 7) H. Katada, K. Nakamoto, H. Hoshiya, K. Hoshino, and N. Yoshida, *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 2450 (2006).
- 8) H. Katada, M. Shiimoto, K. Nakamoto, H. Hoshiya, K. Hoshino, and N. Yoshida, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 31 (2007).
- 9) N. Smith and P. Arnett: *Appl. Phys. Lett.*, **78** 1448 (2001).
- 10) J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.*, **159**, L1 (1996).
- 11) K. B. Klaassen, X. Xing and J. C. L. Peppen: *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 2307 (2005).

2007年10月4日受理、2008年1月9日採録