積層変調 Co/Pt 多層膜の磁気光学特性 —中間層依存性—

Magneto-Optical Properties in Layer-Modulated Co/Pt Multilayers: Interlayer Dependence

橋本 進・柚須圭一郎・猪俣浩一郎

(株)東芝総合研究所, 川崎市幸区小向東芝町 1 (〒210)

S. Hashimoto, K. Yusu and K. Inomata

Research & Development Center, Toshiba Corporation,
Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

The magnetic and magneto-optical properties of rf sputter-deposited layer-modulated Co/Pt multilayers with Cu and Ag interlayers were investigated. The multilayers in which each Co layer is sandwiched between Pt layers exhibit perfect squareness in the polar Kerr hysteresis. In the Co/Pt multilayers with Cu interlayers, the Kerr rotation angle has a maximum at a wavelength of 600 nm for 50 Å Cu thickness.

Key words: multilayer, cobalt, platinum, layer-modulation, Kerr rotation, Faraday rotation

1. はじめに

Co/Pd 多層膜における垂直磁気異方性の発見¹⁾以来, Co/Pd^{1)~6)}, Co/Pt^{3)~8)} および Co/Au^{9), 10)} 多層膜の研究が多く行われている。これらの大きな垂直磁気異方性の起源は表面異方性にあり, そのため一般に Co 層の膜厚の減少とともに垂直磁気異方性は大きくなる。垂直磁気異方性は成膜法に依存するが⁶⁾, Co/Pt の場合 8~14 Å の Co 膜厚で得られる。最近, Ochiai らは, 垂直磁化曲線の角形比が, 膜厚に強く依存することを報告した⁴⁾。また彼らは角形比 1 の磁化曲線は全膜厚が数 100 Å の場合に得られるが, その厚さは Pt に対する Co の膜厚比 r に依存することを示した。彼らが報告した角形比 1 の最大 r 値は 0.59 (4.7 Å Co/8.0 Å Pt) である。

一方, 著者らは Pt と Co の膜厚比を変調した積層変調膜において角形比 1 を維持したまま r を大きくすることができることを示し, $r=1$ で完全垂直磁化膜を得た¹¹⁾。また, このような r の大きい積層変調膜では Kerr 回転角がかなり大きくなることも示した¹²⁾。本論では積層変調膜における中間層として Cu と Ag を用い, Pt の場合と比較検討した。

本実験で作製した積層変調膜の構造模式図を Fig. 1 に示す。

2. 実験方法

試料の作製は, RF スパッタ装置を用いて行った。成膜の前に 5×10^{-6} Torr 以下になるまで排気した後, Ar (純度 99.999%) を 5×10^{-3} Torr 導入し, 投入電力 0.6 から 3.7 (W/cm²) でスパッタを行った。ターゲットは純度が 99.9% 以上の Co, Pt, Cu および Ag を用い, 予め個々の成膜速度を把握した上で, 基板を 10 rpm の速度で自転させながら成膜した。基板は面積 10×10 mm², 厚さ 0.5 mm の石英ガラスを用い, 基板温度は室温とした。基本的な膜構造は, 100 Å の Pt を下地層とした 5 Å Pt/(5 Å Co/5 Å Pt)₂/中間層/(5 Å Pt/5 Å Co)₂/100 Å Pt (中間層: Pt, Cu, Ag) である。

多層膜の膜構造を X 線回折 (XRD), 磁気特性を VSM, 磁気光学効果を Kerr 効果測定装置 (測定波長は主に 400 nm) によりそれぞれ評価した。

3. 実験結果および検討

3.1 中間層 Pt

Co 膜厚を 5 Å, Pt 膜厚を 5 Å とした (5 Å Pt/5 Å Co)_n/100 Å Pt/基板の Kerr ヒステリシス曲線 (θ_k) と積層数 (n) の関係を Fig. 2 に示す。角形比 (θ_{kr}/θ_{ks}) は $n \leq 3$ の場合 1 であり, 完全な垂直磁化膜になっているが, $n > 3$ になると角形比が 1 以下になっている。 $n=2$ の場合について, Pt の膜厚を 5 Å とした場合と 15 Å とした場合を比較して Fig. 3 に示す。前者の方が著しく保磁力 (H_c) が大きく, 膜厚比 r を高めるとは高保磁力化にも有効であることがわかる。

Kerr 回転角を増大させるためには膜厚をある程度大きくする必要がある。角形比を 1 に保ったまま Kerr 回転角を増大させる方法として提案したのが積層変調膜である。Fig. 4 に中間層 Pt 膜厚を変えた場合の Kerr ヒステリシス曲線を示す。膜面から光を入射した場合の

Fig. 1 The model of layer modulation in Co/Pt multilayers.

Fig. 2 Kerr hysteresis loops of $(5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})_n/100\text{Å Pt}$ multilayers.

Fig. 3 Kerr hysteresis loops of $(5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})_2/100\text{Å Pt}$ and $(15\text{Å Pt}/5\text{Å Co})_2/100\text{Å Pt}$ multilayers.

Kerr 回転角 (θ_k) は中間層がない場合 $(5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})_4$ の 0.19° から中間層膜厚が厚くなるに従って単調に減少し、 50Å では 0.13° まで小さくなっている。一方、角形比は中間層がない場合 0.94 であったものが 10Å Pt 中間層を設けただけで 1 となり、それ以上厚くしても角形比に変化は見られない。

3.2 中間層 Cu

中間層として結晶構造が Pt と同じ fcc で格子定数が fccCo に近い Cu を用いた。膜構造は、Cu 膜厚を 50Å

Fig. 4 Kerr hysteresis loops of $(5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})_2/t\text{Pt}/5\text{Å Co}/5\text{Å Pt}/5\text{Å Co}/100\text{Å Pt}$ for $t=10, 20, 30$ and 50Å .

Fig. 5 Kerr hysteresis loops of $5\text{Å Pt}/(5\text{Å Co}/5\text{Å Pt})_2/50\text{Å Cu}/(5\text{Å Co}/5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})/100\text{Å Pt}$ multilayers.

一定とし、①Co の上に直接 Cu を成膜した $5\text{Å Pt}/(5\text{Å Co}/5\text{Å Pt})_2/50\text{Å Cu}/(5\text{Å Co}/5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})/100\text{Å Pt}$ および ②Pt を介して Cu を成膜した $5\text{Å Pt}/(5\text{Å Co}/5\text{Å Pt})_2/50\text{Å Cu}/(5\text{Å Pt}/5\text{Å Co})_2/100\text{Å Pt}$ である。Fig. 5 に Kerr ヒステリシス曲線を示す。 θ_k は①が 0.10° 、②が 0.12° で②の方が若干大きい。これは、Cu 層の下にある Pt の Co によるスピン偏極の影響がでているものと考えられる。角形比は①が 0.7 、②が 1 である。これより中間層として Pt 以外の Cu を用いても垂直磁化膜が得られるが、この場合 Co は常に Pt に挟まれていないと完全な垂直磁化膜にならないと言える。これは Co/Pt 多層膜の垂直磁気異方性のメカニズムを示唆しており、Pt と Co の接触の重要性をうかがわせる。

次に、上記②における Cu 中間層膜厚を 10Å から 100Å まで変化させた試料について、その磁気光学特性を調べた。下地 Pt 層は 10Å とした。Fig. 6 に Cu 膜厚が $10, 20, 50\text{Å}$ の場合の Kerr 曲線を示す。いずれの場合も垂直磁化膜であるが、Cu 膜厚が 20Å 以上では Kerr 曲線がステップ状になっていることがわかる。こ

Fig. 6 Kerr hysteresis loops of 5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Cu}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt for t=10, 20 and 50Å.

Fig. 9 Wavelength dependence of Kerr rotation angle θ'_k measured from the substrate-side in 5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Cu}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt for t=0, 20 and 50Å.

Fig. 7 Kerr rotation angle θ_k (film side) and θ'_k (substrate side) for 5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Cu}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt as a function of Cu thickness t_{Cu}.

Fig. 8 Faraday rotation angle θ_f and coercive force H_c of 5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Cu}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt as a function of Cu thickness t_{Cu}.

れは Cu 膜厚が 20Å 以上では中間層を介した上下の磁氣的結合がほとんどなく、かつ保磁力が互いに異なるためであると思われる。Fig. 7 に Cu 膜厚と Kerr 回転角ならび H_c との関係を示す。基板側から光を入射した場合の Kerr 回転角 (θ'_k) は Cu 中間層がない場合の 0.72° から 10Å の Cu 中間層を設けただけで 0.35° へ、膜面側入射した場合の Kerr 回転角 (θ_k) は 0.35° から 0.18° と急激に減少している。しかし、Cu 膜厚が 10Å 以上では Kerr 回転角は、Cu 膜厚にあまり依存していないことがわかる。ただし、Cu 膜厚が 100Å になると完全な垂直磁化膜とはならなかった。 H_c は中間層がない場合は 0.34 kOe であるが、10Å Cu 中間層を設けると小さくなる。しかし、中間層膜厚が厚くなると Fig. 6 で述べたように、小さな保持力 (H_{c2}) と大きな保持力 (H_{c1}) が現れる。 H_{c2} は 10Å Cu とほぼ同じで Cu 膜厚に依存していないが、 H_{c1} は 20Å Cu で 0.32 kOe、50Å Cu で 0.40 kOe と増大する。

H_{c1} , H_{c2} が Cu 中間層を介した上下どちらの Co/Pt 層に対応するかを調べるために、上記②において Cu 膜上に Co/Pt 層がない膜の H_c を測定したところ約 0.2 kOe であった。この値は H_{c2} に近いことから H_{c1} は Cu 中間層上の Co/Pt 膜であることが考えられる。

中間層 Cu による Kerr 回転角の急激な変化が Co の磁氣的状態の変化によるものか否かを調べるために、ファラデー効果を測定した。その結果を Fig. 8 に示す。いずれの試料も θ_f (θ_{co} は Co 膜厚あたりに換算した値) は 0.19° 程度であることから、Co の磁氣的状態に変化はないものと思われる。このことから、中間層 Cu が厚くなると、光が透過しなくなり、Cu の先にある Co/Pt 層からの Kerr 回転角の寄与しなくなることが主な原因だと考えられる。

Fig. 10 Kerr hysteresis loops of 5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Ag}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt for t = 20, 30 and 50Å.

Fig. 11 Kerr rotation angle θ_k of 5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Ag}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt as a function of interlayer thickness t_{Ag}.

Fig. 9 に Cu 中間層膜厚が 20Å と 50Å の場合における θ'_k の波長依存性を示す。この図から 20Å Cu の θ'_k は短波長側で単調増大する傾向を示しているが、50Å Cu では 600 nm 付近で θ'_k に小さな山が見られる。これは、Cu の光学的吸収端によるエンハンス効果¹³⁾を示しているものと思われる。

3.3 中間層 Ag

次に、Ag を中間層とした積層変調膜 {5Å Pt/(5Å Co/5Å Pt)₂/t_{Ag}/(5Å Pt/5Å Co)₂/10Å Pt} を作製した。Ag 膜厚 t は 10, 20, 30, 50, 100Å である。これらの試料で角形比 (θ_{tr}/θ_k) = 1 の垂直磁化膜が得られたのは、Ag 膜厚が 30Å の場合のみであった。その Kerr 曲線を 20 および 50Å の場合と併せて Fig. 10 に示す。Cu に比べ Ag の方が、その膜厚によって角形比がかなり変化する理由は Ag 膜の性状と関係している可能性が高い。すな

わち Ag は一般に均質な膜ができにくいので、その膜の表面性に影響されるものと思われる。Ag 膜厚に対する Kerr 回転角を Fig. 11 に示した。Fig. 11 には比較のために中間層 Cu の場合の θ_k も示した。 θ_k の Ag 膜厚に対する低下が Cu の場合に比べると少ない。

4. まとめ

(1) Co/Pt 積層変調膜における中間層として Pt に加えて Cu, Ag を検討した結果、いずれの場合も垂直磁化膜が得られ、その膜厚を制御することで角形比が 1 でステップのない完全垂直磁化膜を得た。

(2) 波長 400 nm における Kerr 回転角は、中間層 Pt > Ag > Cu の順に大きい。

(3) Cu 中間層の場合、Co は常に Pt に接している場合のみ完全垂直磁化膜となった。これは、Co/Pt 多層膜の垂直磁気異方性の原因が Co-Pt 界面が異方性に寄与していることを示唆している。また、中間層 Cu の一方が Co と接触した Pt/Cu/Co/Pt 型の積層変調膜の Kerr 回転角は、Co が Pt と接触している Cu/Pt/Co/Pt 型の積層変調膜のそれよりも小さい。これは Co と接触した Pt のスピン偏極効果が Kerr 回転角に寄与していることを示唆しているものと思われる。

(4) Cu 中間層が 50Å の場合、Kerr 回転角の波長依存性において、600 nm 付近で Cu の光学的吸収端に基づくと思われるピークを観測した。

文 献

- 1) P. F. Carcia, A. D. Meinhardt and A. Suna: *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 178 (1985).
- 2) P. F. Carcia: *J. Appl. Phys.*, **63**, 5066 (1988).
- 3) H. J. G. Draaisma, F. J. A. den Boerder and W. J. M. de Jonge: *J. Appl. Phys.*, **63**, 3479 (1988).
- 4) Y. Ochiai and S. Hashimoto: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3755 (1989).
- 5) S. Hashimoto and Y. Ochiai: *J. Magn. Magn. Mat.*, **88**, 211 (1990).
- 6) W. B. Zeper, F. J. A. M. Greidanus, P. F. Carcia and C. R. Fincher: *J. Appl. Phys.*, **65**, 4871 (1989).
- 7) W. B. Zeper, F. J. A. M. Greidanus, P. F. Carcia: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3767 (1989).
- 8) C. L. Lin and H. V. Do: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1700 (1990).
- 9) F. J. A. den Broeder, D. Kuiper, A. P. van de Mosselaar and W. Hoving: *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 2769 (1988).
- 10) S. Araki, T. Takahata and T. Shinjo: *J. Mag. Soc. Japan.*, **13**, 339 (1989).
- 11) K. Inomata, S. Hashimoto and K. Yusu: *J. Magn. Magn. Mat.*, to be published.
- 12) K. Yusu, S. Hashimoto and K. Inomata: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 435 (1992).
- 13) T. Katayama, H. Awano and Y. Nishihara: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **55**, 2539 (1986).

1992 年 6 月 19 日受理, 1992 年 9 月 24 日採録