

磁歪と磁気異方性：現象論と電子論

井上順一郎^{1,2}、吉岡匠哉¹、土浦宏紀¹

(東北大学応用物理学専攻¹、筑波大学物理工学域²)

Magnetostriction and magnetic anisotropy: phenomenology and electron theory

J. Inoue^{1,2}, T. Yoshioka¹, H. Tsuchiura¹

(Dept. Appl. Phys. Tohoku University², Inst. Appl. Phys., Univ. of Tsukuba¹)

はじめに

磁気異方性と磁歪は密接に関連した現象である。磁歪は磁気体積ないしは磁気弾性効果でもある。近年永久磁石として注目されている希土類金属間 (R-TM) 化合物においても後者の効果は大きいものとなっている。しかしながら、R-TM 化合物における磁気異方性と磁歪の関係は十分には調べられてはいない。また磁歪・磁気弾性効果に対する電子論も確立されているとはいえない。R-TM 化合物の結晶構造は、cubic, tetragonal, hexagonal と多様である。本研究では、まずこれらの結晶構造における磁気異方性と磁歪との関係を現象論により統一的に取り扱う。続いて、電子論による磁気弾性係数の見積もり法を述べ、具体的計算例を示す。

現象論

磁歪によって生じる有効的磁気異方性は、磁性体の弾性エネルギーと磁気弾性エネルギーの和 (自由エネルギー F) を最小にする条件から求まる。形式的に $F = e^t \cdot C \cdot e / 2 + e^t \cdot B$ と表される。ここで e, C, B はそれぞれ弾性テンソル成分の 1 次元ベクトル表示、弾性テンソル、磁気弾性係数を含む 1 次元ベクトルである。 F は磁化方向に依存するため、最小条件から自発磁歪と有効的磁気異方性が求まる。

磁気弾性係数に対する電子論

現象論で用いた自由エネルギーの式を用いると、体積一定のもとで適当な格子変形 (例えば tetragonal 変形) を与えた場合のエネルギー変化を磁化方向の関数として得ることができる。他方、そのような変形を与えた時の電子系エネルギーを電子論により見積もることが可能である。両者の比較から磁気弾性定数を見積もることができる。例えば、tetragonal 格子をさらに tetragonal 変形させた場合の一軸異方性エネルギーが次のように求まる。

$$K_u = F(100) - F(001) = K_{u0} - (B_1 - 2B_2 + 2B_3)\chi / 3$$

ここで、 B_i は磁気弾性係数である。Cubic 格子では、 $B_2 = 0, B_3 = B_1$ である。また χ は歪の程度である。

計算例として L1₀-FePt と Y₂Fe₁₄B に対する結果を表 1 に示す。第一原理計算は文献値[1,2]である。数値の比較・検討については講演で述べる。

		L1 ₀ -FePt			Y ₂ Fe ₁₄ B		
	exp.	1st.Principles	RSTB		exp.	1st.Principles	RSTB
K_u	3.2	7.0 - 8.1	58		1.1	0.06	0.16
$\delta K_u / \delta(c/a)$	—	61	52		—	—	0.07

表 1 L1₀-FePt と Y₂Fe₁₄B に対する一軸異方性とその c/a 依存性の計算例、単位は 10⁶J/m³

参考文献 [1] A. Sakuma, J. Phys. Soc. Jpn. 63, 3053 (1994)

[2] Y. Miura et al., J. Appl. Phys. 115, 17A765 (2014)

Ru/FeCoB 膜における異方的応力形成過程の評価

中込将成、高村陽太、中川茂樹
(東京工業大学 工学院 電気電子系)

Investigation of development of anisotropic stress in Ru/FeCoB film during film growth

Masanari Nakagome, Yota Takamura, and Shigeki Nakagawa

(School of Engineering, Tokyo Institute of Technology)

はじめに

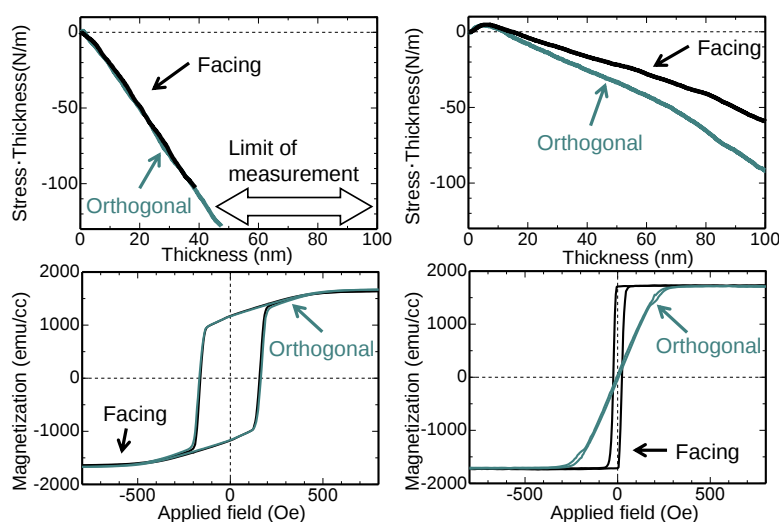
対向ターゲット式スパッタリング法(FTS)法では、ターゲットと基板の位置関係からターゲット対向方向 (Facing direction) とそれに膜面内で直交する直交方向 (Orthogonal direction) で、基板に到達するスパッタ粒子は異方的な運動量と入射角度を有する。Ru 薄膜上に作製した FeCoB 膜内には上記の効果とみられる異方的な残留応力が形成され、これによる逆磁歪効果に起因した高い異方性磁界 H_k を持つ Ru/FeCoB 膜が形成できる¹⁾。この異方的な応力の発現機構や形成過程を明らかにするために、膜形成中の薄膜内の応力を膜面内の異なる2方向で in-situ 観測できるシステムを構築した²⁾。今回、下地層の Ru の形成条件や膜厚が上部層の FeCoB 膜中の異方的応力形成過程に大きく影響を与えることが観測できたので報告する。

実験方法

Ru/FeCoB 薄膜は FTS 法を用いて成膜した。厚さ 60 μm のガラス基板の一端を固定し、成膜中の内部応力によるガラス基板のたわみ量をレーザー変位計により測定する片持ち梁法で in-situ 観測した。この際ターゲットの対向方向と直交方向の2方向で基板の変位を測定し、2方向同時に内部応力を評価した²⁾。

実験結果

Fig.1 に Ru 下地層の膜厚を 5 nm とし、スパッタリングガス圧を変えた際の Ru/FeCoB 層の応力変化と磁化特性の結果を示す。Fig.1(a)は Ru を 3 mTorr で形成した試料の応力と膜厚の積 (測定基板のたわみ量に比例) の膜厚依存性を示す。40nm 付近でたわみ量の測定上限に達しているが、強い圧縮応力が膜堆積初期段階から形成され、面内方向での応力差もほとんど見られていない。このため磁気特性では逆磁歪効果による垂直磁気異方性が高くなった磁化特性が現れている。これに対して(b) は Ru を 6 mTorr で形成した試料の結果であるが、膜堆積初期段階で引張性の応力が観測され、その後膜堆積に従って2方向で応力差が形成されていく様子がわかる。この異方的な残留応力により磁化特性は 280 Oe 程度の高い H_k を示すことがわかる。



(a) Ru: 5nm, 3mTorr (b) Ru: 5nm, 6mTorr
Fig.1 Stress curve and Magnetic property of Ru/FeCoB film

参考文献

- 1) A. Hashimoto, K. Hirata, T. Matsuu, S. Saito, and S. Nakagawa, IEEE Trans. Magn. 44, 3899 (2008).
- 2) 中込将成, 林原久憲, 高村陽太, 中川茂樹, 第 39 回 日本磁気学会学術講演会, 10aC-6, 2015

負の超磁歪を有する SmFe_2 薄膜の作製と逆磁歪効果の評価

富田誠人, 石谷優剛, 高村陽太, 中川茂樹
(東京工業大学)

Fabrication of SmFe_2 thin films with negative giant magnetostriction and evaluation of inverse magnetostrictive effect

M. Tomita, Y. Ishitani, Y. Takamura, and S. Nakagawa
(Tokyo Institute of Technology, Japan)

1 はじめに

トンネル磁気抵抗素子 (MTJ) を応用した、磁気抵抗メモリ (MRAM) は、不揮発性、高速読み書き、高書き込み耐性といった利点から次世代の RAM として期待されている。しかしながら、スピン注入磁化反転による MTJ の磁化反転時に大きな電力消費を伴うことが欠点とされる。この問題の解決策として、負の超磁歪材料を磁気トンネル接合 (MTJ) 素子のフリー層に使用し、逆磁歪効果を利用して磁化反転時の磁気異方性エネルギーを低下させ、消費電力を削減する構造の逆磁歪 MTJ (IMS-MTJ) が提案されている¹⁾。そこで、負の超磁歪材料である SmFe_2 に注目した。 SmFe_2 は、バルクで -2060 ppm という巨大な負の磁歪定数を持ち²⁾、大きな逆磁歪効果を期待できる。しかし、 SmFe_2 の薄膜状態での磁歪特性の詳細な調査は行われていない。今回は、負の超磁歪フリー層用の SmFe_2 薄膜の作製と、その逆磁歪効果について調査した結果を報告する。

2 実験方法

SmFe_2 薄膜は、対向ターゲット式スパッタ法により、厚さ $30\text{ }\mu\text{m}$ のガラス基板上に室温で Ar ガス圧 0.1 Pa で成膜した。試料構造は Glass sub. ($30\text{ }\mu\text{m}$)/Ta (20 nm)/ SmFe_2 (100 nm)/Ta (10 nm) とし、XRD により SmFe_2 薄膜の結晶性を評価した。逆磁歪効果は、3D プリンタで専用に設計した治具を用いて、試料を曲げる前後の磁化特性を VSM によって測定することで評価した。

3 実験結果

Glass sub./Ta/ SmFe_2 構造と Glass sub./Ta 構造の XRD の結果比較を Fig.1 に示す。Fig.1 からは、 SmFe_2 (220) ピークと $\beta\text{-Ta}$ (002) ピークの位置が近く、はっきりとした SmFe_2 薄膜の結晶化は示せなかった。しかし、Ta 単層の構造に比べて Ta/ SmFe_2 構造のときは高角側にピークがシフトしており、 SmFe_2 が結晶化していることを示唆している。この Glass sub./Ta/ SmFe_2 構造の試料に応力を加え、逆磁歪効果を測定した。試料は、磁化容易軸方向に引張応力、困難軸方向に圧縮応力が加わるように曲げ、VSM による磁化特性測定時の印加磁界方向は困難軸方向とした。Fig. 2 は、 SmFe_2 を室温成膜した試料について、曲げることによる応力を加える前と後の磁化曲線の第一象限を拡大した図である。点線は応力の印加前、実線は応力の印加後の磁化曲線のうち、それぞれの減磁曲線を示す。応力印加前よりも印加後のほうが磁化しやすくなっていることがわかる。測定方向には圧縮応力が印加されているため、 SmFe_2 は薄膜状態でも負の磁歪定数を示すことがわかる。また、応力印加前後の磁化曲線に囲まれた領域の面積は、磁化エネルギーの変化量に相当し、その大きさは 4.9 kJ/m^3 と算出できた。応力印加時の曲率半径と、 SmFe_2 の物性値から、 SmFe_2 薄膜に印加される応力の大きさは 22.4 MPa と計算でき、この応力と磁化エネルギーの変化量から作製した SmFe_2 薄膜の磁歪定数は -150 ppm と評価できる。この値は、バルクでの値に及ばないものの、他の材料よりも比較的大きな値である。 SmFe_2 は薄膜でも比較的大きな磁歪定数を持つことから、薄膜のさらなる結晶化に取り組み、より大きな磁歪定数をもつ薄膜を作製することが課題となる。

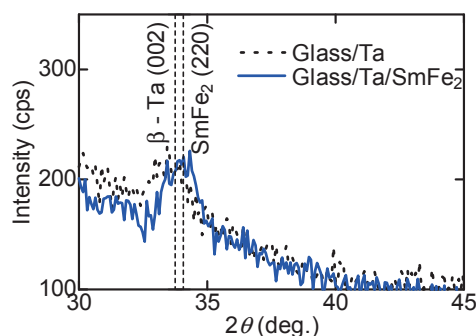


Fig. 1 XRD pattern of glass/Ta/ SmFe_2 and glass/Ta structure

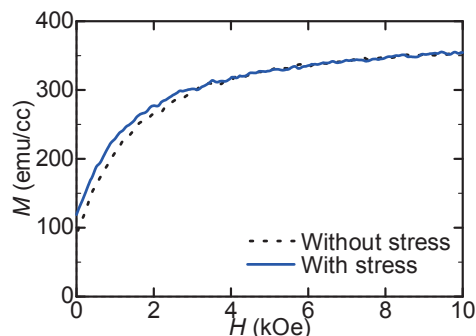


Fig. 2 Transition of magnetization from without stress to with applied stress of SmFe_2 film deposited at R.T.

References

- 1) Y. Takamura, Y. Shuto, S. Yamamoto, H. Funakubo, M. K. Kurosawa, S. Nakagawa, and S. Sugahara: *In 2016 Joint International EUROSOI-ULIS, IEEE*, 72 (2016).
- 2) W. J. Ren, J. L. Yang, B. Li, D. Li, X. G. Zhao, and Z. D. Zhang: *Physica B: Condensed Matter*, **404**, 20 (2009).