

X/Co-Fe-B 薄膜における

飽和磁気ひずみおよびダンピング定数の膜厚による変化

田中 治憲, 宮崎 孝道, 栢 修一郎, 遠藤 恭 (東北大学)

Change in saturation magnetostriction and damping constant of X/Co-Fe-B thin films with thickness

H. Tanaka, T. Miyazaki, S. Hashi, Y. Endo (Tohoku University)

はじめに

Co-Fe-B 薄膜は高い飽和磁気ひずみ (λ_s) を有していることから, MTJ 素子を用いた高感度磁気ひずみ検知素子への応用が期待されている¹⁾. これまでの研究では, $(\text{Co}_{35}\text{Fe}_{65})_x\text{B}_{100-x}$ 薄膜における λ_s は, B 組成の増加にともない減少することが報告されている²⁾. また, 10 nm 厚の Co-Fe-B 薄膜の λ_s 値は約 31 ppm と¹⁾, バルク値 (約 20 ppm)³⁾ に比べて高くなることが報告されている. しかしながら, Co-Fe-B 薄膜における λ_s の膜厚依存性や下地層効果などについては不明瞭な点が多い. これに加えて, STT-MRAM やスピントルクダイオードなどのスピントロニクス素子の創製にあたり, Co-Fe-B 膜は素子の一部を構成し, その動的磁化挙動の重要なパラメータであるダンピング定数 (α) について理解する必要がある. 本研究では, 異なる下地層上に製膜した Co-Fe-B 薄膜における λ_s および α について系統的に理解するために, それらの膜厚依存性について詳細に検討する.

実験方法

Co-Fe-B 薄膜および下地層は RF スパッタリングおよび DC マグネトロンスパッタリングを用いて製膜した. ここで, 下地層 (X) には Cu, Ti および Pt を選択した. 膜構成に関しては, Glass Sub./X(50 nm)/Co₄₀Fe₄₀B₂₀(3–30 nm) とした.

作製した薄膜の結晶構造および表面形状解析は, XRD および AFM を用いて行った. XRD より, Co-Fe-B 薄膜の結晶構造はアモルファスであることがわかった. 磁気特性評価は, VSM, 光てこ法による高感度薄膜磁気ひずみ測定装置および B-FMR 測定装置を用いて行った.

実験結果および考察

図 1 に下地層 (X) の異なる Co-Fe-B 薄膜における λ_s の膜厚依存性を示す. 下地層によらず, λ_s は膜厚の増加にともない増加する傾向を示した. また, いずれも λ_s 値はバルク値と比較して高く, 製膜時の応力誘起によるものと考えられる. 図 2 からわかるように, 下地層により α の膜厚依存性は異なった. すなわち, X = Cu の場合, α は膜厚の増加にともない緩やか減少した. また, X = Ti の場合, 膜厚の増加にともない減少し, その後一定となった. バルク値に対する α の増大は, 異方性分散などの磁氣的不均一性によるものと考えられる. X = Pt の場合, α は 7.5 nm 厚以下では約 0.03 であり, 10 nm 厚以上では約 0.01 となった. 他の下地層に比べて α が高く, スピンポンピングに由来するものと考えられる⁴⁾.

以上より, λ_s は下地層による依存性はなく, いずれもバルク値に比べて高くなった. 一方で, α は下地層により大きく依存することがわかった.

謝辞

本研究を行うにあたり, 試料作製および測定の一部に関して, 東北大学多元物質研究所 岡本 聡 教授, 菊池 伸明 助教のご協力を得ました. ここに深謝します. 本研究の一部は, 東北大学先端スピントロニクス研究開発センター, 東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター, 東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センターの支援により行われた. また, 本研究の一部は, 科研費(No. 17H03226)の補助のもとで行われた.

参考文献

- 1) D. Wang *et al.*, J. Appl. Phys., Vol.97, No.10, 10C906 (2005).
- 2) C. L. Platt *et al.*, IEEE Trans. Mag., Vol. 37, No. 4 (2001)
- 3) R. C. O'Handley, *Modern Magnetic Materials Principles and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, (1999).
- 4) H. Lee *et al.*, J. Phys. D, Vol. 41, 215001 (2008).

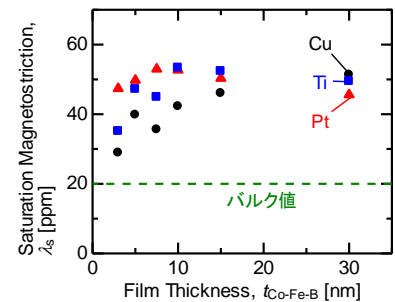


Fig. 1. Effect of underlayers on saturation magnetization.

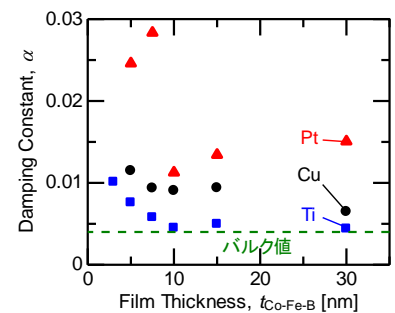


Fig. 2. α of Co-Fe-B thin films on different underlayers.

(Fe_{0.75}Ga_{0.25})_{100-x}B_x 膜における構造と磁気特性の B 組成依存性

遠藤恭, 川辺泰之, 村松省吾, 宮崎孝道 (東北大学)

Dependence of Structure and Magnetic Properties on the B Composition for (Fe_{0.75}Ga_{0.25})_{100-x}B_x Films

Y. Endo, Y. Kawabe, S. Muramatsu, T. Miyazaki (Tohoku Univ.)

はじめに

情報通信技術に関連する高速・小型・エネルギー高効率なデバイスの創製に向けて、強大な磁気ひずみを有する Fe-Ga 膜がその材料候補として期待されている¹⁾。我々はこれまでに Ga 組成の異なる Fe-Ga 多結晶膜の構造と磁気特性に関して詳細に検討し、Ga 組成の増加とともに飽和磁気ひずみが増加するものの、FMR 線幅が広がり面内有効ダンピング定数が高くなることを明らかにした^{2,3)}。これらの結果は、Fe-Ga 多結晶膜を情報通信技術に関連する新規デバイスへ応用するためにはそれらの軟磁気・高周波磁気特性を改善する必要があることを意味している。本研究では、Fe-Ga 膜における磁気特性の改善のために半金属元素の添加による効果を検討した。すなわち、半金属元素として B を選択して、B 添加した Fe-Ga 膜の構造と磁気特性の B 組成依存性について検討した。

実験方法

50 nm 厚の (Fe_{0.75}Ga_{0.25})_{100-x}B_x (Fe-Ga-B) (0 ≤ x ≤ 14.9) 膜を石英基板上に DC マグネトロンスパッタ装置を用いて作製した。作製した Fe-Ga-B 膜の構造および組成は、XRD, TEM および EDX を、また磁気特性は、VSM, 光てこ法を用いた高感度薄膜磁歪装置およびブロードバンド FMR 測定法を用いた評価した。

結果および考察

B 組成の異なる Fe-Ga-B 膜の X 線回折パターンを図 1 に示す。いずれの B 組成においても回折角 44° 付近に弱いピークが観測された。これらの結果は、Fe-Ga-B 膜の結晶構造が B 組成によらず主に (110) 配向した bcc 構造であることを示唆している。このような結晶構造を有する Fe-Ga-B 膜における磁気特性を詳細に検討した。図 2(a) に示すように、飽和磁気ひずみ (λ_s) は B 組成を増加させると若干減少し、8.2 at.% 以上の B 組成範囲では増加する傾向が見られた。 λ_s 値は 9.4 at.% 以上の B 組成範囲では Fe-Ga 多結晶膜^{2,3)}よりも高くなった。この原因は bcc 格子中の格子間位置に B 原子が存在することによるものと考えられる。また、図 2(b) からわかるように、面内有効ダンピング定数 ($\alpha_{||}$) は、B 組成 4.7 at.% を除いて B 組成の増加とともに減少した。 $\alpha_{||}$ 値はいずれの場合も B を添加しない Fe_{0.75}Ga_{0.25} 膜に比べて低く、とりわけ B 組成 13.6 at.% 以上では Co-Fe-B 膜やゼロ磁歪組成の Ni-Fe 膜とほぼ同等となった。以上の結果から、Fe-Ga 膜は 10 at.% 以上の B を添加することにより磁気特性を改善させることができることがわかった。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 (B) (No. 17H03226) の補助と、東北大学 CSRN, 東北大学 CSIS, 東北大学 CIES および ASRC の支援のものと行われた。

参考文献 1) B. K. Kuanr et al., JAP, **115**, 17C112 (2014)., 2) YE et al., JMMM, **487**, 165323 (2019)., 3) Y. Kawabe et al., JMSJ **3**, 34 (2019) (Japanese).

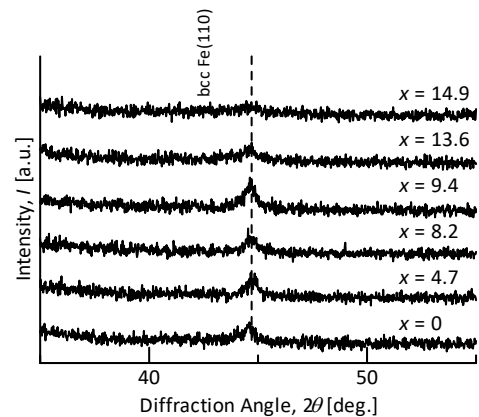


Fig. 1. X-ray diffraction (XRD) patterns of 50-nm thick (Fe_{0.75}Ga_{0.25})_{100-x}B_x films with various B compositions.

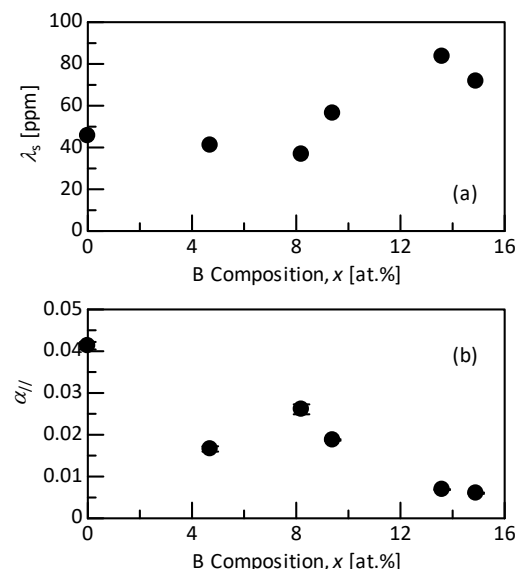


Fig. 2. Change in (a) saturation magnetostriction (λ_s) and (b) in-plane effective damping constant ($\alpha_{||}$) of 50-nm thick (Fe_{0.75}Ga_{0.25})_{100-x}B_x films with B composition (x).

Ga 組成の異なる Fe-Ga-B 薄膜における 構造と静的・動的磁気特性に関する研究

村松省吾、宮崎孝道、遠藤恭

(東北大学)

Study on the structure and static and dynamic magnetic properties of Fe-Ga-B thin films with various
Ga composition

Shogo Muramatsu, Takamichi Miyazaki, Yasushi Endo

(Tohoku Univ.)

はじめに

巨大な飽和磁歪を有する Fe-Ga 合金薄膜は高速かつ小型な高周波磁気デバイスへの応用が期待されている。我々はこれまでに Fe-Ga 多結晶薄膜における静的・動的磁気特性の Ga 組成による変化を検討し、それらの保磁力とダンピング定数が高くなることを報告した⁽¹⁾。この結果は Fe-Ga 多結晶薄膜を高周波磁気デバイスへ応用するためには、それらの磁気特性を改善する必要があることを示している。そこで本研究では、Fe-Ga 膜の軟磁性化および高周波磁気特性の改善を目指して、B を添加した Fe-Ga-B 薄膜を作製し、Ga 組成の異なる Fe-Ga-B 薄膜の構造と静的・動的磁気特性について検討・議論する。

実験方法

10 nm 厚の $\text{Fe}_{85.1-x}\text{Ga}_x\text{B}_{14.9}$ ($x=17.8-27.7$) をガラス基板上に DC マグネトロンスパッタリングを用いて製膜した。作製した試料の組成に関しては EDX および飽和磁化値から算定した。表面形状については AFM を、結晶構造については XRD および TEM を用いて評価した。また、静的・動的磁気特性については VSM、光てこ法を用いた高感度薄膜磁歪測定装置およびブロードバンド FMR(B-FMR)測定法を用いて評価した。

実験結果

Fe-Ga-B 薄膜における容易軸方向の保磁力 (H_c) およびダンピング定数 (α) の Ga 組成依存性を図 1 示す。 H_c に関しては Ga 組成に依存せずほぼ一定となり 10 Oe 程度であった。これらの値は先行研究のアモルファス Fe-Ga-B 膜(1 Oe)⁽²⁾に比べて高く、その原因は製膜法の違いによるものと考えられる。また、これらの値は Fe-Ga 多結晶膜(50 Oe)⁽¹⁾に比べて非常に低い値となった。 α に関しては Ga 組成の増加に対して 21.8 at.% まではほぼ一定であり、24.5 at.% で極小を取り、さらに Ga 組成を増加させると増加した。これらの値は 0.006 - 0.010 であり、Fe-Ga 多結晶膜(0.04)に比べて一桁ほど低くなった⁽³⁾。

以上の結果は Fe-Ga 合金への B の添加が Fe-Ga 多結晶膜の軟磁性化および高周波磁気特性を改善させることができることを表している。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H03226 の助成と、東北大学国際集積エレクトロニクス開発センター (CIES)、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター (CSIS)、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター (CSRN) および情報ストレージ研究推進機構 (ASRC) の支援のもとで行われました。

参考文献 (1) 川辺泰之ら, T. Magn. Soc. Jpn, (Special Issues), **3**, 34-38 (2019). (2) J. Lou et al, Appl. Phys. Lett. **91**, 182504(2007). (3) Daniel B. Gopman et al., IEEE TRANSACTIONS, VOL. 53, NO.11, (2017).

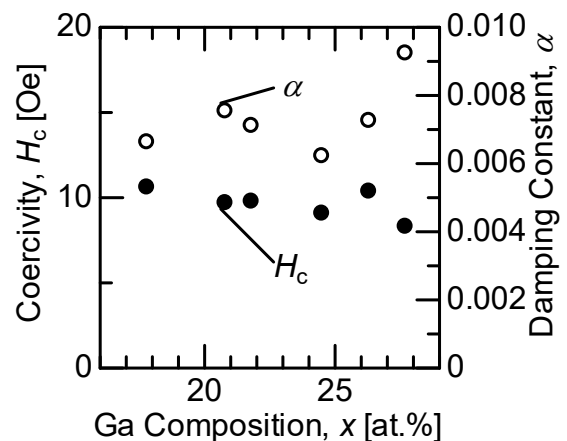


Fig.1 Dependence of coercivity and damping constant on Ga composition

アモルファス Fe-B 軟磁性微粒子の高周波磁気特性

村田 啓太、宮崎 孝道、増本 博、遠藤 恭
(東北大学)

Study of magnetic properties of amorphous Fe-B soft magnetic particles
Keita Murata, Takamichi Miyazaki, Hiroshi Masumoto, Yasushi Endo
(Tohoku Univ.)

はじめに

電子機器の高周波化が進むにつれて、GHz 帯における電磁ノイズ抑制体 (NSS) の需要が高まっている。一般的な NSS は、フェライトや磁性粉を樹脂に含んだシート状の構造となっているが、抵抗率が低く、渦電流損失によって GHz 帯において NSS 特性が低下する問題が指摘されている。我々のグループでは、これまでに水溶液還元反応法を改良した合成法で作製した Fe-B-P や Co-Fe-B などのアモルファス軟磁性合金微粒子の構造・磁気特性を検討し¹⁾、高抵抗率かつ良好な軟磁気特性が得られることを報告してきた。

本研究では、新たに高い飽和磁束密度 (B_s) の高い Fe-B アモルファス合金を選択し、アモルファス Fe-B 軟磁性微粒子の合成法とそれらの構造・磁気特性について検討した。

実験方法

アモルファス Fe-B 微粒子の合成法は、水溶液還元反応法を改良した方法であり、鉄塩を含む水溶液中に還元剤となる NaBH_4 を攪拌しながら滴下することで微粒子を得ることができる。

合成した微粒子の形状観察および構造解析に関しては、SEM および TEM を用いた。また、それらの磁気特性に関しては、微粒子とバインダーに用いた絶縁体の樹脂との Vol.% を 50% : 50% としてコンポジット材を作製し、それらを用いて VSM および複素透磁率測定装置により評価した。

実験結果

図 1 は合成した Fe-B 微粒子における SEM 像の一例である。形状は分散した粒径で、平均粒径 D_{50} はとなった。合成法を調整することにより、所望の D_{50} を有する Fe-B 微粒子の合成が可能であることを確認した。また、合成した微粒子における TEM 像においてハローパターンが観測されたことから、これらの結晶構造はアモルファス状態であることがわかった。

また、合成した微粒子における磁気特性に関して、飽和磁化 (σ_s) は D_{50} に関係なくほぼ一定で、それらの値は 130~150 emu/g となった。保磁力 (H_c) は平均粒径 D_{50} の増加にともないおおむね D^{-1} に沿って減少した。図 2 は複素透磁率の虚部をフィッティングおよび解析して導出した D_{50} による Fe-B 微粒子における共鳴ピーク周波数 (f_{FMR}) と線幅 (Δf_{FMR}) の変化である。 f_{FMR} は D_{50} の増加にともない 2.5 GHz から 1.7 GHz へ減少した。これらはいずれも L-S バンド内に存在した。また、 Δf_{FMR} は 5G に利用される 3~6 GHz を包含していた。以上より、合成したアモルファス Fe-B 軟磁性微粒子は GHz 帯における NSS への応用が期待できることと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP19K21952 の助成と、東北大学国際集積エレクトロニクス開発センター(CIES)、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター(CSRN)および東北大学先端スピントロニクス研究開発センター(CSIS)の支援のもとで行われました。

参考文献

1) Y. Shimada, Y. Endo, M. Yamaguchi, S. Okamoto, O. Kitakami, Y. Imano, H. Matsumoto, and S. Yoshida, IEEE Trans. Magn., 45 (2009) 4298–4301.

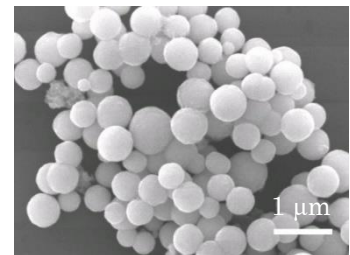


Fig. 1. SEM image of amorphous Fe-B particles

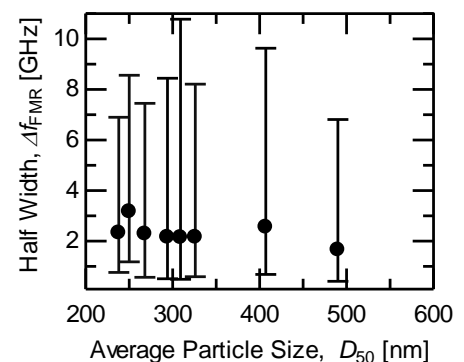


Fig. 2. Size dependence of Half-Width of FMR frequency, Δf_{FMR}

