強磁性/反強磁性結合を用いた高周波キャリア型薄膜磁界センサ

Ferro/Antiferro Exchange Coupled, High-frequency Carrier-type, Thin-film Magnetic Field Sensor

竹澤昌晃・福田亮介・山崎二郎

九州工業大学, 北九州市戸畑区仙水町 1-1 (〒 804-8550)

M. Takezawa, R. Fukuda, and J. Yamasaki

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

This paper discusses a ferro/antiferro exchange coupled, high-frequency carrier-type, thin-film magnetic field sensor which can obtain an asymmetrical applied field dependence of the impedance of the sensor element due to the unidirectional anisotropy. We fabricated a sensor element that consisted of 200-nm-thick NiFe and 30-nm-thick FeMn films. We verified that the NiFe/FeMn bilayer structure was necessary for an asymmetrical high-sensitivity output. An exchange-coupling field of 145 A/m and an asymmetrical impedance change were obtained.

Key words: unidirectional anisotropy, exchange-coupling field, high-frequency carrier-type thin-film magnetic field sensor

1. はじめに

磁性体に高周波キャリア電流を直接通電し, その表皮効果^{1), 2)}を利用した高感度な磁界センサ³⁾の小形化が強く望まれており, このセンサを薄膜で実現する研究が盛んに行われている⁴⁾⁻⁹⁾. このセンサの高感度領域は磁性膜の異方性磁界付近にあり, センサの動作点を高感度領域に設定するためセンサヘッドを薄膜バイアスコイルで覆う構造¹⁰⁾や, 積層した SmCo 薄膜磁石からのもれ磁束を利用する方法¹¹⁾などが提案されている. しかし, バイアスコイルの利用では作製工程が複雑になり小形化が困難であることや, 薄膜磁石を用いる方法ではその温度特性によって作製手順に制約を受けることなどの問題がある. 一方, 短冊状薄膜の幅方向に対して斜め方向に異方性を誘導したセンサ素子で外部磁界の正負に対して非対称な磁界検出特性を示すことが報告されている¹²⁾⁻¹⁴⁾が, このセンサ素子で非対称な特性を得るためには一方向異方性を誘導する必要がある¹²⁾. 高周波キャリア電流とともに直流バイアス電流を印加する必要がある.

本研究では, 非対称な磁界検出特性を得るための新規な方法としてスピナル膜¹⁵⁾のピン層に用いられる強磁性-反強磁性の交換結合を用いて素子幅方向に対して斜めに一方向異方性を誘導することについて, はじめて検討した. これにより, 外部磁界の正負に対して非対称な磁界検出特性を示すセンサ素子を作製できたので報告する.

2. 実験方法

強磁性膜および反強磁性膜には交換結合に関する研究¹⁶⁾で報告の多い NiFe および FeMn 膜を用いた. rf スパッタ法によりガラス基板上に膜厚 10 nm の Ta 下地膜を成膜後, Ni₈₀Fe₂₀, Fe₅₀Mn₅₀ の順に成膜した NiFe/FeMn 積層膜, および Fe₅₀Mn₅₀, Ni₈₀Fe₂₀ の順に成膜した FeMn/NiFe 積層膜の二種類の強磁性-反強磁性二層膜を成膜した. 薄膜は直径 20 mm の円形である. 試料には成膜時に約 2.4 kA/m の静磁界を印加して一方向異方性を誘導しており, 基板冷却は行わなかった. この積層膜で NiFe 強磁性膜の膜厚を 50 nm から 400 nm, FeMn 反強磁性膜の膜厚を 10 nm から 50 nm の範囲で変化させ, VSM を用いた磁化曲線の測定により交換結合磁界の強度を比較した. その後, 硝酸水溶液およびフッ酸水溶液を用いたウェットエッチングにより薄膜を微細加工して Fig. 1 に示す短冊状の磁界センサ素子を作製した. 短冊の長さは 5 mm, 幅は 200 μ m とし, 一方向異方性を付与した角度は短冊幅方向に対して 45 deg. 方向である. 作製したセンサ素子の長手方向に印加した直流磁界強度を変化させた際のインピーダンス変化をネットワークアナライザ (HP8752A) で測定した. 素子に通電した高周波キャリア電流は, 強磁性膜厚が数 100 nm であることを考慮して表皮効果の得られる 1 GHz とした.

Fig. 1 Schematic view of sensor element.

3. 実験結果

Fig. 2 に膜厚 200 nm の NiFe 単層膜の磁化曲線を示す。図中で実線は成膜時磁界印加方向の磁化曲線であり、点線はそれと面内で垂直方向の磁化曲線を表している。図より保磁力は約 70 A/m, 異方性磁界は約 0.4 kA/m であり、一軸異方性を有する軟磁気特性が得られていることが分かる。

Fig. 3 に NiFe/FeMn 積層膜, Fig. 4 に FeMn/NiFe 積層膜の磁化曲線を示した。各層の膜厚は NiFe 層が 50 nm, FeMn 層が 30 nm である。Fig. 3 より NiFe/FeMn 積層膜では容易軸方向の磁化曲線の推移が見られ、一方向異方性を示していることが分かる。交換結合磁界 H_{ex} は約 0.56 kA/m であった。一方, FeMn/NiFe 積層膜では磁化曲線の推移は観測されず一方向異方性を示さなかった。これは, NiFe 層を下地としなかったために反強磁性を示さない α -FeMn 相が形成されたためと考えら

れる^{17),18)}。Cu, Ta 等の下地を用いることで反強磁性を示す γ -FeMn 相への配向制御を行う報告¹⁹⁾もあるが、本センサでは下地膜への高周波キャリア電流のリークによる感度低下が予想されるため、交換結合膜のセンサへの適用の際には NiFe/FeMn 構造が適していると考えられる。

一方向異方性が得られた NiFe/FeMn 積層膜における交換結合磁界強度の FeMn 層の膜厚による依存性を Fig. 5 に示した。NiFe 層の膜厚は 50 nm とした。図より FeMn 膜厚 10 nm から一方向異方性が発現していることが分かる。その後 FeMn 膜厚の増加により交換結合磁界は増大し 30 nm から 40 nm 程度で最大の交換結合磁界 0.56 kA/m 程度が得られた後、膜厚 50 nm では減少した。

この結果から FeMn 層膜厚を 30 nm とし、NiFe 層膜厚を 50 nm 以上に増大させた場合の交換結合磁界の変化を Fig. 6 に示した。交換結合磁界は NiFe 層の膜厚の増加に伴って減少

Fig. 2 Magnetization curve of NiFe single layer.

Fig. 3 Magnetization curve of NiFe (50 nm)/FeMn (30 nm) bilayer.

Fig. 4 Magnetization curve of FeMn (30 nm)/NiFe (50 nm) bilayer.

Fig. 5 Dependence of exchange-coupling field on FeMn layer thickness. (NiFe : 50 nm)

Fig. 6 Dependence of exchange-coupling field on NiFe layer thickness. (FeMn : 30 nm)

Fig. 8 Dependence of impedance on applied field.

Fig. 7 Magnetization curve of NiFe (200 nm)/FeMn (30 nm) bilayer.

し NiFe 膜厚 300 nm 以上では一方向異方性は得られなかった。本センサでは素子の強磁性膜厚がキャリア周波数における表皮深さと同程度に厚くないとインピーダンス変化は得られない⁴⁾。Fig. 5, 6 で得られた結果から、FeMn 層の膜厚を 30 nm に、NiFe 層の膜厚を一方向異方性が得られた中で最も厚い 200 nm とした磁界センサ素子を作製した。この場合の NiFe/FeMn 積層膜の磁化曲線を Fig. 7 に示す。図より約 145 A/m の交換結合磁界が得られていることが分かった。

Fig. 8 にセンサ素子の磁界検出特性を示す。ここでは Fig. 1 の矢印で示す磁界印加方向を正方向としている。図中で磁界を正から負へ減少させた場合を ● と実線で、磁界を負から正へ増大させた場合を ■ と点線で示した。同図より正負の磁界に対して非対称な磁界検出特性が得られていることが分かる。磁界を正から負へ減少させた場合には、磁界 + 0.4 kA/m で 49.3 Ω

であったインピーダンスが磁界 0 で 49.1 Ω まで低下した。さらに磁界を負側へ減少させてもインピーダンスは低下し続け、-0.12 kA/m で 48.8 Ω の極小値をとった後増大した。このとき磁界 0 の付近でセンサの高感度領域が表れており、反強磁性結合によってバイアスコイル等を不要としたセンサ素子の高感度領域への設定が可能であることが明らかとなった。しかし、磁界を負から正へ増大させた場合は磁界検出特性に大きなヒステリシスが観測された。これは NiFe 層膜厚の増大により交換結合磁界の大きさが減少したこと、反強磁性結合に伴う保磁力の増大¹⁷⁾ が原因と考えられる。また、インピーダンス変化量の最大値は 0.5 Ω 程度であり、従来のセンサ素子⁴⁾と比較して非常に小さな変化量であった。本センサ素子において比透磁率 1000、抵抗率 20 μΩ cm として表皮深さを計算すると約 230 nm である。このために NiFe 層膜厚 200 nm では大きな表皮効果が発生しなかったと考えられる。また、キャリア周波数を 1 GHz に設定したことにより強磁性共鳴による透磁率実部の減少もインピーダンス変化を低下させた原因だと考えられる。

4. まとめ

強磁性-反強磁性積層構造による交換結合を、高周波キャリア型薄膜磁界センサの新規な高感度領域設定法に応用することを目的として、積層構造および各層の膜厚と交換結合磁界の関係ならびにセンサの磁界検出特性についてはじめて検討を行った。その結果、NiFe 層を下地として反強磁性が発現する NiFe/FeMn 構造が本センサ素子に適していることが分かった。さらに各層の膜厚と交換結合磁界の関係および表皮深さと NiFe 強磁性層の膜厚の関係により、NiFe 層および FeMn 層の最適な膜厚が決定できることを明らかとした。また、得られた交換結合膜を用いて短冊幅方向に対して斜め方向に一方向異方性を有するセンサ素子を作製し、外部磁界の正負に対して非対称な磁界検出特性を実現できた。今後、構造、材料の最適化による保磁力低下および高交換結合磁界を実現することで、低ヒステリシスかつ高磁界

感度を有するセンサ素子を得ることが可能であると考えられる。

文 献

- 1) S. Numazawa, K. Murakami, and H. Hojo : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **9**, 263(1985).
- 2) Y. Kamo and Y. Shimada : *Digests of the 13th Annual Conference on Magnetism in Japan*, 23aD-6 (1989).
- 3) K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashima, H. Yoshida, and L. V. Panina : *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 3150(1992).
- 4) H. Kikuchi, M. Takezawa, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 789(1997).
- 5) K. Hika, T. Uchiyama, R. Shin, K. Mohri, Y. Unoki, and K. Kikuchi : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 649(1997).
- 6) M. Senda, O. Ishii, Y. Koshimoto, and T. Toshima : *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4611(1994).
- 7) M. Senda and Y. Koshimoto : *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 4367(1997).
- 8) T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, and Y. Taga : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**, 553(1996).
- 9) T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, and Y. Taga : *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 4367(1997).
- 10) A. Takayama, T. Umehara, A. Yuguchi, H. Kato, K. Mohri, and T. Uchiyama : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 763(2000).
- 11) M. Takezawa, Y. H. Kim, K. Ishiyama, M. Baba, N. Ajiro, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 3682(1999).
- 12) L. V. Panina, D. P. Makhnovskiy, and K. Mohri : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 925(1999).
- 13) D. P. Makhnovskiy, L. V. Panina, and D. J. Mapps : *J. Magnetism and Magnetic Materials*, **215-216**, 629(2000).
- 14) K. Ueno, H. Hiramoto, K. Mohri, T. Uchiyama, and L. V. Panina : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24**, 783(2000).
- 15) B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit : *J. Appl. Phys.*, **69**, 4774(1991).
- 16) T. Lin, C. Tsang, R. E. Fontana, and J. K. Howard : *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 2585(1995).
- 17) M. Jimbo : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**, 12(1998).
- 18) M. Matsumoto, A. Morisako, S. Takei, and S. Tajima : *J. Magn. Soc. Jpn.*, **21**, 509(1997).
- 19) R. Nakatani, K. Hoshino, S. Noguchi, and Y. Sugita : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 133(1994).

2001 年 10 月 9 日受理, 2002 年 2 月 7 日採録