柔軟基板上に形成した磁気弾性歪センサ

Magneto-elastic Strain Sensor Formed on a Flexible Substrate

今村 幸喜, 申 光鎬, 石山 和志, 井上 光輝*, 荒井 賢一

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

*豊橋技術科学大学, 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 (〒441-8580)

K. Imamura, K.H. Shin, K. Ishiyama, M. Inoue*, and K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

*Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibari-ga-oka, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580

(2000年10月6日受理, 2001年1月24日採録)

Micro-strain sensors using the magnetostrictive properties of FeCoSiB films were investigated. To avoid the effects of the rigidity of the substrate on the stress sensitivity, a sensor was formed on thin polyimide ribbons (50 μm thick), which have superior heat resistance, wide elastic region, and excellent flexibility. By using the large difference in the coefficient of thermal expansion between FeCoSiB and polyimide, the residual stress in the magnetostrictive FeCoSiB patterned film was controlled. The sensor was formed under optimized conditions, and had an extremely high value of the figure of merit $F = (\Delta Z/Z)/\Delta \epsilon$ (change in film impedance Z per unit ϵ) of about 1500 at a carrier current frequency of 700 MHz. In addition, the point of stress representing the largest sensitivity of the sensor was controlled by controlling the field annealing conditions.

Key words: highly magnetostrictive films, polyimide substrates, soft magnetic properties, strain sensitivity

1. はじめに

高磁歪である Fe 系アモルファス磁性薄膜は、適切な熱処理を施すことで優れた軟磁気特性を示し、高い磁気機械結合係数を示すことから、センサ素子を構成する材料として魅力あるものといえる^{1), 2)}。我々は、これまで高感度磁気弾性歪センサの実現を目的として、FeCoSiB アモルファス磁性薄膜を用いた磁気弾性歪センサを作製し、その歪感度特性を評価してきた^{3), 4), 5)}。その結果、歪によるインピーダンス変化によって歪センシングにおける性能指数を評価した場合、駆動周波数 500MHz において約 2600 に達する極めて高い歪感度特性をもつことを明らかにしており⁵⁾、圧電材料と組み合わせたスマートアクチュエータのセンサ素子として有用であることを示してきた⁶⁾。しかし、これらの磁気弾性歪センサにはガラスや Si を基板材料として用いており、一般的な歪センサとして使用する場合、被測定物の弾性変形に与える影響が無視できなくなってくる。また、曲面や生体表面等に直接貼りつけることは困難である。そこで、磁気弾性歪センサ素子に柔軟性を与えるため、ポリイミド基板(厚さ 50 μm)上に高感度磁気弾性歪センサの作製を試みた。ポリイミド基板上に磁気弾性歪センサを作製する場合、基板と薄膜の熱膨張係数の差が大きいため、成膜時および成膜後の磁場中熱処理時に入る応力によって薄膜の軟磁気特性が劣化することが考えられる。この軟磁気特

性の劣化を抑制するため、成膜時の入力 Ar 圧、パターニング後の磁場中熱処理温度を変化させることにより、成膜時、熱処理時に導入される応力の最適化を行った。その結果、歪によるインピーダンス変化によって歪センシングにおける性能指数を評価した場合、駆動周波数 700MHz において約 1500 に達する高い歪感度特性を持つ磁気弾性歪センサを実現することができた。また、導入する応力を変化させることにより異方性の制御を行い、歪に対して高い感度を保ったまま $0 \times 10^{-6} \sim 900 \times 10^{-6}$ の歪範囲で動作点(感度が最大となる点)を制御することができたので報告する。

2. 導入応力

柔軟性を持つ磁気弾性歪センサ用の基板材料には弾性率が低いことが要求される。また、成膜後磁場中熱処理を施すため、耐熱性も優れている必要がある。基板にはこれらの条件を満たす 50 μm 厚のポリイミドフィルムを用いた。基板材料としてポリイミドを使用する場合、ポリイミド基板(15~20ppm/ $^{\circ}\text{C}$)と FeCoSiB 薄膜(8ppm/ $^{\circ}\text{C}$)の熱膨張係数の差が大きいため、成膜時および熱処理時に薄膜に導入される応力を制御、最適化し、応力による軟磁気特性の劣化を抑制する必要がある。熱処理後の冷却時には、ポリイミドの収縮量は FeCoSiB の収縮量と比較して大きいため薄膜が基板から圧縮応力を受ける。この圧縮応力の影響を軽減するために、成膜後膜面内に張力が残留するような条件で成膜する必要がある。Fig.1 は、FeCoSiB を 100 μm のガラス基板上に 1 μm の厚さで成膜し、薄膜の表面状態を表面粗さ計で測定した結果である。このとき、Ar 圧を 15mTorr から 25mTorr まで変化させて成膜を行った。Ar 圧が上昇するにしたがって薄膜に残存する応力が圧縮応力から張力に変化していることがわかる。今回の磁気弾性歪センサの作製においては、後述のように成膜後張力が残存していることが望まれるので、25mTorr の導入 Ar 圧で成膜することとした。成膜後、異方性誘導のために静磁場中熱処理を行う。このとき、熱処理時に導入される圧縮応力は熱処理温度で制御可能であるため、軟磁気特性の劣化の抑制に加えて逆磁歪効果を利用した異方性の制御を行う事を目的として、熱処理温度を変化させて熱処理を行った。

3. センサパターン作製

基板には、50 μm 厚のポリイミドを使用し、吸着ガスの放出と熱処理時の基板収縮を抑えるために成膜前処理としてポリイミドに 380 $^{\circ}\text{C}$ 、1 時間の真空中熱処理を施した。薄膜

Fig. 1 Spring of the glass substrates (100 μm thick) after deposition of FeCoSiB, changing the Ar pressure. The Ar pressure is (a) 15 mTorr, (b) 20 mTorr, and (c) 25 mTorr.

は RF スパッタ法を用いて $3\mu\text{m}$ の厚さで成膜した。磁気弾性歪センサは印加された歪に対する薄膜の高周波におけるインピーダンスの変化を動作原理としているため、薄膜に適当なインピーダンスを付与する必要がある。我々はリフトオフ法を用いて長さ約 3.5mm 、幅約 $100\mu\text{m}$ の 6 ターン・ミアンダライン状にパターンニングした。薄膜はパターンニング後、異方性を誘導するためにパターンの幅方向に 5000e の静磁界を印加しながら 1 時間熱処理を行った。熱処理温度は 280°C とした。これは、ガラス基板上に成膜した予備実験の結果、熱処理温度 270°C 以上であれば FeCoSiB に良好な軸異方性を誘導することが可能であったためである。Fig. 2 は、磁気弾性歪センサ作製時の導入応力を最適化する前後における熱処理後のパターン長手方向の M-H ループを VSM で測定した結果および磁区構造を SEM で観察した結果である。Fig. 2(a) は最適化を行っていない試料、Fig. 2(b) は最適化を行った試料である。Fig. 2(a) の導入応力の最適

化を行っていない試料においては静磁場中熱処理を施したにもかかわらず異方性が誘導されておらず、 H_c の値が約 60e あり、Si 基板を用いた同様の実験では H_c は 0.20e ⁵⁾ であることから軟磁気特性が劣化していることがわかる。また、ドメイン構造にも面内で異方性が誘導されている様子は確認されなかった。この原因として、磁場中熱処理時に起こる等方的な基板の収縮による応力で磁化の垂直成分が生じたためと考えられる。しかし、Fig. 2(b) に示すように成膜後に面内に張力が残存する条件で成膜し、磁場中熱処理による圧縮応力の影響を低減させた結果、熱処理後には H_c の値が約 0.70e となり、軟磁気特性の劣化を抑制した薄膜パターンの作成に成功した。また、磁区構造写真より静磁場中熱処理により薄膜パターンの幅方向に異方性が誘導可能であることを確認した。

Fig. 2 M-H loops and pictures of the magnetic domain of the FeCoSiB film patterns on polyimide substrates after heat treatment at 280°C in a static magnetic field: (a) before improvement (the sputtering conditions were 20 mTorr, 50 W) and (b) after improvement (the sputtering conditions were 25 mTorr, and 50 W).

4. 歪感度特性

インピーダンス測定系の概略図を Fig. 3 に示す。試料は、ポリイミド基板上に 25mTorr の Ar 雰囲気中で成膜した薄膜をリフトオフ法を用いてパターンニングし、5000e, 280℃の静磁場中で 1 時間熱処理を行ったセンサパターンを用いた。この磁気弾性歪センサを 3×25mm に切り出した 100μm 厚のガラス板上に貼り付け、試料をカンチレバー状に固定し Z 軸ステージを用いて終端に強制的に変位を印加することによりセンサの歪感度特性を測定した。また、磁気弾性歪センサに印加される歪は、下記の (1), (2), (3) 式を用いて算出した^{7), 8)}。このとき、ガラス板の弾性率が約 74GPa, 厚さが 100μm, ポリイミドの弾性率が約 9.1GPa, 厚さが 50μm であるため、計算の簡単化のためにセンサ貼り付け前のガラス板を固定した状態での印加歪計算値を印加歪値とした。

$$I = \int_A y^2 dA \quad (1)$$

Fig. 3 Experimental setup for measuring the strain sensitivity of the sensor. Strain is introduced into the sensor by bending the substrate.

$$\delta = -\frac{Pl^3}{3EI} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{3h\left(l - \frac{a+b}{2}\right)}{l^3} \delta \quad (3)$$

ここで、 I は断面 2 次モーメント、 y はガラス板の高さ方向の変位、 A はガラス板の断面積、 δ は終端の微小変位、 E はガラスのヤング率、 ε は薄膜表面の歪、 a, b は固定点から磁気弾性歪センサまでの距離 ($b-a$: センサ全長)、 l, h はそれぞれ試料 (ガラス板) の長さ、高さである。Fig. 4 は、Ar 圧 25mtorr で成膜し、280℃の熱処理温度で静磁場中熱処理を施したセンサ素子の歪-インピーダンス特性測定結果である。成膜時、熱処理時の導入応力を最適化することにより、感度が最大となる 0×10^{-6} から 60×10^{-6} の歪範囲では、性能指数を単位歪に対するインピーダンスの変化で評価すると、駆動周波数 500MHz において約 1200, 700MHz において約 1500 というたいへん大きな値を得ることができた。Fig. 5 は、Ar 圧 25mtorr で成膜、350℃の熱処理温度で静磁場中熱処理を施したセンサ素子のパターン長手方向の M-H ループ、ドメイン観察写真、歪-インピーダンス特性測定結果である。上記の熱処理温度の上昇によって、熱膨張係数の差から生じる残存圧縮応力が大きくなったために、パターン幅方向の誘導磁気異方性も大きくなったことが M-H ループ、ドメイン写真から確認できた。異方性が大きくなった結果、Fig. 3 の測定系を用いて測定した歪-インピーダンス特性測定において先ほどの磁気弾性歪センサと比較すると、動作点が高歪側にシフトした。また、歪に

Fig. 4 Impedance change due to stress of the FeCoSiB film on a polyimide substrate after heat treatment in a static magnetic field at 280℃.

対するインピーダンスの変化で性能指数を評価すると、駆動周波数 700MHz において、約 900 という高い歪感度を保っていた。つまり、高い歪感度を保ったまま動作点（歪感度が最大となる点）を 0×10^{-6} から 900×10^{-6} の歪範囲で移動することが可能であることを確認した。

磁性薄膜に一軸磁気異方性を誘導した場合、その磁気異方性エネルギー K_u は、

$$K_u = \frac{1}{2} M_s H_k \quad (4)$$

で表される。ここで、 M_s は飽和磁化、 H_k は異方性磁界である。また、磁歪薄膜に ε の大きさの歪が印加されたとき、そ

の歪による磁気異方性エネルギー K_σ は、

$$K_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \varepsilon E \quad (5)$$

である。ここで、 λ_s は飽和磁歪値であり、 E はヤング率である。磁気弾性歪センサは、磁化の回転による透磁率の変化がインピーダンスの変化に大きく影響する。Fig. 5 のドメイン写真よりパターン幅方向に異方性磁界が誘導されているため、パターン長手方向の M-H ループにおいて、磁化が飽和するまで外部から磁界を印加した場合、磁化の回転が終了する印加歪値において歪に対してインピーダンスが大きく変化すると考えられる。Fig. 5 の磁気弾性歪センサにおいて、(4)、(5) 式を用いて単位歪あたりのインピーダンスの変化が最大となる印加歪値（動作点）を算出すると約 980×10^{-6} となり、実験結果とほぼ一致しているといえる。

5. まとめ

我々は、被測定物の弾性変形に及ぼす影響が小さい磁気弾性歪センサの実現を目的として、ポリイミド基板上に磁気弾性歪センサの作製を試みた。FeCoSiB 磁歪薄膜とポリイミド基板の熱膨張係数に大きな差がある事を利用して、成膜時および磁場中熱処理時に導入する応力を制御、最適化することにより軟磁気特性の劣化の抑制に成功した。磁気弾性歪センサの歪感度特性を評価したところ、感度が最大となる 0×10^{-6} から 60×10^{-6} の歪範囲において約 1500 というたいへん大きな性能指数値を得ることができた。また、導入圧縮応力を変化させることによる異方性の制御に成功し、高い歪感度を保ったまま歪感度が最大となる点を 0×10^{-6} から 900×10^{-6} の歪範囲で移動することが可能であることを確認した。この 900×10^{-6} の印加歪は、計算すると約 25mm の曲率半径を有する曲面に貼り付けることと等価である。

6. 参考文献

- (1) K. I. Arai, and N. Tsuya, *J. Appl. Phys.*, **49** (1978) 936.
- (2) M. Wun-Fogle *et al*, *Sensors and Actuators*, **12**, (1987) 323.
- (3) K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, *J. Appl. Phys.*, **85**, (1999) 5465.
- (4) 申 光鎭, 井上 光輝, 荒井 賢一, 日本応用磁気学会 **23**, (1999) 1425.
- (5) 申 光鎭, 東北大学博士論文, (1999) 76.
- (6) 申 光鎭, 今村 幸喜, 井上 光輝, 荒井 賢一, 日本応用磁気学会 **24**, (2000) 975.
- (7) F. P. Beer *et al.*, *Mechanics of material*, (1992) 483.
- (8) I. Taher, M. Aslam, M. A. Tamor, T. J. Potter, and R. Celder, *Sensors and Actuators*, **A45** (1994) 35.

Fig. 5 M-H loop, picture of the magnetic domain and the impedance change by stress of the FeCoSiB film on polyimide substrate after heat treatment in a static magnetic field at 350°C.