

磁気弾性歪センサのスマートアクチュエータへの応用

Application of magnetoelastic strain sensors to smart actuators

申 光鎬, 今村 幸喜, 井上 光輝*, 荒井 賢一

東北大学電気通信研究所, 宮城県仙台市青葉区片平 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. H. Shin, K. Imamura, M. Inoue* and K. I. Arai

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

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

(1999 年 10 月 29 日受理, 2000 年 1 月 25 日採録)

We studied linear compensation and precision control of nonlinear hysteric piezoelectric actuators using a highly magnetostrictive amorphous FeCoSiB film pattern as a strain sensor. The elements had a hybrid structure in which thin silicon substrates with the magnetostrictive films, the strain sensitivity of which was improved by annealing with bias stress, were bonded on PZT piezoelectric substrates. The magnetostrictive film as a strain sensor detects the deflection of the actuator, and a voltage signal from the strain sensor related to a deflection of the actuator is used for control of the actuator. The application of the actuator for control of the head-disk contact properties was demonstrated.

Key Words: Magnetostrictive film, strain sensitivity, Piezoelectric substrate, Smart actuator

1. はじめに

アクチュエータとして動作するとともにその変位を検出することができる, いわゆるセンサ機能をもつアクチュエータとして定義されるスマートアクチュエータ¹⁾は高機能性をもつため, 構造物の振動制御や精密位置制御などを実現する素子として期待されている¹⁾²⁾. 一般的なスマートアクチュエータは発生力, 応答速度などのアクチュエータとして優れている圧電材料 (主に PZT 系セラミック材料) と, センサとして金属抵抗歪センサを弾性的に結合したものである. しかし, 抵抗変化を利用する一般的な歪センサでは歪検出感度が低く, スマートアクチュエータを用いて精密な制御を実現するためにはより高感度特性をもつ歪センサが必須といえる.

本研究では, 歪に対する高感度特性を示す歪センサとしてミアンダーパターン状に加工したアモルファス FeCoSiB 薄膜をシリコン基板上に形成し, この磁気弾性歪センサを圧電アクチュエータ変位の検出に用いたスマートアクチュエータを作製し, その特性について検討した. 本報では磁気弾性歪センサの歪感度特性を向上するために行ったバイアスストレスを用いた磁気弾性歪センサの磁気異方性制御

と作製したスマートアクチュエータの精密動作と回転ディスク上のコンタクト制御について述べる.

2. FeCoSiB 薄膜を用いた歪センサ

スマートアクチュエータの性能を高めるためにはアクチュエータ層を構成する材料を高機能化するとともにその変位を検出する歪センサを高感度化することが必須である. スマートアクチュエータ用高感度歪センサの一つとして鉄基アモルファス磁性薄膜を微細加工した磁気弾性歪センサが提案されている³⁾⁴⁾. この鉄基アモルファス磁性材料は, 高磁歪と優れた軟磁性を同時にもち, 大きな磁気機械結合係数を示すので⁵⁾⁶⁾, これらの材料は歪に対して磁気特性が敏感に変化する³⁾⁴⁾⁷⁾. しかし, 磁歪薄膜材料のもつ磁気弾性結合特性を最適に引出すためには薄膜の磁気異方性を制御すること, 即ち薄膜パターンの幅方向に磁気異方性を誘導する必要があるが⁵⁾⁶⁾, 鉄基アモルファス磁性薄膜は磁性原子のペアオーダーリングによる誘導磁気異方性が小さいことと, 飽和磁化が大きい (~1.5T) ため, 磁界熱処理中反磁界が大きく発生することで微細加工した薄膜パターンが厚くて幅が狭い場合はその磁気異方性を制御することは難しい. そこで, 本研究では鉄基アモルファス薄膜材料に応力を掛けると逆磁歪効果により見かけ上磁気異方性の制御ができることに着目し, バイアス応力を用いた熱処理法を提案し, 薄膜パターンに適用した.

逆磁歪効果を用いた薄膜パターンの磁気異方性を制御するためのバイアス応力は, 薄膜基板をベンディングした状態で熱処理を行った後, 基板の形状を元に戻すことで薄膜に掛けた. ここで, 薄膜基板の長さは 18mm, 熱処理実施中基板中間部のたわみは 50 μm であった. 基板ベンディングにより, 薄膜にはパターンの長手方向に対して引張り応力が掛かり, その状態で熱処理を行うと薄膜の微細構造が安定化される. 熱処理後, 基板をベンディングからリリースすると薄膜にはパターンの長手方向に対して圧縮力が掛かり, 磁化が幅方向に向くことになる. 基板をベンディングすることで掛けた応力による磁気弾性エネルギー ($3/2 \lambda_s \sigma : \lambda_s$ は薄膜の飽和磁歪値, σ は応力) を考慮するし, 磁

気異方性エネルギー ($1/2 M_s H_k$: M_s は飽和磁化, H_k は異方性磁界) に換算するとバイアス応力が薄膜パターンの磁気異方性に寄与する分が分かる. それによって計算される応力による磁気異方性の大きさは異方性磁界として約 560 A/m であった.

Fig.1 (a) (b) はそれぞれ磁界中熱処理を行った薄膜パターンとバイアス応力を利用して熱処理を行った薄膜パターンの磁区を撮影した走査型顕微鏡 (SEM) 写真である. 薄膜の厚さはいずれも $3 \mu\text{m}$ であった. Fig.1(a) の場合, 試料の幅方向に磁界を印加しながら熱処理を行ったにも関わらず, 試料の平均磁化方位が長手方向に向いていることがわかる. 熱処理中磁界を印加した方向に磁気異方性が誘導されてないのは薄膜パターンの幅方向では形状異方性が大きいことと誘導磁気異方性が小さいことが主な原因であると考えられる. それに対して, Fig.1(b) の場合は試料の幅方向に磁化の向きが揃っていることが分かる. アモルファス材料に圧力を加えた状態で熱的駆動力による原子の微小変位のみならず, 機械的駆動力による構造の緻密化が起こることも考えられる. Shen ら⁸⁾ は $(\text{Fe}_{10}\text{Co}_{55}\text{Ni}_{35})_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ アモルファス合金に等方的応力を加えながら熱処理を行い, キュリー温度の変化と微小構造の緩和における応力の及ぼす影響について調べた. その結果, キュリー温度が応力によって約 0.4% /GPa 低下することを確認し, 応力が構造緩和に影響を及ぼすことを確かめた. しかし, 本研究での応力熱処理では最高でも約 0.15 GPa の応力が熱処理中薄膜にかかることになるので, 応力による磁気異方性が磁気特性に及ぼす影響に比べて応力によるアモルファス構造緩和の影響はほとんど無視できると考えられる. 従って, 本研究でのバイアス応力法による磁気異方性の制御は, 薄膜基板がベンディング

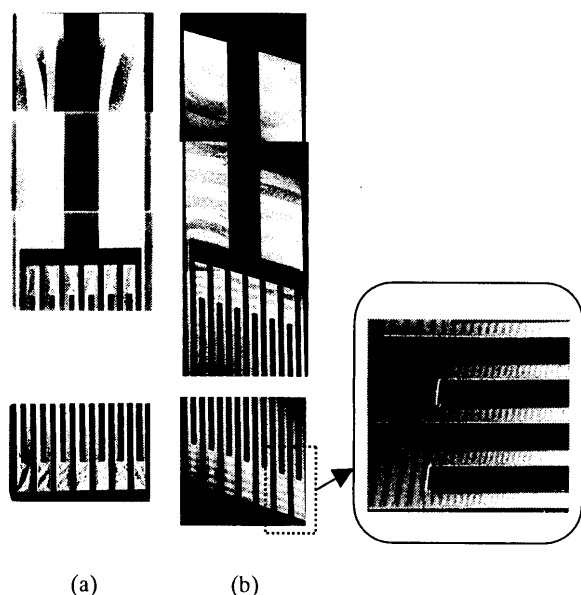


Fig. 1 Magnetic domains of the film pattern annealed (a) in static magnetic field, (b) that of the film pattern annealed with bias stress.

された状態で熱処理を行いアモルファス構造が安定化されることと熱処理後ベンディングした基板を元の状態に戻すことにより, バイアス応力が薄膜に掛かることが薄膜パターンの異方性が制御できる機構であると考えられる. この結果からバイアス応力を用いた熱処理によって磁気異方性の制御が可能であることが分かる. この薄膜パターンの場合, 磁化が薄膜パターンの幅方向に向いているので, 引っ張り歪が印加されたとき, 磁化回転によりインピーダンス

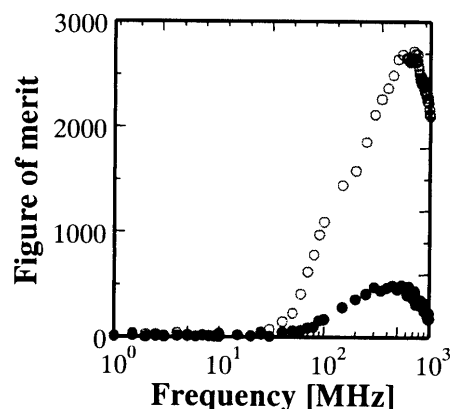


Fig. 2 Figure of merit in a strain sensing; •: longitudinal anisotropy, o: transverse anisotropy.

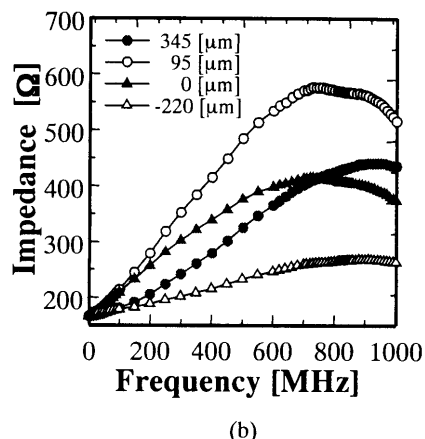
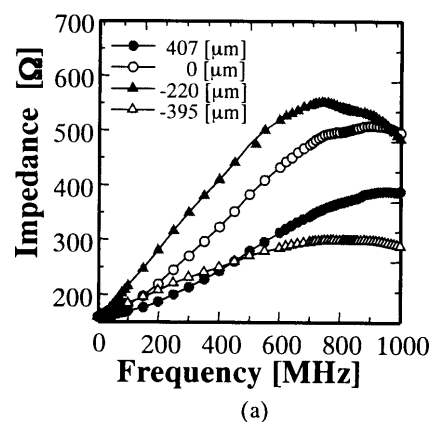


Fig. 3 Frequency dependence of the impedance, changed by substrate deflection; (a) longitudinal anisotropy, (b) transverse anisotropy.

の敏感な変化が予想される。

作製した薄膜試料は、1MHz から 1GHz までの周波数範囲でネットワークアナライザにより、歪に対する高周波インピーダンスの変化を測定した。Fig. 2 は薄膜パターンの単位歪に対するインピーダンスの変化で定義する歪センシングにおける性能指数 $F=(\Delta Z/Z)/\varepsilon$ の周波数特性を示したもので、パターンの長手方向に磁気異方性を形成したものと幅方向に磁気異方性を形成したものを比較したものである。歪によるインピーダンスの変化は約 10MHz 以上の周波数において周波数が高くなると高い性能指数が得られることが分かる。パターンの長手方向に磁気異方性を形成したものは 500MHz の駆動周波数において約 500 の性能指数が得られているのに対して、パターンの幅方向に磁気異方性を形成したものは 500MHz の駆動周波数において約 2600 の性能指数が得られている。このことからバイアス応力により、パターンの幅方向に磁気異方性を形成するのは磁気弾性歪センサの歪感度を向上する上で有用であるといえる。

Fig. 3(a), (b) は 1MHz から 1GHz までの駆動周波数における薄膜パターンのインピーダンスを測定した結果で、印加した終端変位をパラメータとして示したものであり、それぞれ Fig. 1(a) に示したように長手方向に磁気異方性を形成したものと Fig. 1(b) に示したように幅方向に磁気異方性を形成したものである。同図から分かるように、歪により、約 10MHz 以上の周波数では終端の変位あるいは薄膜の歪によってインピーダンスが変化する。このような歪の印加によるインピーダンスの変化は、歪によって薄膜の磁気異方性が変わること、高周波における表皮効果の表皮厚さが変わり、その高周波インピーダンスが変化したものと説明

できる⁴⁾。Fig. 3 の結果から、100ppm に対するインピーダンスの変化 $(\Delta Z/Z_0)=(|Z_0|-|Z_\varepsilon|)/|Z_0|$ (Z_ε と Z_0 は其々歪が加えられた状態と加えられてない状態のインピーダンス)を評価してみると、長手方向に磁気異方性を形成した場合 (Fig. 3 (a)) は 500MHz の駆動周波数において約 6% である。Fig. 3(b) に示したように幅方向に磁気異方性を形成した場合は、引っ張り歪の 100ppm に対するインピーダンスの変化は 500MHz の駆動周波数において約 22% である。

3. スマートアクチュエータの基礎特性

スマートアクチュエータは前節で述べた FeCoSiB 薄膜パターンが形成されたシリコン基板を両面に電極が形成された長さ 26mm、幅 4mm、0.3mm 厚の PZT 圧電基板に接着して作製した。このように作製した素子の PZT 基板上下に形成した電極間に電圧を印加すると PZT 基板の圧電定数 d_{31} と印加電圧の積に比例し、素子の長手方向と幅方向に応力が発生する。しかし、この応力は素子の長手方向と幅方向が同等であり、面内方向の一軸磁気異方性の制御に適切ではない。この難点を克服する方策として、我々はダイシングソーを用いて圧電セラミック裏面に長手方向に微細溝を入れた。この様な溝を形成することで、素子の幅方向に発生する応力は長手方向に比べ無視できるので、素子の長手方向の応力だけが発生し、素子の変位動作に比例して磁歪薄膜パターンに一軸性の応力誘導による磁気異方性が与えられる⁸⁾。磁気異方性が変化すると透磁率が変化し、高周波における表皮効果によってインピーダンスが変化する。

Fig. 6 はハイブリッド化したスマートアクチュエータの駆動システムを示したものである。素子の PZT 基板に印加される制御信号は、FeCoSiB パターンとインピーダンス検出回路によって発生する検出信号と合わせられ、入力電圧、従って素子の変位を制御することになる。このシステムに作製したスマートアクチュエータを用いることで、PZT アクチュエータの誘電ヒステリシスが発生しない駆動が可能になる。Fig. 4(a) は駆動周波数 227Hz において、歪検出信号をフィードバックしない場合の PZT 基板に印加した電圧と磁気弾性歪センサからの出力信号を示したものである。ここで制御信号の最大値は 1V で、センサからの出力信号の最大値は 27mV であった。この図から分かるように、駆動特性には PZT の誘電履歴が原因である大きなヒステリシスが発生し、信号の位相差が生じていることが分かる。Fig. 4(b) は歪検出信号を PZT 駆動回路にフィードバックした場合の PZT 基板に印加した電圧と磁気弾性歪センサからの出力信号を示したものである。ここで、フィードバックゲインは 50 倍であり、制御信号の最大値は 1V、センサからの出力信号の最大値は 24mV であった。この図から分かるように、ヒステリシス（位相差）がなくなり、アクチュエータの線型駆動ができる。ここで、PZT に印加した電圧

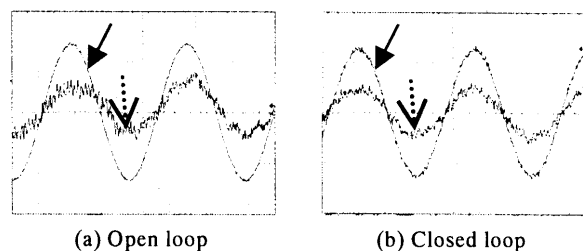


Fig. 4 Oscilloscope image of control signal and output signal at 227 Hz; $\longrightarrow$: control signal, $\dashrightarrow$: output signal.

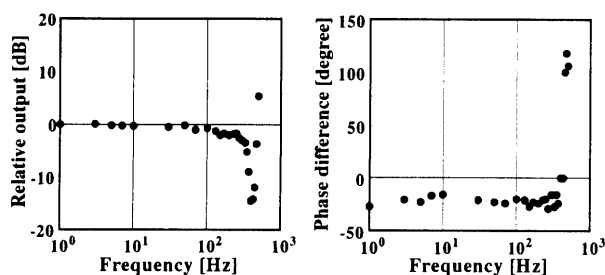


Fig. 5 Frequency dependence of relative output and phase difference in the actuator driving.

振幅は 50V であり、歪検出回路からの出力は約 260mV である。レーザ光を用いた変位測定でアクチュエータ固定点から 14mm である素子終端の 50V の印加電圧による変位は $\sim 40\mu\text{m}$ であることが分かった。歪検出回路から出力する信号のノイズレベルが $\sim 2\text{mV}$ であるので、今回構成したシステムによってアクチュエータ終端の $\sim 32\text{nm}$ の変位が測定できる。Fig.5 は作製したアクチュエータの動作特性の周波数依存性を示したもので、Fig.5(a) と Fig.5(b) は其々センサからの出力振幅と位相の周波数特性を示したものである。この図から、作製したアクチュエータは約 230Hz まで線形駆動が可能であることが分かる。この共振周波数は、アクチュエータの機械的共振周波数であるので、素子の寸法を変えることで調節可能である。

4. スマートアクチュエータを用いた 回転ディスクとヘッドのコンタクト制御

本研究で作製したスマートアクチュエータを回転するディスク上に接触しているヘッドのコンタクトを制御するのに適用してみた。作製したアクチュエータの先端に外径 0.8mm の Al_2O_3 パイプを長さ 1mm に切り、ハードディスク回転実験装置のディスクとのコンタクト特性を調べるためのヘッドとして付けた。ヘッドをディスクに接触した状態でディスクを回転するとディスクの歪みによってアクチュエータの先端が上下運動をする。この際、ディスクの歪みに比例し、ヘッドとディスクの間に掛かる力が変化し、その歪みによってディスクとヘッドの磨耗が深刻になることと回転速度が速い場合はヘッドがディスクの表面についじゅう出来なくなることが考えられる。Fig.6(a) はセンサからの出力をアクチュエータ駆動回路にフィードバックしていない場合の出力信号を示したものである。この信号はアクチュエータ終端に掛かる力と比例するもので、約 72mV の振幅が得られた。それに対して、Fig.6(b) に示したようにセ

ンサからの出力をアクチュエータ駆動回路にフィードバックするとセンサからの出力信号の振幅が 18mV と小さくなっていることが分かる。この信号はアクチュエータ先端に掛かる力に比例するので、スマートアクチュエータを用いることで回転するディスクとヘッドに掛かる摩擦力の制御ができるといえる。

5. まとめ

磁気弾性歪センサの歪感度特性を向上するために行ったバイアスストレスを用いた磁気弾性歪センサの磁気異方性制御と作製したスマートアクチュエータの精密動作と回転ディスク上のコンタクト制御について検討した。その結果、バイアスストレスを用いた熱処理によって FeCoSiB アモルファス磁歪膜パターンの磁気異方性の制御が可能となり、歪検出感度を向上することができた。その磁気弾性歪センサと PZT 圧電セラミックス基板をハイブリッド化したスマートアクチュエータを作製し、その駆動特性について検討した。その結果、磁気弾性歪センサからの歪検出信号を PZT 基板に印加する制御信号フィードバックすることで、駆動周波数約 220Hz までの線型駆動と約 30nm の精密位置制御が可能であることが確認できた。作成したアクチュエータの先端にヘッドをつけ、回転するディスクとのコンタクト特性について検討した。その結果、センサからの出力をアクチュエータ駆動回路にフィードバックするとディスクとヘッドに掛かる摩擦力の制御ができることが確認できた。

謝 辞 本研究の一部は地域コンソーシアム研究開発事業により行ったものです。ハードディスク回転実験装置を提供頂いた、ソニー株式会社仙台テクノロジーセンターに感謝します。本研究に当たり、種々御助言頂いた東北大学電気通信研究所の石山助手に感謝します。本研究の遂行に御協力頂いた凌和電子株式会社の皆様に感謝いたします。

文 献

- 1) W. B. Spillman, Jr., 1st European Conf. On Smart Structures and Materials, (1992) 97.
- 2) S. Narayanan, et al., SPIE, 3321, (1998) 185.
- 3) 申 光鎭, 井上 光輝, 荒井 賢一: 日本応用磁気学会誌, 23, (1999) 1425.
- 4) K. H. Shin et al., J. Appl. Phys., 85, (1999) 5465.
- 5) K. I. Arai et al., J. Appl. Phys., 49 (1978) 936.
- 6) C. Modzelewski et al.: IEEE Trans. on Magn., Vol. Mag-17, No.6, (1981) 2837.
- 7) M. Won-Fogle, et al., Sensors and Actuators, 12, (1987) 323.
- 8) Z. Y. Shen, et al., J. Appl. Phys., 67 (1990) 3655.
- 9) 申 光鎭, 今村幸喜, 井上光輝, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, 23.

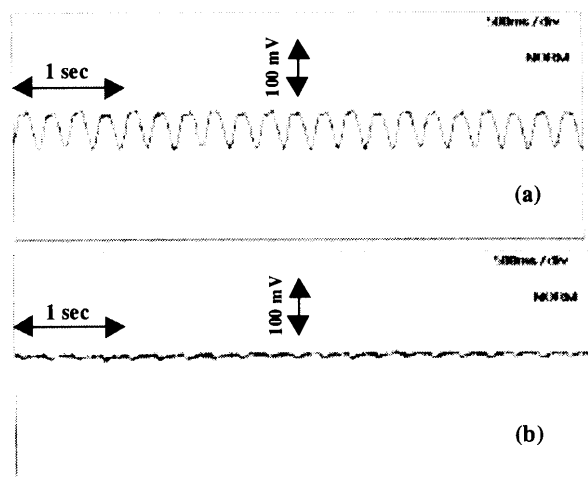


Fig. 6 Output signal of the strain sensor; (a): Open loop driving, (b): Closed loop driving.