

歪誘導型磁気電気素子の特性

Properties of Elastically Coupled Magneto-Electric Elements

申 光鎬・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)

K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai

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

Magneto-electric (ME) elements were constructed by combining piezoelectric materials and magnetostrictive films. The fundamental properties of elements were studied, to determine whether the elements exhibit any considerable ME effect at room temperature. The elements had a hybrid structure, in which thin soft glass substrates with highly magnetostrictive amorphous FeCoSiB films were bonded on PZT piezoelectric substrates. When a dc voltage was applied to an element, large changes in the magnetic properties of the FeCoSiB film were observed: for example, when a dc voltage of between -200 V and $+200$ V was applied, the change in magnetic permeability of the film reached more than 1680%. These unique characteristics of the present ME elements are considered to be very attractive for constructing novel types of micro-magnetic devices.

Key words: ME device, inverse magnetostriction effect, elastic coupling

1. はじめに

磁気電気材料は電場により磁気モーメントが発生し、逆に磁場によって電気モーメントが発生するという高い機能性をもつ材料である¹⁾。しかし、現在知られている電気磁気材料のうち、工学的利用が可能である電気磁気感受率の大きいものはその動作が極低温に限られており²⁾、これら材料を用いた室温で動作可能な磁気電気 (magneto-electric; ME) 素子はまだ実現されていない。

我々はこれらの電気磁気材料とは別に、圧電材料と磁歪材料をハイブリッド化し、歪駆動により電氣的性質と磁氣的性質を結合させることで見かけ上 ME 効果を示す新たな素子を提案してきた^{3), 4)}。この素子は、Fig. 1 に示すように、磁歪材料の磁歪効果と逆磁歪効果、圧電材料の圧電効果と逆圧電効果を利用して、磁気特性と電気特性を結合させるものである。磁歪 (圧電) 効果により、室温で磁性 (圧電) 材料の磁気 (電気) 特性は歪と強く結合するので、この二つの材料を弾性的に結合させることによって見かけ上 ME 効果を示す素子が得られることになる。

本報では、電圧の印加によって磁氣的特性が大幅かつ連続的に変化する ME 素子の実現を目的として、Fe 系アモルファス高磁歪薄膜と PZT 圧電セラミック基板をハイブリッド化した素子を作製し、素子の印加電圧および動作による磁性膜の透磁率変化を調べた結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 FeCoSiB アモルファス・スパッタ薄膜

歪駆動型 ME 素子の磁性膜は、小さな歪に対して磁気特性が敏感かつ大幅に変化するよう、高磁歪かつ高透磁率、したがって大きな磁気機械結合係数 $k_m^2 \equiv (3\lambda_s M_s)/2K_u$ をもつ薄膜材料が要求される。Fig. 2 は、現時点で利用可能な磁歪材料の k_m^2 を飽和磁歪値 λ_s に対してプロットしたものである⁵⁾。同図からわかるように、Fe を多量に含むアモルファス合金材料 (図中 2605 系) は、PZT の電気機械結合係数を上回る大きな k_m^2 値を示し、まさに上述の要求を満たすものといえる⁶⁾。この観点から、ME 素子の磁性膜には、 $(\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10})_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ 組成のアモルファス薄膜 (以下 α -FeCoSiB 薄膜と略記する) を用いた。 α -FeCoSiB 薄膜は、高周波スパッタ装置を用い、 0.15 mm 厚の軟ガラス基板上に 14 mm $\times$ 4 mm $\times$ 0.5 μ m のサイズで製膜した。スパッタ・ターゲットには、 $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ 組成の合金ターゲットに、Co ペレットを埋め込んだ複合ターゲットを用い、Co ペレット数を変えることで膜組成の制御を行った。作製した磁歪膜試料は、内部応力の緩和と Fe-Co ペ

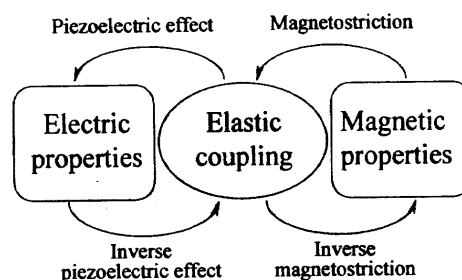


Fig. 1 Mechanism of elastically coupled ME devices.

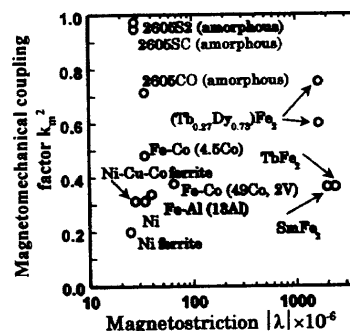


Fig. 2 Magnetomechanical coupling factor versus saturation magnetostriction of representative magnetostrictive materials.

アの方向性配列に起因する磁気異方性の消去を目的として、回転磁場中で熱処理を施した。

2.2 ME 素子の構造と動作

Fig. 3 に、作製した EM 素子の構造と基本動作を示す。素子は、Fig. 3(a) に示すように、 α -FeCoSiB 膜を形成した 0.15 mm 厚のガラス基板を、上下面に電極層を形成した厚さ 0.3 mm の PZT セラミック板（トーキン製 N-21）に光硬化接着剤を用いて接着した接合構造をもつ。この際、接着剤の厚さはできるだけ薄くなるよう工夫し、 $8 \pm 1 \mu\text{m}$ の範囲にある。

Fig. 3(b) に素子の動作を示す。この素子は PZT 基板上下に配置した電極間に電圧を印加することで、以下の機構により、磁性膜の透磁率が変化する。PZT 基板の厚さ方向に電圧が印加される場合、PZT から発生する長手方向の内部応力は、(1) 式で与えられる。

$$\sigma_p = d_{31} \left(\frac{V}{t} \right) E_p \quad (1)$$

上式の d_{31} は PZT の圧電定数、 V は印加電圧、 t は PZT の厚さ、 E_p は PZT 基板のヤング弾性率である。この応力 σ_p により素子全体がベンディングする。このベンディングした素子厚さ方向の歪まない位置を中性線と定義した場合、この中性線から上部の割合 n と曲率半径 R はそれぞれ (2) 式と (3) 式から求められる^{7), 8)}。

$$\frac{1}{R} = \int_{n-1}^n E(z) z dz = 0 \quad (2)$$

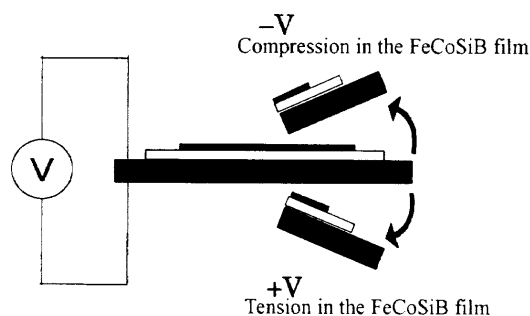
$$\frac{1}{R} = \frac{\int_{n-1}^n E(z) d_{31} (V/t) z dz}{\int_{n-1}^n E(z) z^2 dz} \quad (3)$$

PZT substrate sandwiched between electrodes
(26 × 4 mm, 0.3 mm thick)

FeCoSiB amorphous film
(14 × 4 mm, 0.5 μm thick)

Soft glass substrate
(20 × 4 mm, 0.15 mm thick)

(a) Structure of ME device



(b) Action of ME device

Fig. 3 Configuration and action of ME device.

ここで h は素子の厚さ、 $E(z)$ は厚さ方向 z の関数として得られる材料のヤング弾性率である。一方、素子のベンディングに伴い磁性膜に歪が印加される。この磁性膜の歪量を $\Delta l/l$ とすると、(4) 式で与えられる。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{z}{R} \quad (4)$$

この歪は磁性膜の実効的な磁気異方性を変化させ、その結果式 (5) で与えられる膜の初透磁率が変化するようになる⁹⁾。

$$\mu = \frac{M_s^2}{\mu_0 \{2K_u - 3\lambda_s E_F (\Delta l/l)\}} \quad (5)$$

(5) 式の M_s , K_u , λ_s , E_F は、それぞれ磁性膜の飽和磁化、一軸磁気異方性定数、飽和磁歪定数、ならびにヤング弾性率である。

2.3 試料の特性評価

磁性膜組成の同定は、EPMA と ICP を併用して行い、結晶学的構造は X 線回折により調べた。磁気特性の評価は、二軸 VSM 装置と MH ループトレサを併用して行った。また、電圧印加時での磁気特性の変化を定量的に評価するため、8 字コイル用いた 1 MHz の駆動周波数で初透磁率を測定した。磁性膜の磁歪の大きさは、光てこ法を用いて求めた。電圧印加による素子のベンディング量は、上述の光てこ磁歪評価装置を利用して評価し、このベンディング量から磁性膜に印加される実効的な応力の大きさを算出した。

3. 実験結果

3.1 磁性膜の磁化曲線と電圧印加による変化

Fig. 4 に、回転磁場中熱処理を施した後の α -FeCoSiB 磁性膜の磁化曲線を示す。同図 (a) は試料長手方向 (length), (b) は幅方向 (width) の特性である。試料は、面内異方性の消去を目的として、回転磁場中で熱処理を施したが、(a) と (b) を比較してみると、長手方向を磁化容易軸とする小さな異方性をもつことがわかる。これは、試料が 14 mm × 4 mm という長方形状のために生じた形状異方性の効果による。実際、円形状試料ではこのような磁気異方性は見られない。

Fig. 5(a) から (f) は、Fig. 3 の α -FeCoSiB 薄膜を製膜したガラス基板を光硬化接着剤を用いて PZT 基板上に接着した後、PZT 基板に $\pm 250 \text{ V}$ の電圧を印加して磁性膜の磁化曲線の変化を調べたものである。同図 (a) から (c) は長手方向、(d) から (f) は幅方向で測定した磁化曲線で、いずれも $-250 \text{ V} \rightarrow 0 \text{ V} \rightarrow +250 \text{ V}$ の順で電圧を印加した。後述する PZT 基板の

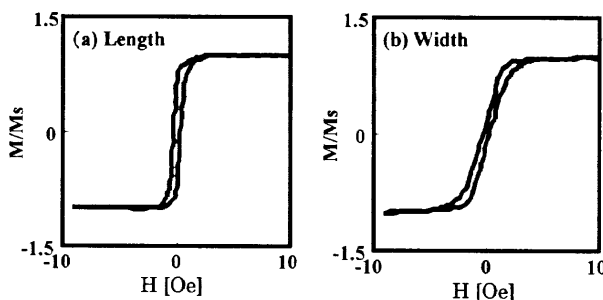


Fig. 4 M - H loops of the α -FeCoSiB film after heat treatment in a rotating field.

誘電ヒステリシスにより、磁化曲線に履歴現象が見られるが、 $-250\text{ V} \rightarrow +250\text{ V}$ の電圧印加で磁性膜の磁化曲線が、試料幅方向では磁化容易軸 $\rightarrow$ 困難軸に変化しており、作製した素子が見かけ上 ME 効果を示すことがわかる。Fig. 5 から評価した電圧印加による異方性磁界 (H_k) の変化量は、試料幅方向で約 8 Oe である。

3.2 電圧印加による磁性膜透磁率の変化

前節で述べた電圧印加による磁気特性の変化を定量的に評価するため、駆動周波数 1 MHz における磁性膜の初透磁率を印加電圧の関数として調べた。Fig. 6 は、最大 $\pm 250\text{ V}$ (実線) ならびに最大 $\pm 200\text{ V}$ (破線) の電圧を印加した場合の初透磁率の変化を示す。最大 $\pm 200\text{ V}$ の電圧を印加した場合、 $V = +200\text{ V} \rightarrow -200\text{ V}$ の電圧変化で、初透磁率 μ は $\mu = 90 \rightarrow 1600$ にまで変化し、電圧入力によって素子の透磁率が大幅かつ連続的に変化することがわかる。同図から、入力電圧 $V = 0\text{ V} \rightarrow -200\text{ V}$ の領域で初透磁率の変化率 ($\Delta\mu/\mu$) を算出してみると、 $(\Delta\mu/\mu)/V = 8\%/V$ に達し、良好な ME 結合を示す。

しかしながら、Fig. 6 に示すように、電圧印加による透磁率の変化は大きなヒステリシスを伴っている。この原因は、PZT 基板の誘電ヒステリシスから説明できる。Fig. 7 は、電圧印加による素子のベンディング量から磁性膜が受ける歪 $\Delta\lambda/\lambda$ を算出したものである。同図からわかるように、磁性膜

の透磁率変化の駆動力である歪は、PZT への印加電圧に対して顕著な履歴曲線を描く。この歪量 $\Delta l/l$ は PZT 基板のベンディング量と線形関係にあるので、結局 Fig. 6 の透磁率変化に見られるヒステリシス特性は、PZT 基板の誘電ヒステリシスを反映したものであるといえる。実際、Fig. 7 の関係を用いて Fig. 6 の透磁率変化を磁性膜への印加歪の関数として整理してみると、Fig. 8 に示す $\mu - \Delta\lambda/\lambda$ 特性が得られる。同図では、測定中の dc ドリフト接着接合に起因すると思われる小さな履歴が見られるものの、Fig. 7 のような顕著なヒステリシス特性は示さない。このようなヒステリシス特性は、具体的なデバイスへの応用では具合が悪いので、歪誘導型 ME 素子に用いる圧電基板には誘電ヒステリシスの小さいものが望ましいといえる。

素子のベンディング量をセンシングする磁性膜の能力として $F = \mu \{ \Delta\mu / (\Delta l/l) \}$ で定義した。性能指数 F を用いると、作製した素子の $\pm 1 \times 10^{-4}$ の歪に対する磁性膜のセンシング能力は $F \approx 20000$ になる。この値は現在使われているストレインゲージのセンシング能力 (抵抗形で約 2, シリコン形で約 200) と比べると著しく大きく、素子は優れた歪センシング能力をもつといえる。

Fig. 9 は、Fig. 6 の ME 素子について、素子の幅方向に dc バイアス磁場 H_0 を印加した場合の透磁率の変化を調べた結果である。前述したように、作製した素子の透磁率変化は、

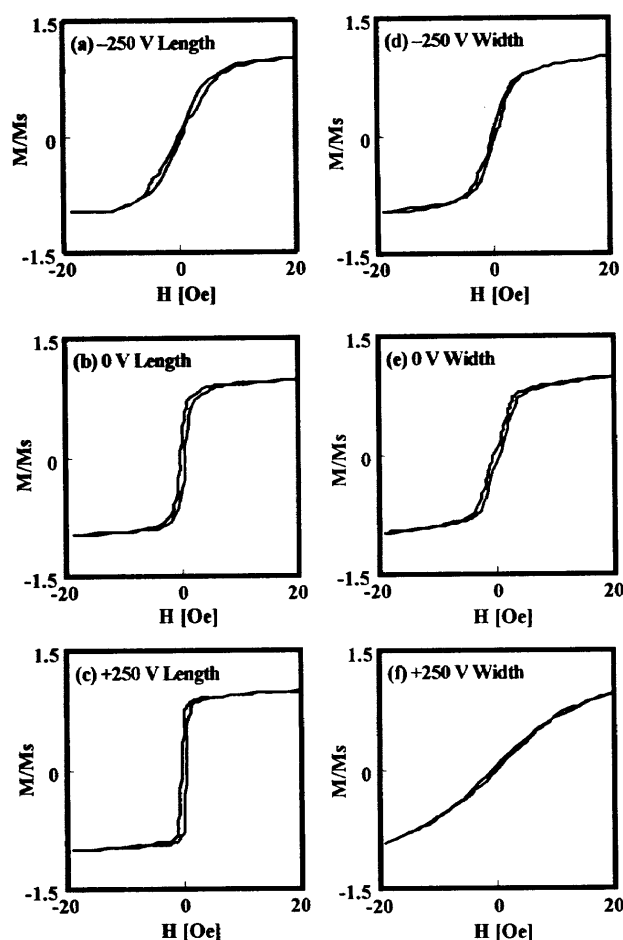


Fig. 5 Changes in M - H loops of the a-FeCoSiB film generated by applying a dc voltage to the PZT substrate.

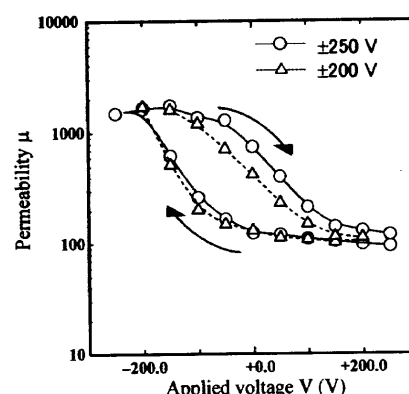


Fig. 6 Changes in the permeability of the a-FeCoSiB film as a function of the dc voltage applied to the PZT substrate.

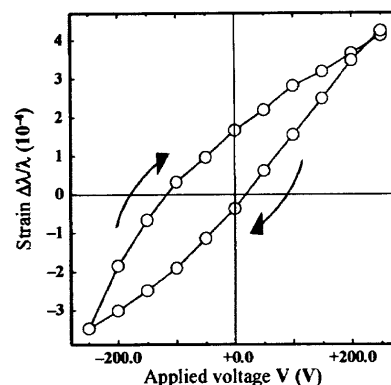


Fig. 7 Strain of the magnetic film *versus* applied voltage.

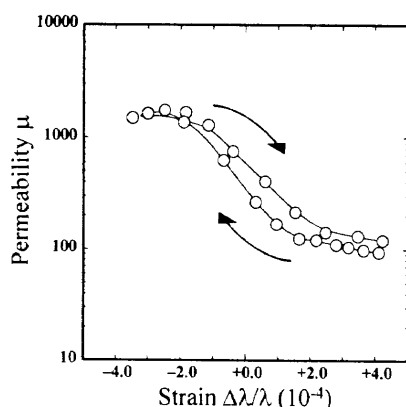


Fig. 8 Permeability versus strain of the magnetic film; calculated from relation between μ and V and $\Delta\lambda/\lambda$ and V .

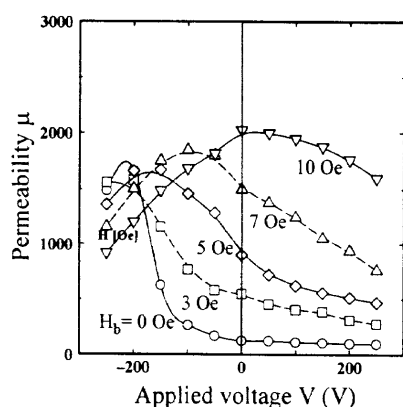


Fig. 9 Biased permeability versus applied voltage.

PZT 基板の誘電ヒスリシスの影響を受けるので、同図では入力電圧を $V = +250 \text{ V} \rightarrow -250 \text{ V}$ に変化させた場合に限りて描いてある。バイアス磁場を印加しない状態 ($H_b = 0$) では、 -180 V 付近で最大の ME 感受率 $\Delta\mu/\Delta V$ を示すが、バイアス磁場を印加することが曲線全体が右側（正極性側）シフトし、それに伴って最大の ME 感受率が得られる印加電圧も低

電圧側に移動する。このことは、小さなバイアス磁場を印加することで、低電圧動作が可能な ME 素子が得られることを意味しており、応用上極めて都合がよいといえる。

4. ま と め

FeCoSiB スパッタ膜を形成した薄いガラス基板を PZT 圧電基板上に接着した接合タイプの ME 素子を作製し、電圧印加による透磁率の変化を調べた。その結果、 $+200 \text{ V}$ から -200 V までの印加電圧変化で、1680% に達する大きな透磁率の変化が得られ、作製した素子が良好な ME 特性をもつことを示した。

本報で述べた接合タイプの ME 素子は、その構造がシンプルで、小型化も可能である。また圧電材料に PZT 基板を用いているので、アクチュエータとしての動作も可能であり、センサ機能とアクチュエータ機能が複合化した新たなマイクロ磁気デバイスを開拓するものと期待される。

謝 辞 本研究の一部は、カシオ科学技術振興財団の研究助成を受けて行ったものであり、関係各位に感謝する。

文 献

- 1) H. Schmid, H. Rieder, and E. Asher: *Solid State Commun.*, **3**, 327 (1965).
- 2) M. Mercier and B. Cursoux: *Solid State Commun.*, **6**, 207 (1968).
- 3) K. I. Arai, C. S. Muranaka, and M. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 916 (1994).
- 4) 申 光鎭, 井上光輝, 荒井賢一: 電気関係学会東北支部連合大会論文集, p. 23 (1997).
- 5) M. Inoue, Ph. D. Thesis: Toyohashi University of Technology (1989).
- 6) K. I. Arai and N. Tsuya: *J. Appl. Phys.*, **49**, 1718 (1978).
- 7) M. Marcus: *Ferroelectrics*, **57**, 203 (1984).
- 8) J. K. Lee and M. A. Marcus: *Ferroelectrics*, **32**, 93 (1981).
- 9) J. D. Livingston: *Phys. Stat. Sol. (a)*, **70**, 591 (1982).

1997 年 10 月 29 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録