



研究報告

## 高感度歪検出素子

山寺秀哉，西部祐司

## Strain Sensor Element with High Sensitivity

Hideya Yamadera, Yuji Nishibe

## 要 旨

逆磁歪効果と磁気 - インピーダンス効果を利用した新規な歪検出素子である薄膜歪 - インピーダンス (SI) 素子を考案・試作し、素子の歪 - インピーダンス特性を評価した。薄膜SI素子は、導体層がアモルファス磁歪層でサンドイッチされた構成で、コーニング0313ガラス基板上に、メタルマスクを介してマグネトロンスパッタリング法により形成した。磁歪層には、 $\lambda = -6 \times 10^{-6}$  の負磁歪の $\text{Co}_{73}\text{Si}_{12}\text{B}_{15}$ を使用し、素子の長手方向あるいは幅方向に一軸性の磁気異方性を付与した。薄膜SI素子においては、歪は1～15MHzの高周波通電に対するインピーダン

ス変化値として検出される。 $\varepsilon = \pm 2 \times 10^{-3}$ の歪を印加すると、磁歪層の歪による透磁率変化に対応してインピーダンスが急激に変化した。素子のゲージ率(歪に対するインピーダンス変化率)は、1～15MHzにおいて最大で1500～2000に達し、磁歪層単層素子や従来の歪抵抗素子の数倍から数1000倍もの歪感度を有する歪検出素子を実現した。この高感度歪検出素子は、高いゲージ率を有するため、今後、微少な歪検知用機械量センサへの応用が期待される。

## キーワード

センサ，素子，感度，歪，インピーダンス，軟磁性，薄膜，透磁率，表皮効果，ゲージ率

## Abstract

A strain sensor element utilizing the inverse magnetostrictive effect and magneto-impedance effect was developed, and the strain-impedance properties of the element were investigated. The Strain-Impedance (SI) element constructed from a CoSiB/Cu/CoSiB layered film was prepared on a Corning No. 0313 glass substrate by magnetron sputtering under a magnetic field. The  $\text{Co}_{73}\text{Si}_{12}\text{B}_{15}$  negative magnetostriction film ( $\lambda = -6 \times 10^{-6}$ ) was selected as magnetostrictive layers, and magnetic anisotropy was induced parallel or perpendicular to applied strain direction. In the SI element, the applied strain  $\varepsilon$  was detected as a change in

impedance Z, inductance L or resistance R in the range from 1 MHz to 15 MHz. By applying strain ( $\varepsilon = \pm 2 \times 10^{-3}$ ), the impedance dramatically changed due to the change in permeability of the magnetostrictive layers. The maximum gauge factor,  $G_{\text{max}}$ , which was defined as the maximum fractional change in impedance to strain,  $(\Delta Z/Z)/\varepsilon$ , was 1500-2000 at 1-15 MHz. These values are much larger than those of the single-layer CoSiB element. This layered SI element will be very useful for sensing small amounts of strain.

## Keywords

Sensor, Element, Sensitivity, Strain, Impedance, Soft magnetic, Thin film, Permeability, Skin effect, Gauge factor

## 1. はじめに

近年、磁歪材料の逆磁歪効果（歪による透磁率変化）を利用して、高周波領域での磁歪材料の表皮効果をインピーダンスで検出する方式の歪検出素子がアモルファスワイヤ<sup>1)</sup>・磁歪薄膜<sup>2)</sup>で提案され、歪検出利用の機械量センサへの応用が期待されている。これらの素子は、半導体歪ゲージのゲージ率（歪に対する抵抗変化率）よりも10倍以上高い1000以上のゲージ率（歪に対するインピーダンス変化率）が得られているため、超高感度な歪センサへの応用が試みられている<sup>3,4)</sup>。

ところが、これらの素子は20MHz以上の高周波域でのインピーダンスを計測しなければならないため、正確な測定のためにはインピーダンスマッチングや電磁シールドを必要としていた。

一方、我々は、閉磁路構造を持つCoSiB/Cu/CoSiB積層膜を利用した薄膜磁気インピーダンス（MI）素子を検討し、0.1～10MHzの低周波数領域でも高分解能な磁界検出素子を得ている<sup>5-7)</sup>。

そこで本報告では、この閉磁路でCuとの積層構造の素子に着目し、測定が簡便な20MHz以下の低周波数域でも高感度な歪検出素子を得るために、CoSiB磁歪膜の逆磁歪効果を利用したCoSiB/Cu/CoSiB積層構造の薄膜歪-インピーダンス（SI）素子を作製し、特性評価を実施した。

## 2. 実験方法

### 2.1 素子の構造と作製

作製した歪-インピーダンス素子（SI素子）をFig. 1に示す。素子は上下の磁歪層で囲まれた導体層から構成され、素子の長手方向には一軸性の外部歪が印加でき、導体層を介して高周波電流が通電できるようになっている。また、磁歪層は導体層を取り囲む閉磁路構造をとっている。磁歪層は $\lambda_S = -6 \times 10^{-6}$ の磁歪定数を持つ負磁歪膜である $\text{Co}_{73}\text{Si}_{12}\text{B}_{15}$ 膜、導体層は低抵抗であるCu膜を使用した。外形寸法は磁歪層幅0.5mm、長さ4mm、導体層幅0.1mm、長さ5mmである。膜厚は下部磁歪層が $2\mu\text{m}$ 、導体層が $3\mu\text{m}$ 、上部磁歪層が $2\mu\text{m}$ である。

本実験では磁歪膜に磁気異方性を付与するために、磁界中でのスパッタリング法により作製した。成膜中の磁界印加は、スパッタ装置の基板ホルダー上に永久磁石を配設し、基板に一軸性の磁界（ $H=580\text{e}$ ）が印加できるようにした。成膜には純度3Nの $\text{Co}_{73}\text{Si}_{12}\text{B}_{15}$ 焼結体と純度4NのCu板を使用して、コーニング0313ガラス（ $68 \times 26 \times 1.2\text{mm}$ ）上にメタルマスクを介してマグネトロンスパッタリング法により形成した。

歪-インピーダンス特性の評価素子は、CoSiB膜の磁気異方性の方向（磁化容易軸方向）を素子の長手方向と平行方向に付与したものと垂直方向（幅方向）に付与したものと2種類を測定した。また、比較用に膜厚 $4\mu\text{m}$ のCoSiB単層膜素子も、同様に2種類の素子を測定した。なお、単層膜素子の外形寸法は磁歪層幅0.2mm、長さ

4mmである。

### 2.2 評価方法

特性評価は以下に示すように行った。Fig. 2のように、Fig. 1の素子を歪印加用治具に固定し、マイクロメータで歪を印加した。歪量は $\pm 2 \times 10^{-3}$ （ $\pm 2000\mu\text{strain}$ ）の範囲で印加し、基板の裏側に貼り付けられた歪ゲージによって比較した。ここで歪の正負は、Fig. 2のように膜に外

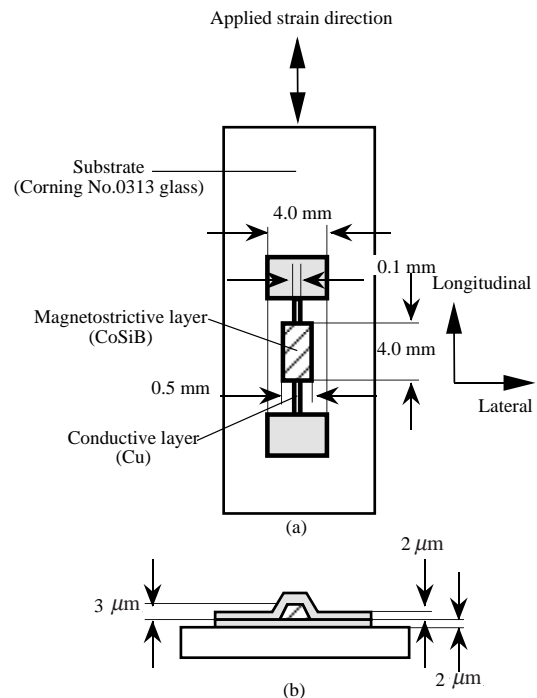


Fig. 1 Schematic view of layered Strain-Impedance (SI) element: (a) plane view and (b) cross-sectional view.

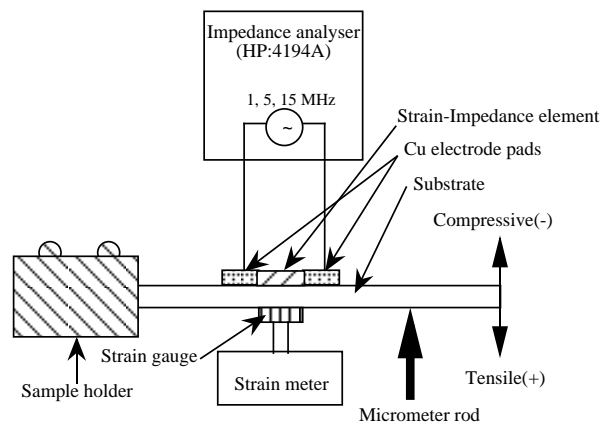


Fig. 2 Schematic of the experimental setup for evaluating strain-impedance properties.

部引張歪が加わる場合に正、膜に外部圧縮歪が加わる場合に負とした。

インピーダンス測定は、インピーダンスアナライザ（HP：4194A）を使用して、4端子法によりインピーダンス： $Z$ 、インダクタンス： $L$ 、抵抗： $R$ を測定した。駆動電流は9.5mAで、測定周波数は1MHz、5MHz、15MHzである。

また、磁歪膜のM-H特性はVSMにより、膜の構造はX線回折により行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 磁歪膜の磁気特性

薄膜SI素子の磁歪層で用いるCoSiB膜の保磁力は0.30eと軟磁性を示し、飽和磁化は540emu/ccであった。

成膜中に磁界を印加した方向と平行な方向が磁化容易軸方向となり、異方性磁界は110eであった。膜の構造は、X線回折法によりアモルファスであることを確認した。

#### 3.2 歪 - インピーダンス特性

Fig. 3に、素子幅方向に磁気異方性を付与したときのCoSiB/Cu/CoSiB積層素子の歪に対する15MHzにおけるインピーダンス： $Z$ 、インダクタンス： $L$ 、抵抗： $R$ の変化を示す。Fig. 3から、歪 - インピーダンス素子に圧縮歪を印加すると、ピークを持った非線形で非対称なインピーダンス変化、インダクタンス変化、抵抗変化を示すことがわかる。このとき特性値の最大変化率は、インピーダンス変化率： $\Delta Z/Z$ が40%、インダクタンス変化率： $\Delta L/L$ が40%、抵抗変化率： $\Delta R/R$ が98%に達する。素子のインダクタンスは、CoSiB磁歪膜の透磁率に比例した特性値であるので、Fig. 3(b)の歪 - インダクタンス特性は、歪による透磁率変化を反映したものであると考えられる。一方、Fig. 3(c)の歪 - 抵抗特性でもインダクタンス特性と同様な変化を示している。これは、歪による磁歪層の透磁率の変化に対応したCu導体層の抵抗の変化によると考えられる。すなわち、導体層を取り囲む磁性層の透磁率が変化すると導体層を貫く漏れ磁束が変化し、導体層の渦電流損失が変化することによることが薄膜インダクタの研究<sup>8)</sup>で知られている。これらの透磁率変化の原因としては、以下のことが考えられる。CoSiBは負磁歪材料なので、長手方向に圧縮歪を印加すると、逆磁歪効果により磁化の方向が幅方向から長手方向に回転し透磁率が上昇し、長手方向に磁化の方向が揃った歪値で透磁率は最大となる。さらに、圧縮歪を印加すると、磁化の方向は素子面に垂直な方向に回転し、透磁率が低下する。上述の磁化回転機構は、応力誘導の透磁率変化として報告<sup>9)</sup>されていて、前者の機構では、透磁率： $\mu$ は磁気弾性エネルギー： $K_u$ に対して $\mu \propto 1/K_u^{1/2}$ 、後者の機構では、 $\mu \propto 1/K_u$ であることが知られている。この透磁率変化の傾向は、Fig. 3のピーク値の左右の特性の傾きの傾向と一致する。

Fig. 4に、同じCoSiB/Cu/CoSiB積層素子の歪に対する

1MHzにおけるインピーダンス： $Z$ 、インダクタンス： $L$ 、抵抗： $R$ の変化を示す。Fig. 4でも、Fig. 3と同じような歪 - インピーダンス特性を得られるが、ピーク値を示す歪値が高圧縮歪側にシフトする。特性変化率に関しては、インダクタンス変化率が15MHzのときとほとんど同じであるのに対して、インピーダンス変化率、抵抗変化率が低くなる。すなわち、周波数を低下することにより、導体層の渦電流損失の変化分が低下することによると考えられる。しかし、1MHzの周波数でも歪によるインピーダンス変化、抵抗変化が観測された。

Fig. 5に、幅方向に磁気異方性を付与したときのCoSiB単層素子の歪に対する1MHzにおけるインピーダンス： $Z$ 、インダクタンス： $L$ 、抵抗： $R$ の変化を示す。Fig. 5

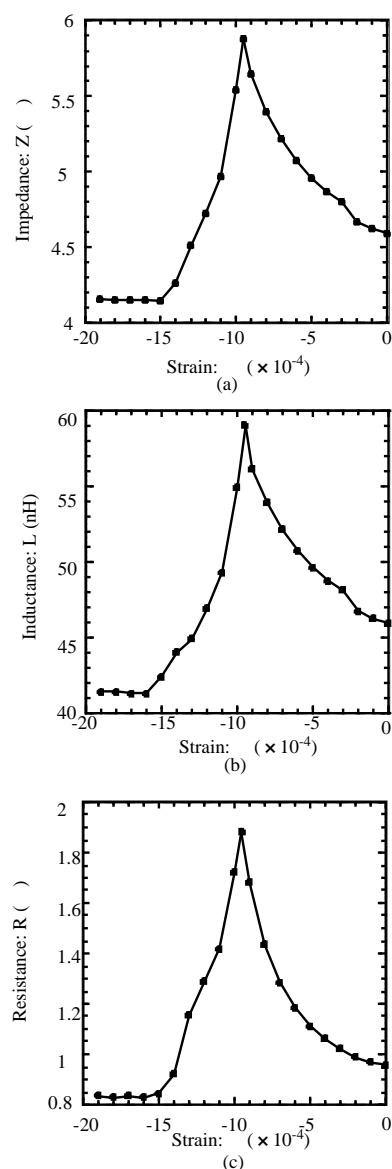


Fig. 3 Dependence of (a) impedance  $Z$ , (b) inductance  $L$ , and (c) resistance  $R$  on strain  $\epsilon$  at 15 MHz in the layered SI element (magnetic anisotropy was induced perpendicular to the applied strain).

から、歪に対するインダクタンス変化はFig. 4と同様に観測されるが、インピーダンスと抵抗の変化に関しては、通常の金属抵抗の歪 - 抵抗特性と同様な単調増加の傾向しか現れない。これは、インピーダンスの大半が抵抗に支配されることと、CoSiB単層膜では、1MHzの周波数でCoSiB層の渦電流損失の影響が現れないためであると考えられる。したがって、Fig. 3, Fig. 4の積層素子で大きなインピーダンス変化・抵抗変化が観測された理由は、低抵抗のCu導体層との積層化により抵抗分のベースが下がったことと、Cuとの積層化と閉磁路構造によって1~15MHzの低周波数領域でCu導体層の渦電流損失が現れたためであると推測される。

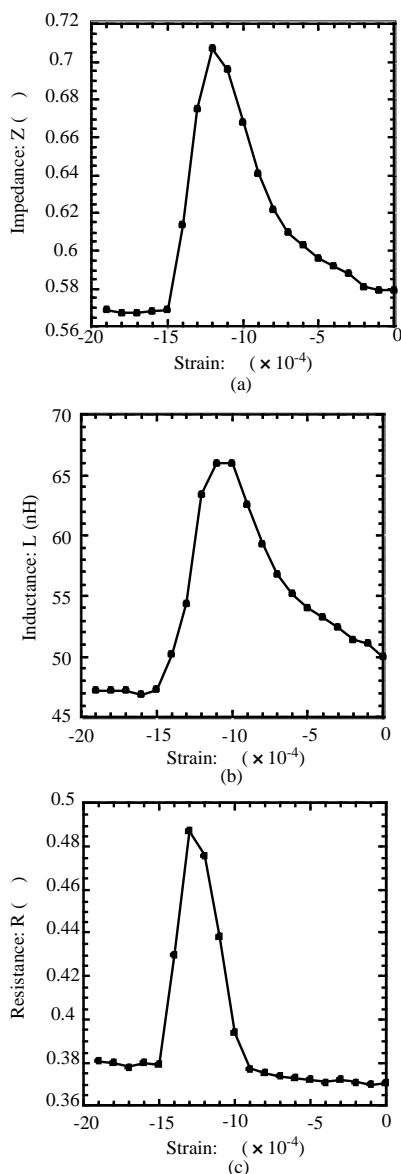


Fig. 4 Dependence of (a) impedance  $Z$ , (b) inductance  $L$ , and (c) resistance  $R$  on strain  $\epsilon$  at 1 MHz in the layered SI element (magnetic anisotropy was induced perpendicular to the applied strain).

Fig. 6に、長手方向に磁気異方性を付与したときのCoSiB/Cu/CoSiB積層素子の歪に対する15MHzにおけるインピーダンス： $Z$ 、インダクタンス： $L$ 、抵抗： $R$ の変化を示す。Fig. 6の特性は、ほぼFig. 3の特性プロファイルと似ているが、ピーク値をとる歪値が低圧縮歪側に大きくシフトしている。前述の歪による透磁率変化のメカニズムによれば、長手方向に磁気異方性を付与すれば零歪のとき透磁率が最大となり、引張歪により透磁率： $\mu$ は $\mu \propto 1/Ku^{1/2}$ の関係で減少し、圧縮歪により $\mu \propto 1/Ku$ の関係で減少すると考えられる。Fig. 6のピーク値が零歪で生じないのは、磁歪膜の内部応力等の影響により零歪での磁化方向が長手方向と平行でないことによると考え

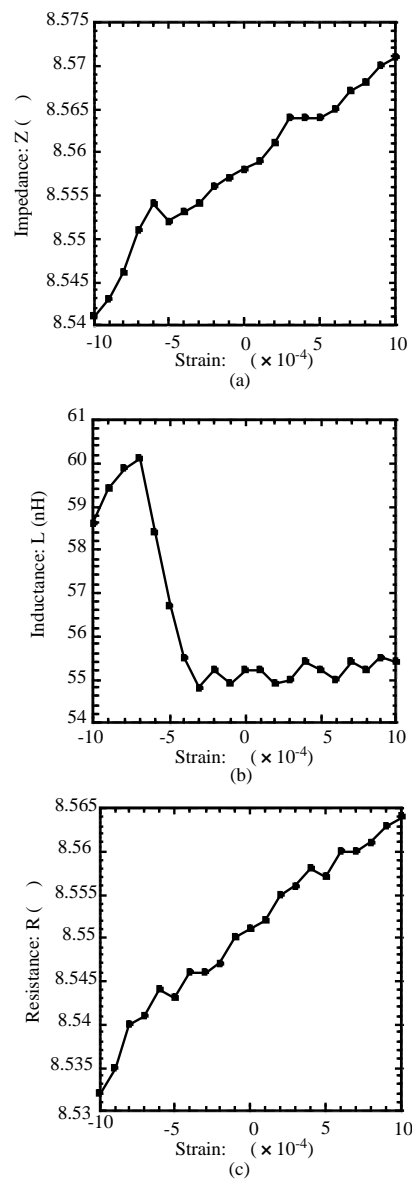


Fig. 5 Dependence of (a) impedance  $Z$ , (b) inductance  $L$ , and (c) resistance  $R$  on strain  $\epsilon$  at 1 MHz in the single SI element (magnetic anisotropy was induced perpendicular to the applied strain).

られる。

3.3 ゲージ率

3.2で述べた歪 - インピーダンス特性の傾きが、歪検出感度を表すゲージ率であるので、式(1)にしたがって、ゲージ率：Gを算出した。ただし、Fig. 3 ~ Fig. 6の歪 - インピーダンス特性は非線形であるので、インピーダンスのピーク値を示す歪値から  $5 \times 10^{-4}$  の歪の間のインピーダンス変化率の平均値：GaveとFig. 3 ~ Fig. 6の特性の最大の傾き：Gmaxの2通りのゲージ率で示した。

$$G(Z) = \{ (Z_{peak} - Z) / Z \} / \epsilon \quad (1)$$

G(Z) : ゲージ率

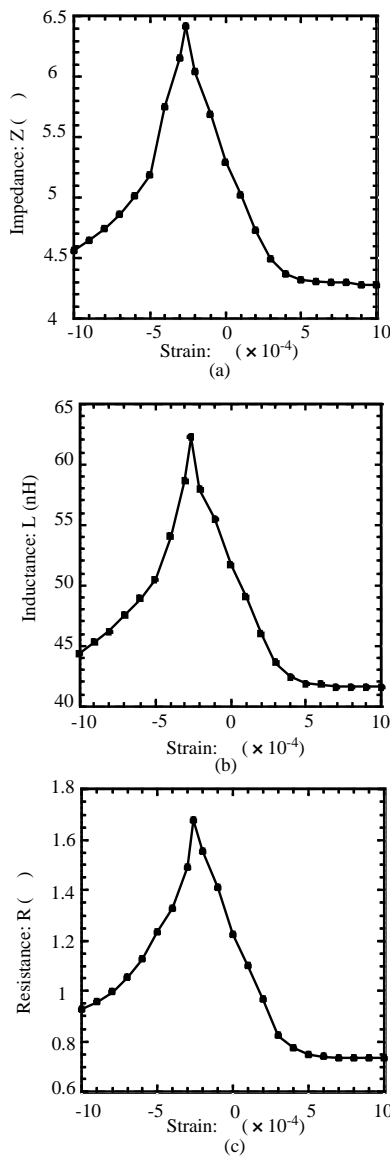


Fig. 6 Dependence of (a) impedance Z, (b) inductance L, and (c) resistance R on strain  $\epsilon$  at 15 MHz in the layered SI element (magnetic anisotropy was induced parallel to the applied strain).

$Z_{peak}$  : インピーダンスのピーク値  
 $\epsilon$  : 歪 (Gaveのとき  $5 \times 10^{-4}$ )

Fig. 7, Fig. 8に、式(1)から算出したゲージ率：Gの各素子における周波数依存性を示す。Fig. 7, Fig. 8からわかることを、以下に示す。

(1) CoSiB単層素子の場合、Gmax・Gaveは100以下と小さい。また、Gの周波数依存性は強く、1MHzでの値は10以下と小さい。

(2) CoSiB/Cu/CoSiB積層素子の場合、Gmaxは2000程度の値に達する。また、Gaveは周波数が高い程大きい傾向にあるが、1MHzでも300以上の値である。

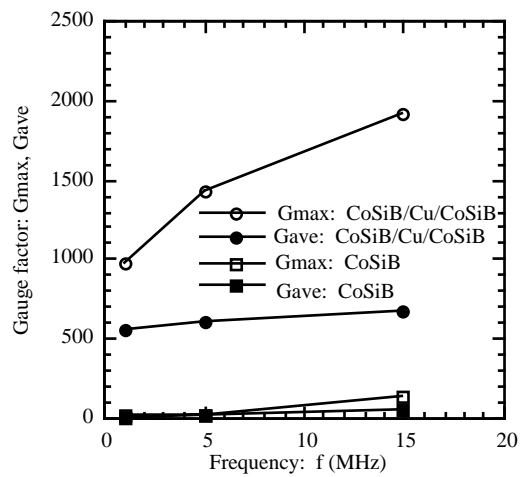


Fig. 7 Dependence of gauge factor G on frequency f in the SI elements (magnetic anisotropy was induced perpendicular to the applied strain).

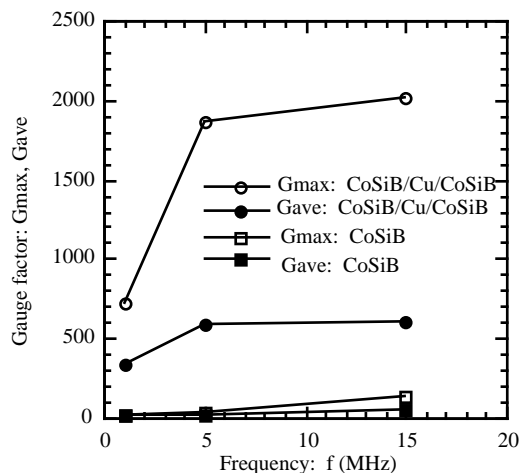


Fig. 8 Dependence of gauge factor G on frequency f in the SI elements (magnetic anisotropy was induced parallel to the applied strain).

(3) 積層素子は単層素子よりも15MHzでは10倍程度、1MHzでは50倍程度のGを持つ。

(4) 磁気異方性付与の方向によって、ゲージ率の値と周波数依存性は若干変わるが、全体の傾向はほとんど同じである。

以上のことから、素子の歪感度を表すゲージ率でも、CoSiB磁歪膜のCu導体層との積層化と閉磁路構造の効果がみられた。特に、低周波数域でのゲージ率に関しては顕著であった。また、CoSiB/Cu/CoSiB積層素子のゲージ率の最大値は、半導体歪ゲージのゲージ率の10倍程度であった。さらに、この歪検出素子は薄膜で実現したことから、マイクロマシンニング化により、超高感度な歪検知利用の機械量センサへの応用が期待される。

#### 4. まとめ

高感度な歪検出素子への応用のために、CoSiB膜の逆磁歪効果を利用した歪 - インピーダンス素子 (CoSiB単層, CoSiB/Cu/CoSiB積層) を作製し、歪 - インピーダンス特性を評価した。その結果をまとめると、以下の通りである。

(1) 素子のインピーダンス:  $Z$ , インダクタンス:  $L$ , 抵抗:  $R$  は、歪印加によりピークを持った非線形で非対称な変化を示した。

(2) 各変化率は、周波数が高い程大きい傾向にある。

(3) 各変化率は、CoSiB単層素子よりもCoSiB/Cu/CoSiB積層素子の方が大きい。特に、 $R$ ,  $Z$  の変化率と低周波数での各変化率は、より顕著になる。

(4) 磁気異方性付与の方向によって、各変化率のピーク値を示す歪値がシフトするが、全体のプロファイルはあまり変化しない。

(5) 1MHz ~ 15MHzでのCoSiB/Cu/CoSiB積層素子でのゲージ率:  $G$  (歪に対するインピーダンス変化率) は、平均値:  $G_{ave}$ で300 ~ 600, 最高値:  $G_{max}$ で1500 ~ 2000に達する。

#### 参考文献

- 1) Shen, L. P., Uchiyama, T., Mohri, K., Kita, E. and Bushida, K.: IEEE Trans. Magn., 33(1997), 3355
- 2) 申光鎬, 井上光輝, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, 23(1999), 1425
- 3) 沈麗萍, 北英二, 成瀬祐介, 毛利佳年雄, 内山剛: 日本応用磁気学会誌, 22(1998), 677
- 4) 申光鎬, 井上光輝, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, 22(1998), 697
- 5) Morikawa, T., Nishibe, Y., Yamadera, H., Sakata, J., Nonomura, Y., Takeuchi, M. and Taga, Y.: IEEE Trans. Magn., 32(1996), 3177
- 6) Morikawa, T., Nishibe, Y., Yamadera, H., Nonomura, Y., Takeuchi, M. and Taga, Y.: IEEE Trans. Magn., 33(1997), 4367
- 7) 山寺秀哉, 西部祐司, 森川健志, 野々村裕: 電気学会論文誌A, 118-A(1998), 689
- 8) 山口正洋, 荒井賢一: 日本応用磁気学会誌, 16(1992), 437
- 9) Hayashi, K., Hayakawa, K., Ochiai, Y., Matsuda, H., Ishikawa, W., and Aso, K.: J. Appl. Phys., 66(1984), 3028

(2001年1月8日原稿受付)

#### 著者紹介



山寺秀哉 Hideya Yamadera

生年: 1957年。

所属: 半導体デバイス研究室。

分野: センサ用薄膜材料・プロセスの研究。  
磁気デバイスの研究。

学会等: 応用物理学会, 日本応用磁気学会, 電気学会会員。



西部祐司 Yuji Nishibe

生年: 1959年。

所属: パワーデバイス研究室。

分野: 自動車用磁気センサに関する研究。

学会等: 電気学会会員。