

아몰퍼스 FeCoSiB 박막의 고감도 스트레인 검출특성

신 광호, 荒井 賢一, 사공 건*

High Sensitive Strain Detection of FeCoSiB Amorphous Films

Kwang-Ho Shin · Ken-Ichi Arai · Geon Sa-Gong*

요약

고자왜특성과 연자성특성을 가짐으로서 우수한 자기기계결합특성을 나타내는 아몰퍼스 FeCoSiB 박막의 스트레인 검출특성에 대해 연구하였다. 투자율은 박막기판을 마이크로메타를 이용하여 벤딩시켜 박막에 스트레인을 인가하면서 조사하였으며, 이때 박막에 스트레인이 인가되면 박막의 자기기계결합에 의해 투자율이 변화하였다. 스트레인에 의한 성능지수 $F=(\Delta\mu/\mu)/\varepsilon$ (단위스트레인에 대한 투자율의 변화)가 1.2×10^5 라는 매우 높은 값을 나타내어 본 연구에서 제작한 박막이 스트레인에 대하여 고감도특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한 제작된 박막을 센서소자로 응용하기 위해 박막을 미세 가공하고, 스트레인에 대한 고주파 임피던스의 변화를 조사하였으며, 박막의 우수한 자기기계결합특성으로 박막패턴의 임피던스는 인가된 스트레인에 의해 민감하게 변화되었다. 특히, 100MHz의 구동주파수에 있어서 300×10^{-6} 의 스트레인이 인가된 경우 46%의 임피던스변화율이 얻어졌다. 따라서 본 연구에서 제작한 박막소자는 초고감도의 스트레인 센서로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

Amorphous FeCoSiB films with high saturation magnetostriction and excellent soft magnetic properties have been studied to evaluate their strain sensitivity. Films were subjected to a strain by bending of their substrates, which caused a change in the magnetic anisotropy of films via magnetoelastic coupling. Films were exhibited a figure of merit $F=(\Delta\mu/\mu)/\varepsilon$ (change in film permeability μ per unit strain ε) of 1.2×10^5 , which is comparable with that of amorphous ribbons. To make a study of application of magnetostrictive films as strain sensor elements, we have prepared a micro-patterned film by means of the photolithography and ion milling processes. Impedance change in the patterned films, when strain was applied, was measured over the frequency range from 1 MHz to 1 GHz. Reflecting a large value of figure of merit F , a variation of 46% impedance of films was shown at 100 MHz frequency when a strain of 300×10^{-6} was applied.

Key Words : Magnetostrictive films, Strain sensitivity, High frequency impedance

1. 서론

철계 아몰퍼스자성재료는, 적절한 열처리를 행함으로써

고자왜와 우수한 연자성특성을 동시에 가지고 있어서 높은 자기기계결합계수를 나타낸다^[1]. 이 재료들은 스트레인에 대해 민감한 자기적특성의 변화를 나타내므로 고감도의 스트레인 센서나 압력 센서^[2] 등의 구성재료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. Wun-Fogle등은 철계 아몰퍼스 리본에 있

東北大學 電気通信研究所 (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University)

* 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 (Dept. of Electrical and Electronic Engr., Dong-A University)

<접수일자 : 1999년 12월 4일>

어서 단위스트레인에 대한 투자율의 변화율을 스트레인 검출의 성능지수, $F=(\Delta \mu/\mu)/\epsilon$ 로 평가한 경우, 그 값이 무려 2×10^5 을 초과하는 것으로 보고하고 있다^[3]. 이 값은 현재 상용되고 있는 스트레인 센서인 금속 스트레인 센서나 반도체 스트레인 센서의 성능지수(단위스트레인에 대한 전기저항의 변화율)와 비교하면, 금속 스트레인 센서의 약 10^5 배, 반도체스트레인센서의 약 10^3 배 정도 큰 값들이다.

그러나, 지금까지의 자왜재료를 이용한 센서의 연구는 주로 급냉에 의해 제작된 리본 등의 벌크재료를 이용한 것이었다. 고체디바이스를 구성하는 관점에서 박막재료가 유리하지만, 센서로 응용하기 위한 자왜박막시료의 스트레인 의존특성에 대한 연구의 예는 지금까지 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고감도 스트레인 센서로 응용하기 위해 아몰퍼스 FeCoSiB 고자왜 박막을 제작하고, 그들의 스트레인에 대한 투자율과 고주파 임피던스의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

고감도 스트레인 센서용 자왜박막은 작은 스트레인에 의해 자기특성이 민감하게 변화되어야 하므로 고자왜 특성과 고투자율 특성을 동시에 나타내는 즉, 자기기계결합계수가 크고 분산이 작은 일축 자기이방성을 나타내는 것이 필요하다. 그런데, 철을 다량 포함하는 아몰퍼스 합금재료는 압전재료 PZT의 전기기계결합계수(약 0.7)를 능가하는 큰 자기기계결합계수를 나타내는 물론 제2의 전이금속의 첨가에 의해 유도 자기이방성의 제어가 가능하므로, 위의 요구조건을 만족할 수가 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 스트레인 센서를 구성하기 위한 자성박막으로 $(Fe_{1-x}Co_x)_{0.76}Si_{0.11}B_{0.13}$ 의 조성을 가지는 아몰퍼스 고자왜박막을 사용하였다. 이들 자성박막은 RF스파타링법을 이용하여 두께 0.15 mm의 유리기판에 투자율 측정으로 $1 \mu m$, 임피던스측정용으로 $5 \mu m$ 의 두께로 성막하고, $350^\circ C$, 5000e의 회전자계(60rpm)에서 2시간, 정자계에서 1시간동안 열처리를 행하였다.

코발트(Co)첨가에 따른 유도 자기이방성의 변화를 조사하기 위하여 시료진동형자력계 (Vibrating Sample Magnetometer)를 사용하여 자화곡선을 측정한 후, 자

화용이축과 자화곡란축의 자화곡선을 비교하여 평가하였다.

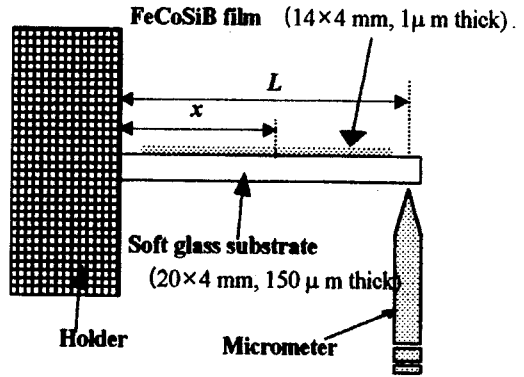


그림 1. FeCoSiB박막의 스트레인 감도특성을 측정하는 장치

Fig.1. Experimental setup for measuring a strain sensitivity of FeCoSiB films

Fig. 1은 FeCoSiB박막의 스트레인 감도특성을 평가하기 위해 이용한 측정계를 나타낸 것이다. 자왜박막을 성막한 기판을 외팔보(cantilever)상으로 고정하고, 그 자유단을 마이크로메타를 이용하여 강제적으로 미소변위를 가하면서 투자율 및 고주파 임피던스를 측정하였다. 이 때, 자성박막의 투자율은 8자형코일을 이용한 측정계를 이용하여 1 MHz의 구동주파수에서 측정하였다. 자성박막시료의 스트레인에 대한 고주파 임피던스의 변화를 평가하기 위하여 포토리소그래피법과 이온밀링법을 이용하여 길이 3mm, 폭 $100 \mu m$, 7턴의 미안더(meander)타입 패턴으로 미소가공하였다. 제작된 시료는 1 MHz에서 1 GHz까지의 주파수범위에서 Network Analyzer[HP8752A]를 이용하여 스트레인 인가에 따른 임피던스를 측정하였다.

박막에 스트레인을 인가하기 위한 미소변위는 박막 기판의 고정점에서 14mm 떨어진 자유단에 가하고, 그림 1의 고정점에서 x ($=7mm$) 지점에 픽업코일을 설치하여 투자율을 측정하였다. Fig. 1에 나타낸 것처럼 측정계를 설치한 경우, 박막기판에 가한 미소변위에 의해 발생하는 박막 x 부분의 스트레인 ϵ 은 식 (1)에 의해 나타낼 수 있다^[4].

$$\epsilon = \left[\frac{3h(L-x)}{2L^3} \right] \delta \tag{1}$$

여기서, h 는 기판의 길이, L 는 고정점에서 미소변위를 가한 위치까지의 거리, δ 는 미소변위이다.

첨가된 박막시료를 사용하였다.

3. 실험결과

Fig. 2는 열처리한 시료의 코발트(Co)의 첨가량에 따른 유도자기이방성 K_u 의 변화를 나타낸 것이다. 정자계 중에서 열처리한 경우(- ■ -), 박막의 유도자기이방성은 코발트의 첨가량에 따라 증가하고 있고, 제2의 전이금속의 첨가에 의해 자성막의 유도자기이방성의 제어가 가능함을 볼 수 있다.

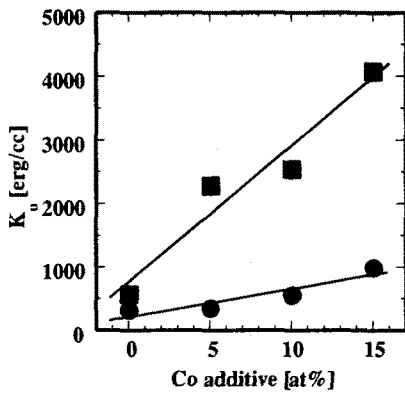


그림 2. 코발트첨가량에 따른 자기이방성 정수

- : 회전자계 중에서 열처리한 경우
- : 정자계 중에서 열처리한 경우

Fig. 2. Magnetic anisotropy constant K_u vs. Co additive.

- : after annealing in a rotational magnetic field,
- : after annealing in a static magnetic field.

한편 자기이방성의 변화에 따른 자기기계결합계수와 스트레인 검출에서의 성능지수는 자성막의 자기적 특성(포화자왜, 영률)을 이용하여 평가할 수가 있다^[5].

일반적으로 포화자왜가 크고 자기이방성이 작을수록 자기기계결합계수가 크게 되고, 성능지수도 높아진다. 이와 같은 이유에서 코발트의 첨가량이 작을수록 자기이방성이 작아져서 고감도의 스트레인 검출이 가능함을 알 수 있다.

그러나, 본 연구에서 제작한 시료의 경우, 코발트가 10%미만의 시료에서는 자기이방성의 분산이 크게 되어 자성박막의 고주파특성이 나빠져서 코발트가 10%

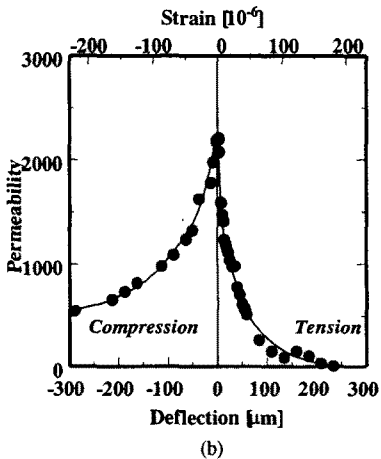
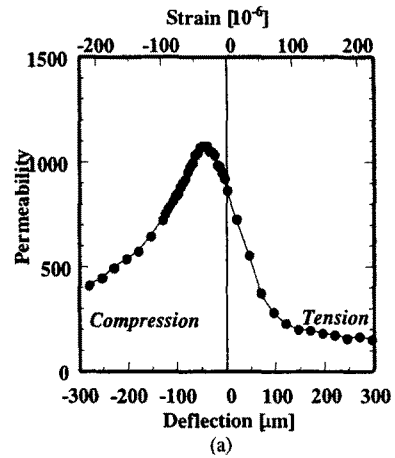


그림 3. 자성막 기판의 기계적 변형에 의한 FeCoSiB박막의 투자율 변화

- (a) 회전자계 중에서 열처리한 경우
- (b) 정자계 중에서 열처리한 경우

Fig. 3. Permeability of a FeCoSiB film by mechanical deformation of a substrate

- (a) after annealing in a rotational magnetic field,
- (b) after annealing in a static magnetic field.

Fig. 3은 자성막 기판을 강제적으로 변형시킨 경우에 있어서 자성박막의 투자율변화를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 회전자계 중에서 열처리를 실시하여 자성박막의 면내 자기동방성을 가지는 시료의 스트레인 감

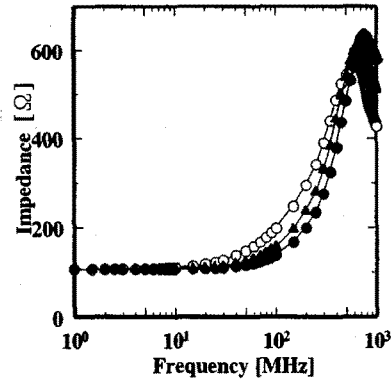
도특성을 나타낸 것으로서 변위량 $-24\mu\text{m}$ 에서 $56\mu\text{m}$ 까지의 범위에서는 직선성이 좋고, $1\mu\text{m}$ 당 약 8.4의 투자율변화를 나타내고 있다. 이 결과에서 보듯이 투자율이 최대로 되는 것은 -30×10^{-6} 의 스트레인이 인가된 경우이다. 이때의 스트레인을 자기탄성에너지 $E_m = (3/2) \lambda_s \varepsilon E$, (λ_s 는 포화자왜, ε 는 인가스트레인, E 는 영률)를 계산하면 약 800 erg/cc 이었으며, 이 값은 박막의 자화곡선에서 구한 포화자왜 (약 $1.50e$)에 의한 정자에너지와 거의 동일하였다. 즉, -30×10^{-6} 의 압축스트레인에 의해 자성박막의 자기모멘트의 방위가 측정자계에 대하여 거의 수직으로 되어, 그 결과 1MHz의 구동주파수에서의 자화회전에 의해 투자율이 최대로 되었음을 알 수가 있다.

Fig. 3(b)는 정자계 중에서 열처리에 의해 일축자기이방성을 가지게 된 박막의 스트레인 감도특성이다. 이 그림에서 변위량 0에서 $7\mu\text{m}$ 까지의 범위에서는 $1\mu\text{m}$ 당 약 110의 투자율변화를 보여주고 있다. 이 값은 등방성 자성막의 경우보다 약 13배로, 이축자기이방성을 유도함으로써 자성박막의 스트레인 감도를 높일 수 있음을 시사하고 있다. 이 결과에서 성능지수를 구해 보면, 0에서 4×10^{-6} 의 스트레인범위에서 약 1.2×10^5 의 값을 나타내었다. 이 값은 현재 사용하고 있는 스트레인 센서의 성능지수 (금속스트레인센서인 경우 약 2, 반도체스트레인센서인 경우 약 200)와 비교해 보면 매우 큰 값으로서, 본 연구에서 제작한 자왜박막이 스트레인에 대해 고감도특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

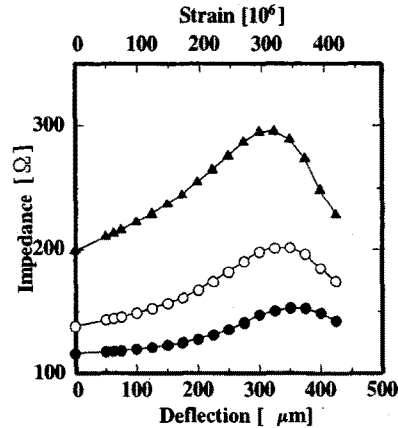
스트레인에 의한 자성박막의 투자율의 변화는 고주파에서의 표피효과에 의해 임피던스가 변화하게 되고, 이 변화에서 스트레인의 검출이 가능하므로 이들 박막시료를 전기소자로 사용하여 센서시스템을 구성할 수가 있을 것이다.

Fig. 4(a)는 1MHz에서 1GHz까지의 구동주파수에 있어서 박막패턴의 임피던스를 측정된 결과로서, 시료기판에 인가한 종단변위를 파라메타로 나타낸 것이다. 임피던스측정용 박막시료는 포토리소그라피법과 이온밀링법을 이용하여 길이 3mm, 폭 $100\mu\text{m}$, 7 turn의 미안터타입의 패턴으로 미소가공한 것이다. 이 결과에서 보면 박막의 표피효과가 나타나는 약 10MHz이상의 주파수영역에서 시료기판의 종단변위 혹은 스트레인에 의해 임피던스가 변화되고 있다. 이는 스트레인에 의해 박막의 실효적인 자기이방성이 변화하여 고주파에서의

표피효과에 의한 표피두께의 변화에 기인된 것으로 생각된다.



(a)



(b)

그림 4. 자성막 기판의 기계적 변형에 의한 FeCoSiB 박막의 임피던스의 변화

- (a) 주파수 의존성 (●: 변위가 없을 경우, ▲: $150\mu\text{m}$ 변위의 경우, ○: $300\mu\text{m}$ 변위의 경우)
- (b) 변위 의존성 (●: 50 MHz, ○: 100 MHz, ▲: 200 MHz)

Fig. 4. Impedance of a FeCoSiB film pattern by mechanical deformation of a substrate,

- (a) Frequency dependence (●: no deflected, ▲: $150\mu\text{m}$ deflected, ○: $300\mu\text{m}$ deflected)
- (b) Deflection dependence (●: 50 MHz, ○: 100 MHz, ▲: 200 MHz)

Fig. 4(b)는 구동주파수가 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz인 경우에 있어서 종단변위 혹은 스트레인에 대한 박막의 임피던스변화를 측정된 결과이다. 이 결과에서 본 연구에서 제작한 박막패턴은 임피던스의 변화에 의해 스트레인의 검출이 가능한 전기소자로서 동작하고 있음을 알 수 있다. 구동주파수 및 스트레인에 대한 임피던스의 변화에서 50 MHz에서는 32%, 100 MHz에서는 46%, 200 MHz에서는 45%의 변화율이 얻어졌다. 이 변화율에서 성능지수를 구해보면 50 MHz에서는 1700, 100 MHz에서는 1900, 200 MHz에서는 1800이었다.

이상의 결과에서 본 연구에서 제작한 박막소자는 투자율뿐만이 아니라 임피던스의 변화에서 스트레인을 검출할 경우에도 극히 민감한 특성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

아몰퍼스 FeCoSiB 고자왜박막에 기계적인 스트레인을 인가하고, 그 자기적 특성의 변화를 조사하였다. 자왜박막의 스트레인 검출능력을 나타내는 성능지수는 정자계에서 열처리를 실시하여 일축 자기이방성을 유도한 경우 10^5 의 값을 나타내, 본 연구에서 제작한 자왜박막이 극히 높은 스트레인 검출 능력을 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한 미세가공한 박막패턴에 스트레인을 인가한 경우, 구동주파수 50 MHz에서 32%, 100 MHz에서 46%, 200 MHz에서 45%의 변화율을 나타내어 박막소자의 임피던스 변화로 스트레인 측정이 가능한 전기소자로서 동작함을 알 수가 있었다. 스트레인의 인가에 의한 임피던스의 변화에서 구한 성능지수는 50 MHz에서 1700, 100 MHz에서 1900, 200 MHz에서 1800를 나타내었으며, 이 값은 현재 고감도의 스트레인 센서로 실용화되고 있는 반도체스트레인센서보다 약 10배 정도의 스트레인감도특성을 가지고 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제안한 자왜박막소자는 초고감도를 나타내는 스트레인센서를 구성하는 박막소자로서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] C. Modzelewski, H. T. Savage, L. T. Kabacoff, and A. E. Clark, "Magnetomechanical Coupling and Permeability in Transversely Annealed Metglas 2605 Alloys", IEEE Trans. Magn., Vol 17, pp. 2837-2839, 1981.
- [2] R. Shoji, H. Hare, and M. Wakamiya, "High Pressure Sensor Using Amorphous Magnetic Alloy", Technical Digest of the 8th Sensor Symposium., pp. 29-32, 1989.
- [3] M. Wun-Fogle, H. T. Savage, and A. E. Clark, Sensitive, "Wide Frequency Range Magnetostrictive Strain Gage", Sensors and Actuators., Vol. 12, pp. 323-331, 1987.
- [4] I. Taher, M. aslam, M. A. Tamor, T. J. Potter and R. C. Elder, "Piezoresistive Microsensors using p-type CVD Diamond Films", Sensors and Actuators., A45, pp. 35-43, 1994.
- [5] J.D.Livinston, "Magnetomechanical Properties of Amorphous Metals", Phys.Stat. Sol., (a) 70, pp. 591-596, 1982.

著 者 紹 介



신 광 호 (申 光 鎬)

1993년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1999년 9월 Tohoku대학(공학박사). 1999년 10월~ 현재까지 일본 厚生省 연구원. 주관심분야: 자성박막공학과 자기디바이스.

日本應用磁氣學會 학술장려상(武井賞)수상.



K.I. Arai(荒井 賢一)

1966년 Tohoku대학 전자공학과 졸업. 1971년 동 대학원 공학연구과(공학박사). 동년 동대학 전기통신연구소 助手. 1975년 동대학 조교수. 1986~ 현재 교수.

주관심분야 : 연자성재료 및 마이

크로 자기디바이스, 마이크로 센서·액츄에이터 등의 스피닉스 디바이스.



G. Sa-Gong(司空 鍵)

1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1973년 및 1996년 동 대학원(공학), 1986년 Golden State Univ.(USA) Ph.D, 1983~1985년 The Penn. State Univ., Mat. Res. Lab(Visiting Scientist), 1993

년 일본 동경공업대학(객원연구원), 1994년 The State Univ. of New Jersey(Visiting Scientist), 1997-1998년 Virginia Tech. (Visiting Professor) 1979~현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수

주관심분야: 압전세라믹/고분자 Composite Transducer, 압전 및 자기센서, 전자파흡수체