

고자왜막의 고주파임피던스에 미치는 스트레인의 영향

논문
13-1-8

Influence of Strain on the High Frequency Impedance of Highly Magnetostrictive Films

신광호*, 井上光輝**, 荒井賢一*, 사공건***

(K. H. Shin*, M. Inoue**, K. I. Arai* and G. Sa-Gong***)

Abstract

To make a practical application of a micro-strain sensors with ultrahigh sensitivity, a strain on electrical properties of micro-patterned amorphous $(Fe_{0.90}Co_{0.10})_{0.78}Si_{0.12}B_{0.10}$ films had influenced on the impedance over frequency range from 1 MHz to 1 GHz. Reflecting excellent magnetomechanical coupling properties of films, high frequency impedance was subject to change sensitively by a strain : a change in impedance of 39 % was observed at 200 MHz applied a strain of 224×10^{-6} . To determine a optimum shape of micro-patterned films, film impedance was analyzed by virtue of its constitutive components of resistance and reactance. Result was shown that reduction of the resistance term(hence increase of resultant reactance term) of impedance is more effective for enhancing the strain sensitivity of films at relatively low frequency range.

Key Words(중요용어) : Magnetostrictive films, Strain sensitivity, Skin effect, High frequency impedance

1. 서 론

최근 미세 가공한 철계 아몰퍼스 자성막의 고주파 임피던스가 스트레인에 대해 민감한 변화를 나타내고, 이 자성막이 고감도 센서를 구성하는 소자로서의 유용함이 증명되고 있다[1]. 철계 아몰퍼스 자성막은 고자왜특성과 연자성특성을 동시에 가지므로, 자기기계결합특성이 우수하다[2][3]. 따라서 스트레인이 인가되면 재료의 자기기계결합특성에 의해 투자율이 민감하게 변화하므로[4], 고주파 전류를 캐리어로서 흘릴 경우 고주파에서의 표피효과가 투자율에 의존하므로[5], 결국 스트레인에 의해 임피던스가 변화하게 된다[1]. 그러나 고주파 임피던스의 변화를 구동원리로 하는 센서소자의 경우, 재료가 가지고 있는 형상 및 전기 자기적특성을 최적화하여 센서의 고성능화를 실현하기 위해서는 임피던스의 실수부(저항)와 허수부(리액턴스)를 분리하여 고려할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 스파타링법에 의해 성막한 FeCoSiB 아몰퍼스막의 스트레인의 인가에 의한 전기적 특성을 1 MHz에서 1 GHz의 주파수영역에서 측정하였다. 그 때 저항과 인덕턴스의 스트레인 의존성을 조사하였고, 이들 성분에 미치는 스트레인의 영향에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 자성막재료로서 $(Fe_{0.90}Co_{0.10})_{0.78}Si_{0.12}B_{0.10}$ 의 조성을 가지는 아몰퍼스합금을 스파타링법에 의해 제작하여 사용하였다. 스파타링 타겟으로는 99.99at%의 순도를 가지는 $Fe_{0.72}Si_{0.14}B_{0.14}$ 합금 타겟(직경75cm, 두께4mm)위에 적정 수의 코발트칩(4mm×4mm, 두께1mm)을 배치한 복합타겟을 이용하였고, 압력 22mTorr의 아르곤분위기 중에서 성막하였다. 박막의 기판으로는 표면에 두께 1μm의 산화실리콘을 열산화법(thermal oxidation)으로 형성한 두께 0.2mm의 고저항 실리콘기판(저항율1000Ωcm이상)을 이용하였으며, 박막의 두께는 5μm로 하였다. 제작된 자성막을 5×10^{-6} Torr이하의 진공 중에서 350℃로 500Oe의 회전자계를 인가하면서 2시간, 정자계를 인가하면서 1시간 동안 열처리를 행하였다.

* : 東北大學 電氣通信研究所

** : 豊橋技術科學大學 電氣電子工學科

*** : 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

1999년 12월 6일 접수, 1999년 12월 17일 심사완료

이 때, 승온 속도는 200℃/hr로 하였고, 상온까지 자계를 인가하면서 진공로 내부에서 시료를 냉각시켰다. 열처리 후, 자성막을 photolithography법과 ion milling법을 이용하여 길이 3mm, 폭 100μm, 7턴의 meander형태의 미소 패턴으로 가공하였다. 자성막 미소 가공한 후, 다시 진공 중에서 350℃로 500Oe의 정자계를 패턴의 폭방향으로 인가하면서 1 시간동안 열처리를 행하였다.

자성막의 조성은 EPMA(electron probe microanalyzer)를 이용하여 측정하였고, XRD(X-ray diffraction)법을 이용하여 비정질구조인 것을 확인하였다. 자성막의 두께는 탐침식단차계를 이용하여 측정하였다.

자성막 패턴의 자구는 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 로렌즈력법[6]으로 측정하였다. 자성막의 포화자왜치(약 32×10^{-6})는 시료에 자계를 인가하면서 레이저광의 반사각도변화를 광센서를 이용하여 측정한 후 산출하였다[7]. 자성막 시료의 스트레인에 의한 전기적 특성변화를 측정하기 위하여 시료기판의 한쪽 끝을 고정하여 외팔보(cantilever)구조로 하고, 고정점으로부터 14mm 부분을 마이크로미터를 이용하여 미소변위시킴으로서 자성막에 스트레인을 인가하였다. 시료기판의 변형에 의해 자성막에 인가되는 스트레인 ϵ 은 식(1)의 관계를 이용하여 산출하였다[8].

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

여기서, h 는 시료기판의 두께, L 는 기판의 고정점으로부터 미소변위를 가한 지점까지의 거리, x 는 고정점에서 스트레인을 산출하는 지점까지의 거리, δ 는 미소 변위량을 나타낸다. 압축스트레인에 의한 자성막의 저항과 리액턴스를 Network Analyzer (HP8752A)를 이용하여 1 MHz에서 1 GHz의 주파수영역에서 측정하였다.

3. 실험결과

Fig. 1(a)와 (b)는 각각 미세 가공한 자성막 패턴의 사진과 자구의 관찰결과를 나타낸 것이다. Fig. (b)에서 '보면 자성막의 열처리 중 자계의 인가방향인 패턴의 폭방향임에도 불구하고 패턴의 자화가 길이방향으로 향하고 있음을 볼 수 있다. 이는 자성막의 자화가 열처리 중 자계인가방향으로 유도되지 않은 것은 박막의 포화자왜(약1.5T)가 크므로 열처리 중 발생하는 인가자계에 대한 반자계가 크고, 또한 재료자체의 유도자기이방성이 작은 것에 기인된 것으로 생

각된다. 이 결과에서 자성막 패턴의 임피던스는 압축스트레인에 의해 자화의 회전이 일어나므로 민감하게 변화될 것으로 예상할 수 있다.

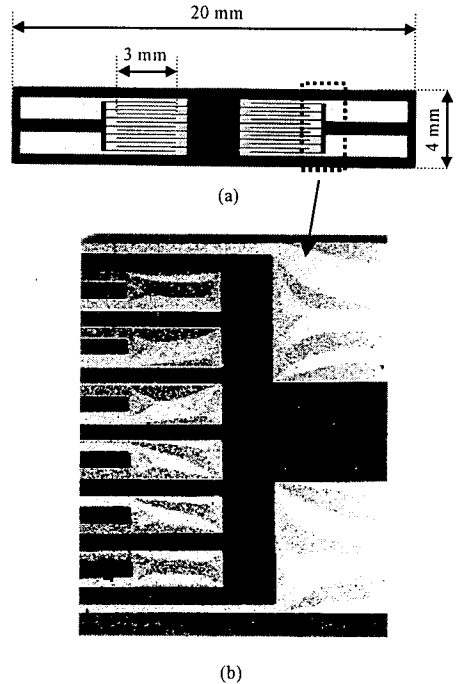


그림 1. (a) 스트레인에 의한 임피던스 측정을 위한 Meander형태의 필름 (b) 표면 분역구조의 SEM사진

Fig. 1. (a) Meander pattern of a film for measuring the impedance change due to strain, and (b) Surface domain structure of a pattern, taken by a scanning electron microscope

Fig. 2는 제작한 자성막 패턴에 있어서 압축스트레인의 인가에 대한 임피던스의 변화를 나타낸 것이다. 스트레인 인가에 의한 임피던스의 변화($\Delta Z/Z_0 = (|Z_s| - |Z_0|)/|Z_0|$; 여기서 Z_0 와 Z_s 는 각각 스트레인을 인가하지 않은 경우의 임피던스와 스트레인을 인가한 경우의 임피던스를 나타낸 것이다)는 스트레인 $\epsilon = 224 \times 10^{-6}$ 에 의해 50 MHz의 구동주파수에서 25%, 100 MHz의 구동주파수에서 37%, 그리고 200 MHz의 구동주파수에서 39%가 얻어졌다. 이 결과에서 구동주파수가 50 MHz인 경우 201×10^{-6} 에서 224×10^{-6} 의 영역에서 구한 스트레인 검출 성능지수

$F=[(\Delta Z/|Z_0|)/e]$ 는 1890이었고, 100MHz의 구동주파수의 경우 177×10^{-6} 에서 201×10^{-6} 의 영역에서 구한 F의 값은 1980이었으며, 153×10^{-6} 에서 177×10^{-6} 의 영역에서 200 MHz의 구동주파수에 의해 구한 F의 값은 1760이 얻어졌다. 이들 결과는 현재 고감도 스트레인센서로서 사용되고 있는 반도체 스트레인센서의 성능지수($F \approx 200$) [9]와 비교해 보면 약 10배 정도 큰 값이다. 따라서 본 연구에서 제작한 자성막 패턴이 스트레인에 대해 극히 민감한 검출특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

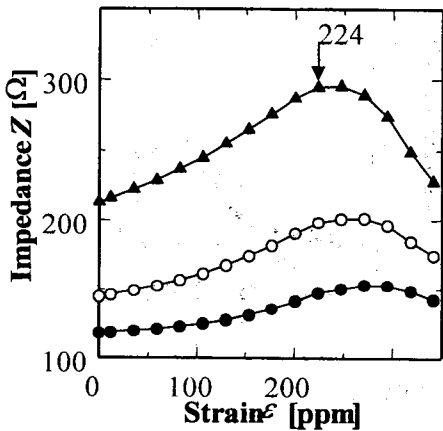


그림 2. 각종 구동 주파수에 따른 필름의 임피던스 [주파수 $f=50$ MHz(●), 100 MHz(○), 200 MHz(▲)]

Fig. 2. Impedance of a film pattern as a function of strain at different driving frequencies of $f=50$ MHz(●), 100 MHz(○), and 200 MHz(▲).

자성막패턴의 임피던스 변화는 자성체에 있어서 구동주파에서 일어나는 도체의 표피효과[5]가 도체의 투자율에 의존함으로써 발생된 것으로 생각된다. 자성막 패턴이 자왜를 가진 경우에는 역자왜현상에 의해 스트레인의 인가에 의해 투자율이 변화하므로 [4] 결국 고주파임피던스는 스트레인에 의존하게 된다. 또한 임피던스는 복소량이므로 실수부인 저항성분과 허수부인 리액턴스 $X=2\pi fL$ (여기서, L 는 인덕턴스)로 이루어져 있으므로 이들 성분의 변화는 임피던스를 변화하게 한다.

Fig. 3은 자성막 패턴에 200×10^{-6} 의 스트레인 인가에 따른 전기적특성의 변화를 나타낸 것이다. 자성막이 연자성(고투자율)이므로 인덕턴스의 변화가

크게 나타나고 있다. 그림에서 1 MHz의 구동주파수에서 스트레인에 의한 인덕턴스의 변화를 보면 130 nH에서 408 nH까지의 변화를 나타내고 있다. 이 인덕턴스 값에는 비자성체인 리드선(bonding wire)의 인덕턴스(약 60 nH)가 포함되어 있으므로 자성막의 실질적인 인덕턴스의 변화는 70 nH에서 348 nH까지 변화하게 되므로 측정결과치보다 더 크게 변화하고 있다. 이 결과에서 인덕턴스의 변화율을 고려하면 약 390%임을 알 수 있다.

Fig. 3(d)는 리액턴스 $X(f)=2\pi fL(f)$ 의 변화를 나타내고 있는데, 이 결과를 보면 비교적 낮은 구동주파수(약 90 MHz이하)에서는 인덕턴스의 변화율이 크므로 리액턴스의 절대치가 작음에도 불구하고 임피던스의 변화율이 크게 기여하고 있다. 또한, 구동주파수가 증가함(약 90 MHz이상)에 따라 저항의 변화율이 증가하게 되고 저항변화를 자체가 임피던스 변화율에 크게 기여하고 있다. 그러나, Fig. 3(a)에 나타난 임피던스변화의 주파수특성은 Fig. 3(b)에 나타난 저항변화의 주파수특성과 Fig. 3(d)에 나타난 리액턴스변화의 주파수특성을 합성한 형태로 되고 있다. 이들에 대한 내용은 Fig. 4에서 나타난 주파수의 함수로 나타난 200×10^{-6} 의 스트레인인가에 의한 임피던스, 저항, 리액턴스변화에서 명백하게 알 수 있다. 즉, 구동주파수가 $f < 90$ MHz인 경우에는 자성막의 높은 L (혹은 $\Delta L/|Z_0|$)로 인하여 $\Delta X/|Z_0|$ 가 $\Delta R/|Z_0|$ 보다 크다. 따라서, 이 주파수 영역에서는 주파수변화에 따른 리액턴스(혹은 인덕턴스)성분이 저항성분보다 크게 기여한다. 반면, 구동주파수가 $f > 90$ MHz인 경우에는 $\Delta R/|Z_0|$ 가 $\Delta X/|Z_0|$ 보다 크므로 이 주파수 영역에서는 주파수변화에 따른 저항성분이 리액턴스(혹은 인덕턴스)성분보다 크게 기여한다. 이 결과로 주파수가 높아짐에 따라서 $\Delta X/|Z_0|$ 이 단조롭게 감소하여 약 300 MHz 이상의 구동주파수에서부터 변화율이 음으로 되고 있다. 이 현상은 스트레인을 인가한 상태의 자성막의 투자율이 스트레인을 인가하지 않은 경우보다 높으므로 자속투과의 표피효과가 비교적 낮은 주파수에서 일어나므로, 스트레인을 인가하지 않은 경우보다 낮은 주파수에서 투자율의 감소가 일어나기 때문이다.

위의 실험결과로부터 비교적 높은 주파수영역에서는 저항성분이 임피던스변화에 크게 기여하고, 비교적 낮은 주파수에서는 리액턴스(혹은 인덕턴스)성분이 임피던스변화에 크게 기여함을 알 수 있다. 따라서, 센서 응용을 위해 센서동작을 최적화하기 위해서는 구동회로의 동작주파수와 특성에 따라 센서소자의 특성을 충분히 고려한 설계가 이루어져야 할 것이다.

고자외막의 고주파임피던스에 미치는 스트레인의 영향.....신광호, 井上光輝, 荒井賢一, 사공건

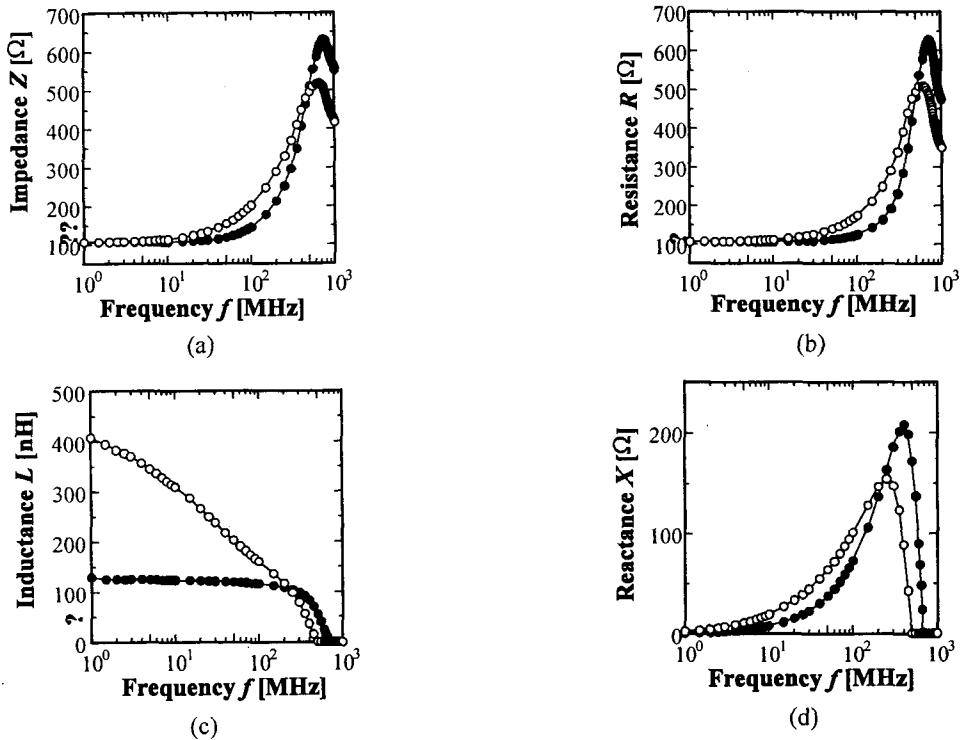


그림 3. 주파수에 따른 (a) 임피던스 (b) 저항 (c) 인덕턴스 (d) 리액턴스
[스트레인이 없을 경우 (\bullet) 및 271 ppm (\circ)의 경우]

Fig. 3. (a) Impedance, (b) Resistance, (c) Inductance, (d) Reactance of a film as a function of frequency, in which the strain ϵ applied in film is taken as a parameter $\epsilon=0$ (\bullet) and 271 ppm (\circ).

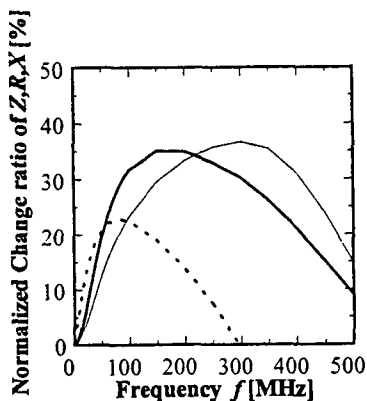


그림 4. 주파수에 따른 임피던스 (—), 저항(—) 및 리액턴스(---)의 변화비
[스트레인이 없을 경우와 200ppm인가된 값의 차이를 인가되지 않았을 경우의 임피던스의 값 Z 로 규격화한 것]

Fig. 4. Normalized change ratio of the Impedance (—) and Resistance (—), Reactance (---) as a function of frequency, in which the change ratio is taken by difference between no strained and 200 ppm, and normalized by Z in no strain.

4. 결 론

미세 패터닝한 아몰퍼스 FeCoSiB 자성막의 스트레인 인가에 따른 전기적 특성변화에 대한 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

제작한 아몰퍼스 FeCoSiB 자성막이 스트레인에 의해 민감하게 변화하므로 고감도의 스트레인 센서를 구성하는 재료로서 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 100 MHz의 구동주파수에서는 224×10^6 의 스트레인 인가에 의해 37 %의 변화를 나타내었고, 이 결과에서 구한 스트레인 검출 성능지수는 201×10^6 에서 224×10^6 의 영역에서 1980의 값이 얻어졌다. 이 결과는 현재 고감도 스트레인센서로서 사용되고 있는 반도체 스트레인센서의 성능지수보다 약 10배 정도 큰 값으로서, 본 연구에서 제작한 자성막 패턴이 스트레인에 대해 극히 민감한 검출특성을 가지고 있음을 알 수가 있었다.

또한 자성막 패턴의 임피던스의 복소량 변화에서는 비교적 높은 주파수영역에서는 저항성분이 임피던스변화에 크게 기여하였고, 비교적 낮은 주파수에서는 리액턴스(혹은 인덕턴스)성분이 임피던스변화에 크게 기여함을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제작한 자성막을 센서소자로 응용하기 위해서는 임피던스의 실수부와 허수부, 즉 저항성분과 리액턴스성분을 충분히 고려한 형상설계가 이루어져야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, "Strain Sensitivity of Highly Magnetostrictive Amorphous Films for Use in Microstrain Sensors", *J. Appl. Phys.*, Vol. 85, pp. 5465-5467, 1999.
- [2] C. Modqelewski, 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.
- [3] K. I. Arai, N. Tsuya, M. Yamada, and T. Masumoto, "Giant ΔE Effect and Magnetomechanical Coupling Factor in Amorphous $Fe_{80}P_{13}C_7$ Ribbons", *IEEE Trans. Magn.*, MAG-12, pp. 936-938, 1976.
- [4] K. H. Shin, M. Inoue, and K. Arai, "Highly Sensitive Strain Sensors with FeCoSiB Amorphous Films", *J. Magnetics Society of Japan.*, Vol. 23, No. 4-2, pp. 1425-1428, 1999.
- [5] L. D. Landau and E. M. Lifschitz, "Electrodynamics of Continuous Media", Pergamon, New York, pp. 199-224, 1984.
- [6] A. Hubert and R. Schafer, "Magnetic domains", Springer, pp. 69-73, 1998.
- [7] A. C. Tam and H. Schroeder, "A New High-Precision Optical Technique to Measure Magnetostriction of a Thin Magnetic Film Deposited on a Substrate", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 25, pp. 2629-2638, 1989.
- [8] 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.
- [9] 神田洋三, "壓力센서", *應用物理(日本)*, Vol. 54, pp. 47-48, 1985.
- [10] C. S. Smith, "Piezoresistance Effect in Germanium and Sillicon", *Physical Review.*, Vol. 94, pp. 42-49, 1954.