

## 박막의 자왜 및 영율 측정

이용호 · 신용돌 · 허복희 · 이금휘

전북대학교 물리학과

전주시 덕진구 덕진동 664-14, 506-756

김희중 · 한석희 · 강일구

한국과학기술연구원 자성합금연구실

서울특별시 성북구 하월곡동, 136-791

이장로

숙명여자대학교 물리학과

서울특별시 용산구 청파동, 140-742

(1994년 3월 24일 받음, 1994년 6월 7일 최종수정본 받음)

박막의 자왜와 그 측정에 연관되는 기판과 박막의 영율 및 자장 중에서 자성체의 영율이 변화하는  $\Delta E$  효과 등을 하나의 장치로 측정하는 방법을 연구하였다. 박막이 증착된 기판을 평면 전극위에 나란하게 외팔보가 되게 지지하면, 전기용량이 형성되고, 그 용량은 시료자체의 무게, 인가된 자장 및 전기장에 의한 굴곡으로 미소 변화하며 그것을 미소용량 브리지로 검출하여 역학적 계산으로 박막과 기판의 영율과 자왜 및  $\Delta E$  효과를 측정하여 그 결과에 대하여 고찰하였다.

### I. 서 론

지금까지 자성박막의 자왜측정에 관하여 수평의 연구 보고[1~5]가 있었으나 아직도 분명치 않는 점이 남아 있다. 박막의 자왜측정은 박막을 기판에서 분리할수 없기 때문에 자장중에서의 시료의 굴곡을 광학적 [3, 4] 또는 미소용량변화[1, 2] 등으로 검출하여 역학적 계산으로 산출하였다. 이때 기판의 기하학적 형상과 영율 및 박막의 영율 등을 정확하게 알아야 하는데 종전의 문헌에서는 시료 자체의 값이 아니라 각 물질의 기존의 bulk 값을 사용하였으며, 자장중에서의 박막의 영율의 증가 즉  $\Delta E$  효과에 대한 고려도 없었다. 그 시료 자신의 박막과 영율을 분리하여 측정하는 방법 [6]이 고안되었으나 이에는 특수 장치가 필요하였다. 그리고 박막자왜의 계산식속의 Poisson비에 관한 교정항도 저자에 따라 각각 상이하였다 [1~4]. 본 보고에서는 이상의 문제를 해결하며 또 하나의 장치로 영율과 자왜 및  $\Delta E$  효과를 다 측정할수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

### II. 장치의 구성과 측정원리

#### 1. 장치의 구성

본 장치의 구성은 Fig. 1과 같다. 유리기판(두께  $a_s$ ,

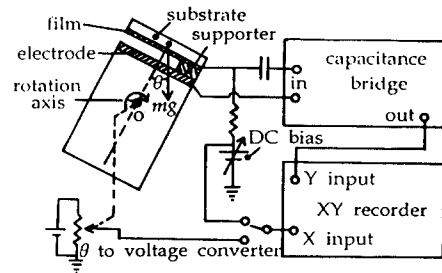


Fig. 1 Block diagram of the measuring system.

폭  $b$ , 길이  $l_0$  질량  $m_s$ , 영율  $E_s$ ) 위에 자성박막(두께  $a_f$ , 영율  $E_f$ )을 증착한 시료를 평면 전극위에 간격  $x_0$ 로 나란하게 외팔보가 되게 지지하면 전기용량  $C_0$  ( $C_0 = \epsilon_0 b l_0 / x_0$ )가 형성된다. 원통으로 된 시료 홀더의 시료면을 수평면에 대하여  $\theta$  각도로 회전하게 하면 시료 자체에 작용하는 중력의 성분  $(m_s + m_f) g \cos \theta$ 는 시료를 평면 전극 쪽으로 굽히며 용량이 미소변화하여 시료의 자유단이  $\delta_C$  만큼 편향한다. 또 직류바이어스 전압  $V$ 를 시료에 가할때도 전기력에 의하여 시료가 굴곡되어 자유단이  $\delta_E$  만큼 미소 편향하고 자장을 시료면에 나란하게 가하여도 박막의 자왜에 의하여 자유단의 편향  $\delta_M$ 가 생긴다. 이  $\delta_C$ ,  $\delta_E$ ,  $\delta_M$  등이 전극간의 간격  $x_0$ 에 비교하여 매우 작으면

미소용량 브리지의 애너로그 출력 전압은 편향에 비례하므로 XY 기록계에  $\delta_G$  대  $\theta$ ,  $\delta_E$  대 전기장  $E$ ,  $\delta_M$  대 자기장  $\mu_0 H$  등의 관계가 기록된다. 이 자료를 써서 다음의 계산식으로 박막의 자왜와 영울등을 구할수 있다.

### 2. 편향량의 계산

자체 무게에 의한 편향의 계산식은

$$\delta_G = \frac{3}{2} \cdot \frac{mg}{b} \cdot \left(\frac{l_0}{a_s}\right)^3 \left[ E_s \cdot \left(1 + 3 \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{a_f}{a_s}\right) \right]^{-1} \cos \theta \quad (1)$$

과 같다[7]. 이 식의 중력의 성분  $mg \cos \theta$  대신 전기장  $E$  에 의한 측정기의 양극판 간의 전기인력  $(1/2) \epsilon_0 E^2 b l$  ( $l$ 은  $l_0$ 의 일부로서 전기적 유효길이,  $E = V/x_0$  로서  $V$ 는 직류 바이어스 전압)을 (1)식에 대입하면 전기력에 의한 편향  $\delta_E$  를 구할수 있다.

$$\delta_E = \frac{3}{4} \epsilon_0 E^2 a_s \left(\frac{l_0}{a_s}\right)^3 \left[ E_s \cdot \left(1 + 3 \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{a_f}{a_s}\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

이때  $\delta_E \ll x_0$  의 조건이 필요하다. 그리고 자왜를 측정하기 위하여 시료를 자장속에 둘때의 편향  $\delta_M$  은

$$\delta_M = 3 \cdot \frac{\rho a_f E_f}{a_s^2 E_s} \cdot \frac{\lambda}{\eta} \quad (3)$$

이 된다[3]. 여기서  $\eta$ 의 값은 종전의 문헌에서는 저자에 따라  $(1 + \nu_f) / (1 - \nu_s)$  [1, 3] 또는  $(1 + \nu_f) / (1 - \nu_s^2)$  [2] 또는 1 [4] 등 다양하다. 여기서  $\lambda$ 는 시료의 자왜,  $\nu_s$ 와  $\nu_f$ 는 각각 기판과 박막의 Poisson비이다. 또  $\nu_s$ 와  $\nu_f$ 에 관한 명확한 값은 거의 발표되지 않고 있다 [1-4].

## III. 실험 및 고찰

### 1. 시료의 제작 및 용량 브리지

Ni, Ni<sub>53</sub>Fe<sub>47</sub>, Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>의 박막을 고주파 스퍼터링 또는 열진공증착으로 현미경의 카버그래스에 증착하였다. 시료의 제원을 Table I에 표시한다.

본 실험에 사용한 용량 브리지는 transformer-ratio-armbridge로서 분해능은 10<sup>-5</sup> pF, 최대 측정용량 30 pF이며 자작하였다.

### 2. 기판의 영울 측정

자체 무게에 의한 편향  $\delta_G$ 와 시료의 회전각도  $\theta$  사이의

Ni<sub>53</sub>Fe<sub>47</sub> 시료에 대한 실험 결과는 Fig. 2와 같다.  $\delta_G$ 는  $\theta$ 의 여현함수가 되어 식(1)의 결과와 일치하고 있다. Fig. 2의 진폭의 실험치  $V_G$ 와 식(1)을 써서 기판의 영울을 계산한 결과는 Table II와 같다. 진폭  $V_G$ 의 값을 0.02 pF에 해당하는 교정용 축전기를 시료의 전기용량  $C_0$ 에 가하였을때의 진폭의 변화  $V_{cal}$  (Fig. 2 속의 직각과)와 비교함으로써  $\delta_G$ 가 얻어진다.

Table I. Sample parameters

sample	substrate		film		total mass
	width $b$ (mm)	length $l_0$ (mm)	thickness $a_f$ ( $\mu$ m)	Young's Mod. $E_f$ (GPa)	$m = (m_s + m_f)$ (mg)
Ni	7.0	18	0.75	192	46.4
Ni <sub>53</sub> Fe <sub>47</sub>	7.0	17.5	1.0	213	47.0
Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>	5.3	15.5	1.0	210	32.7

All thickness of the substrates are the same as 0.15 mm.  $E_f$  is measured by the mechanical resonance method [6]

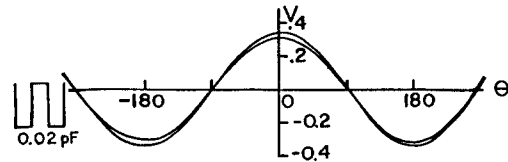


Fig. 2. The gravitational deflection  $\delta_G$  as the function of the rotation angle  $\theta$  of Ni<sub>53</sub>Fe<sub>47</sub> sample.

Table II. Young's moduli of the substrates

film	$C_0$ (pF)	$x_0$ ( $\mu$ m)	$V_G$ (mV)	$V_{cal}$ (mV)	$\delta_G$ ( $\mu$ m)	$E_s$ (GPa)
Ni	7.10	148	670	255	2.19	78.2
Ni <sub>53</sub> Fe <sub>47</sub>	4.94	208	286	244	1.96	79.2
Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub>	4.60	147	335	275	1.56	60.2

$V_G$  and  $V_{cal}$ : output of the capacitance bridge due to selfweight and calibration with 0.02 pF of equivalent capacitance adding. For other parameters see the text.

### 3. 전기장에 의한 편향 $\delta_E$ 및 $\Delta E$ 효과

직류 바이어스 전압  $V$ 로 생긴 시료 속의 전기장에 의한 편향  $\delta_E$ 의  $V$ 에 대한 함수 관계는 Fig. 3과 같다. 용량브리지의 출력  $V_E$ 는  $\delta_E$ 에 비례하며 또 그것은 바이어스 전압  $V$ 의 자승에 비례하고 있다. 이것은 식(2)의 결과와 일치한다.  $\Delta E$  효과는 자장을 가하지 않을때의  $\delta_E$

의 값  $\delta_E(0)$ 와 자장  $H$ 를 가할때의 값  $\delta_E(H)$ 에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon \equiv \frac{E_f(H) - E_f(0)}{E_f(0)} = \frac{\delta_E(0) - \delta_E(H)}{\delta_E(H)} \left( \frac{a_s E_s}{3a_f E_f} + 1 \right) \quad (4)$$

실험결과를 요약하면 Table III 을 얻는다.

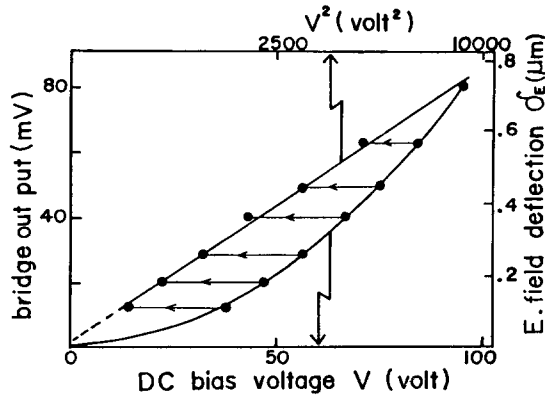


Fig. 3. The electrical deflection  $\delta_E$  as the function of the applied voltage  $V$  of  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  sample.

Table III. effect and related parameters

film	$\delta_E(0)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta_E(H)$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_f$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_s$ (GPa)	$E_f$ (GPa)	$\epsilon$ (%)
Ni	0.977	0.962	0.75	78.2	192	43
$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$	0.460	0.452	1.0	79.1	213	34
$\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$	0.723	0.718	1.0	60.2	210	10

$\delta_E(0)$  : deflection under electric field and no magnetic field,  $\delta_E(H)$  : deflection under electric and magnetic field. All applied bias voltage is 92 V.

#### 4. 자왜의 측정

자왜측정의 한계로서 Ni 및  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  박막시료의 자장속에서의 편향  $\delta_M$ 의 자장  $\mu_0 H$  및 시료의 방향각  $\theta$ 의존성을 Fig. 4 및 5에 표시한다. 각 곡선의 peak to peak 값  $\Delta\delta_M$ 은  $\delta_M(\theta=0^\circ) - \delta_M(\theta=90^\circ)$ 와 같다.  $\Delta\delta_M$ 을 자장  $\mu_0 H$ 에 대하여 다시 그리면 Fig. 6이 되고, 포화영역의 직선을 외삽하여  $H=0$ 에서의  $\Delta\delta_M$ 의 값 즉  $\Delta\delta_M(H=0)$ 을 구하면 포화자왜  $\lambda_s$ 는

$$\lambda_s = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{E_s}{E_f} \cdot \frac{\Delta\delta_M(H=0)}{a_f} \cdot \left( \frac{a_s}{l} \right)^2 \eta \quad (5)$$

에 의하여 계산된다. 각 시료의  $\lambda_s$ 를 계산한 결과를 Table IV에 표시한다.

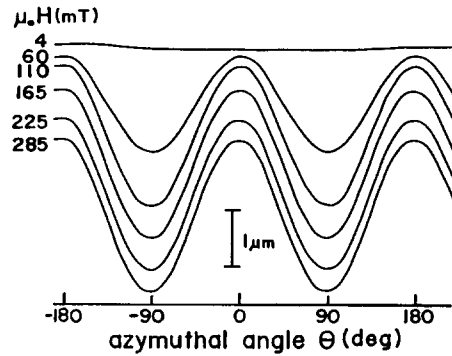


Fig. 4. The magnetical deflection  $\delta_M$  as the functions of the applied field  $\mu_0 H$  and azimuthal angle  $\theta$  of Ni sample

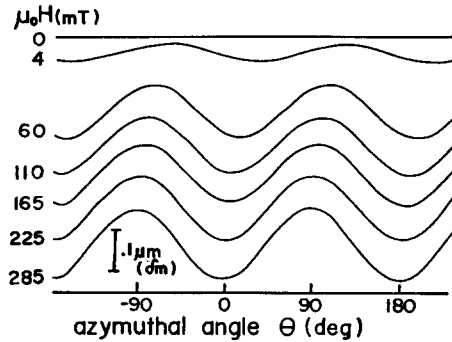


Fig. 5. The magnetical deflection  $\delta_M$  as the function of the applied field  $\mu_0 H$  and azimuthal angle  $\theta$  of  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  sample

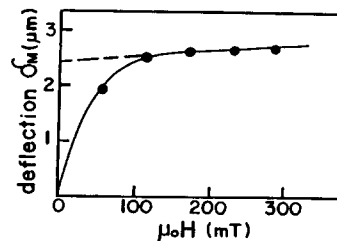


Fig. 6. Replotted graph of Fig. 4 to calculate the magnetostriction of Ni sample

Table IV. Magnetostriction data

film	$\Delta\delta_w(H=0)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_s(10^{-6})$			Bozorth [9]
		$\eta=1$	$\eta=(1+v_i)/(1-v_s)$	$\eta=(\epsilon+1)$	
Ni	2.43	18.6	31.3	26.6	25.5(Ni <sub>92</sub> Fe <sub>8</sub> )
Ni <sub>93</sub> Fe <sub>7</sub>	1.80	16.4	27.6	22.0	25.0(Ni <sub>91</sub> Fe <sub>9</sub> ) (Ni <sub>91.5</sub> Fe <sub>8.5</sub> )
Ni <sub>94</sub> Fe <sub>6</sub>	0.13	0.81	1.36	0.89	2.5(Ni <sub>93.4</sub> Fe <sub>6.6</sub> )

$v_s = 0.24$ ,  $v_i = 0.28$  [8], then  $\eta = (1+v_i)/(1-v_s) = 1.68$

이 결과에서 보면  $\eta = 1$ 로 하면  $\lambda_s$ 의 값은 기존 문헌의 값보다 상당히 작아지고  $\eta = (1+v_i)/(1-v_s)$ 로 하면 문헌보다 약간 커지며  $\Delta E$  효과의 실험치  $\epsilon$ 에 의하여 박막의 영율이 자장인가시 ( $\epsilon + 1$ )  $E_f$ 가 되었다고 가정하면 약간 적은 값을 얻는다.

#### IV. 결 론

한 장치에 의하여 박막의 자왜측정에 필요한 기관 및 시료의 영율과 자왜를 측정하는 방법이 완성되었으며 자왜가 거의 0인 퍼머로이 박막도 충분한 정밀도로 측정되었다.

자왜측정의 분해능은  $10^{-7}$  이상이며 Poisson 비에 의한 교정인자의 문제도 밝혀졌다.

그러나  $\Delta E$  효과는 bulk 시료의 값보다 매우 커져서 그 기구에 관하여는 앞으로의 연구가 남아있다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부의 기초과학 지원연구사업 BSRI 93-213과 과학기술처의 특정연구사업의 지원을 받았다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. Kloholm, IEEE Trans. Magn. **MAG-12**, pp. 819-821, September 1976.
- [2] D. W. Forester, C. Vittoria, J. Schelleng and P. Lubitz, J. Appl. Phys. **49**, pp. 1966-1968, March 1978.
- [3] A. C. Tan and H. Schroeder, J. Appl. Phys. **64**, pp. 5422-5424, November 1988.
- [4] M. Kaneko, S. Hashimoto, M. Hayakawa and K. Aso, J. Phys. E : Sci. Instrum. **21**, pp. 487-489, 1988.
- [5] K. I. Arai, M. Yamaguchi and C. S. Muranaka, IEEE Trans. Magn. **MAG-25**, pp. 4201-4203, September 1989
- [6] 이용호, 신용돌, 이장로, 응용물리 6, pp. 290-293 (1993)
- [7] 한국물리학회, 응용물리 (1994. 7월호)에 게재 확정
- [8] Y. Fukumoto, General Physics Experiment (일본문) p 255 (Riko Publishing Co. Tokyo, 1951)
- [9] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, D. Van Nostrand Co, London (1968) p. 667

## Thin Film Magnetostriction and Young's Modulus Measurement

Y. H. Lee, Y. D. Shin, P. H. Herr and K. H. Lee

*Dept. of Physics, Jeonbuk National University, Jeonju 560-756 Korea*

H. J. Kim, S. H. Han and I. K. Kang

*Magnetic Alloys Lab. Korean Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791 Korea*

J. R. Rhee

*Dept. of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742 Korea*

(Received 24 March 1994, in final form 7 June 1994)

Abstract—This paper reports a method measuring magnetostriction, Young's moduli of a substrate and film and  $\Delta E$ -effect with one apparatus. A substrate deposited with a thin magnetic film is parallelly cantilevered parallel to a metal plate electrode, forming a capacitive cell. The cantilever deflects due to own weight, applied electric and magnetic field. The small change of the capacitance caused by this deflection is measured by a sensitive capacitance bridge. Young's modulus, magnetostriction and  $\Delta E$  effect can be calculated by theoretical analysis with the weight, applied field and deflection data.