

Cu/ Ni/ Cu 단결정 박막에서의 자기 탄성 계수

송오성 · R. C. O'Handley

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139

(1995년 2월 27일 받음, 1995년 4월 20일 최종수정본 받음)

단결정 Cu/Ni/Cu 박막의 자기탄성계수(magnetoelastic coupling coefficients)를 자성박막의 두께에 따른 효과이방성에너지(effective anisotropy energy)를 측정하여 현상학적인 이론 모델로 구하는 방법을 제안하였다. 이러한 간접적인 방법으로 자기탄성계수를 결정하는 방법은 다른 결정정계에서도 가능하다.

I. 서 론

근래의 소형화된 자기응용기기는 박막을 많이 사용한다. 박막자기헤드나 자기저항헤드는 점점 얇아지는 추세이며(40 nm), 복잡한 제조공정에 따른 잔류응력이 자성에 영향을 미친다. 응력과 자성과의 영향을 나타내는 자기탄성계수(magnetoelastic coupling coefficients)와 자기변형계수(magnetostriction coefficients)는 단결정에서 잘 알려져 있지만 박막에서의 이들의 변화는 많이 연구되지 않았다. 최근 다결정 박막에서의 자기탄성계수는 $B^{eff} = B^{bulk} + B^s/t$ 로 주어진다고 보고되었다[1]. 여기의 t 는 박막의 두께이다. 즉, 자기박막의 효과자기탄성계수(B^{eff})는 두꺼운 벌크시편의 자기탄성계수(B^{bulk})와 박막 두께에 반비례하는 표면자기탄성계수(B^s)의 합으로 주어진다. 박막에서의 효과 이방성 에너지(effective anisotropy energy, K^{ef})가 $K^{ef} = K^{bulk} + K^s/t$ 로 주어지는 것은 널리 알려져 있는데 이중 자기탄성이방성에너지(magnetoelastic anisotropy energy)도 같은 성질을 갖는다고 예상되고 있다[2]. 입방정계 단결정에서는 자기탄성이방성에너지가 식(1)로 주어진다.

$$f_{me} = B_1(e_{11}\alpha_1^2 + e_{22}\alpha_2^2 + e_{33}\alpha_3^2) + B_2(e_{12}\alpha_1\alpha_2 + e_{23}\alpha_2\alpha_3 + e_{31}\alpha_3\alpha_1) \quad (1)$$

즉 B_1 , B_2 2개의 자기탄성계수가 필요하다. B_1 은 주스트레인(principle strain)과 관계있고 B_2 는 전단 스트레인(shear strain)과 관계있는 항이다. B_1 과 B_2 는 큰 시편인 경우 X-선으로 격자간격을 측정하든지 스트레인 게이지로 자기장에 따른 시편크기의 변화를 측정하여 구하였으나 박막에서는 현실적으로 적합하지 않다. 일정한 탄성영역의 외부스트레인을 가하여 자화(M)의 변화를 측정하여 보는 방법도 큰 격자불일치 스트레인(2.6%)의

존재로 적당하지 못하다. 따라서 본 연구에서는 단결정 박막에서의 박막두께에 따라 이방성 에너지를 측정함으로써 간접적으로 자기 탄성계수를 결정하는 방법을 제안한다.

II. 자기탄성계수의 결정

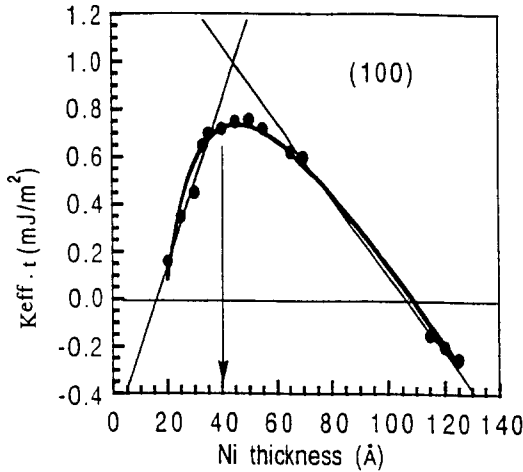
박막시편은 주로 시편진동자기측정기(Vibrating Sample Magnetometer, VSM) 등을 통해서 비교적 쉽게 이방성 에너지를 측정할 수 있다. 만약 이러한 이방성 에너지를 각 시편의 두께에 따라 측정하였다면 각 두께에서의 이방성 에너지(f^{total})는 식(2)로 주어진다. 즉, 자기모양에너지(magnetoshape anisotropy)와 자기탄성에너지(magnetoelastic anisotropy)의 합으로 표현된다.

$$f^{total} = f^{MS} + f^{Neel} + f^{ME} = K^{eff} \sin^2\theta \quad (2)$$

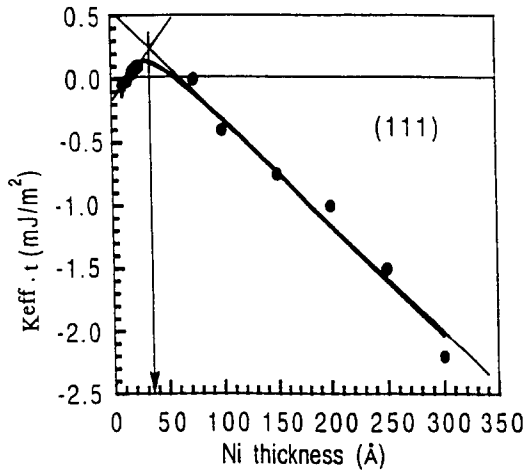
Cu/Ni/Cu계에서는 자기모양에너지는 $2\pi Ms^2 = 1.3 \times 10^5 J/m^2$, Néel 표면에너지 계수($K_N = 1.0 \times 10^5 J/m^2$)와 Néel 표면이방성에너지는 K_N/t 로 주어지고, 자기탄성에너지는 $2 \cdot B \cdot e = 1.2 \times 10^5 J/m^2$ 정도이다. Ni의 자기결정에너지(magnetocrystalline anisotropy, K_u)는 $K_u = 4.5 \times 10^3 J/m^3$ 정도로 다른 이방성에너지에 비해 매우 작으므로 고려하지 않는다.

식(2)의 의미에 의하면, 만약 각 이방성에너지를 고려하고 $K^{eff} \cdot t$ 와 t 를 그려보면 스트레인이 일정하다면 $K^{eff} \cdot t$ 와 t 는 선형적인 관계를 갖고 이들의 기울기와 y 축절편에서 Néel 표면이방성에너지(K_N)와 자기탄성계수(B)를 결정할 수 있게 된다. 포화자화(Saturation Magnetization, Ms)는 실온에서 2 nm 이전까지 큰 변화가 없는 것으로 보고되고 있으므로 상수로 생각한다[2]. 최근

Jungblut[3] 등은 Cu/Ni/Cu(100)과 Cu/Ni/Cu(111)계의 이방성에너지와 박막두께의 관계를 보고하였다. 그들의 결과는 Fig. (1)의 점들이다. 식(2)에 따라 위에서 예측한대로 격자불일치 스트레인이 일정한 경우(격자불일치 임계두께 이상)의 선형적인 영역에서 K_N 과 B 를 결정할 수 있음을 주장하고 있다. 즉 Cu/Ni/Cu(100)과 Cu/Ni/Cu(111)의 데이터에서 $K^{eff} \cdot t$ 와 t 의 그래프의 기울기와 y-축 절편에서 K_N 과 B_1, B_2 를 결정한다.



(a) Cu/Ni(100)/Cu



(b) Cu/Ni(111)/Cu

Fig. 1. Plot of $K^{eff} \cdot t$ with Ni thickness. Data from Jungblut et al[3]. Thick solid lines represent curve fits by Eq. (4).

그러나 최근 밝혀진 바와 같이, 자기탄성에너지는 $B^{eff} = B^{bulk} + B^{surf}/t$ 의 박막두께(t)에 반비례하는 표면자기탄성계수(B^{surf})를 갖는 것으로 예측되고[2], Cu/Ni/Cu계의 격자불일치 스트레인은 임계두께(t_c) 이상에서는 식(3)의 관계로 예상된다[5].

$$e_o = \eta \frac{t_c}{t} \quad (3)$$

여기서 η 는 격자불일치 스트레인이 Ni/Cu(100)계에서는 2.6%이다. 식(3)의 격자불일치 스트레인의 박막두께의 반비례 의존성은 격자 불일치 스트레인이 매우 얇은 경우($t < 100 \text{ \AA}$)에서는 매우 중요한 의미이다. 따라서 우리는 효과 이방성 에너지와 박막두께의 관계를 식(2)로부터 격자 불일치 스트레인의 관계를 고려하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{N(100)}^{eff} \cdot t = 2(B_1^{bulk} \cdot \eta \cdot t_{c(100)} + K_{N(100)}) - 2\pi M_s^2 \cdot t + 2B_1^{surf} \cdot \eta \cdot t_{c(100)} / t \quad (4)$$

이는 만약 우리가 $K^{eff} \cdot t$ 를 박막두께에 따라 그려보면 식(4)는 $A + B \cdot t + C/t$ 의 형으로 주어지며 계수 C 에서 B_1^{surf} 를 결정할 수 있고 A 계수에서 $K_{N(100)}$ 을 알 수 있음을 의미한다.

Fig. (1)에서 곡선은 Jungblut 등의 데이터를 위의 방법으로 Curve fit한 것이고, 이 결과를 Table 1.에 나타내었다. 마찬가지로 방법으로 만약 Cu/Ni/Cu(111)계를 고려하면 전단 스트레인이 효과 이방성 에너지에 포함되므로 식(5)를 통해서 전단 스트레인과 관계있는 B_2^{surf} 와 $K_{N(111)}$ 를 결정할 수 있다.

$$K_{N(111)}^{eff} \cdot t = 2(B_2^{bulk} \cdot \eta \cdot t_{c(111)} + K_{N(111)}) - 2\pi M_s^2 \cdot t + 2B_2^{surf} \cdot \eta \cdot t_{c(111)} / t \quad (5)$$

따라서 마찬가지로 Jungblut[3]의 데이터를 근사하여 Table 1.과 같이 결과를 얻는다.

Table 1. The Results of B and K_N from the curve of Jungblut's data[3].

B_1^b [J/m ³]	B_2^b [J/m ³]	B_1^s [J/m ²]	B_2^s [J/m ²]	$K_{N(100)}$ [J/m ²]	$K_{N(111)}$ [J/m ²]
6.2×10^6	8.5×10^6	-1.97×10^{-2}	-3.7×10^{-3}	-1.03×10^{-2}	-9.0×10^{-4}

III. 토의 및 검토

이상에서 우리는 효과 이방성에너지를 단결정 박막 두께에 따라 측정함으로써 박막두께의 함수인 표면자기탄성계수 B_1^{surf} , B_2^{surf} 와 Néel 표면 에너지 계수($K_N^{(100)}$, $K_N^{(111)}$)들을 간접적으로 결정할 수 있음을 보였다. 이러한 계수들은 박막 두께에 따른 자화의 변화의 예측에 중요하다. 박막 두께의 반비례 관계로 결정되는 효과 자기탄성 계수(B^{eff})는 효과이방성에너지(K^{eff})와 같은 박막 두께 의존성을 가지므로 이는 박막 두께가 얇아짐에 따라 효과 자기탄성에너지가 다른 부호의 값도 가질 수 있음을 의미한다.

한편, Jungblut 등의 데이터에 의해 결정된 Cu/Ni/Cu 계의 자기 탄성 계수들은 매우 큰 표면 자기 탄성 계수를 가짐을 보여주고 있다. 마찬가지로 Néel 표면 에너지 계수도 Co/Pd 계에서의 경우보다 매우 큼을 보여줄 수 있다[4].

IV. 결 론

단결정 Cu/Ni/Cu 박막의 자기탄성계수(magnetoelastic coupling coefficients)를 자성박막의 두께에 따른 효과이방성에너지(effective anisotropy energy)를

추정하여 현상학적인 이론 모델로 구하는 방법을 제안하였다. 이상의 방법론은 이상적인 박막의 경우를 상정한 이론적 모델에 의하여 추정되었으므로 위에서 추정된 값들은 박막과 모재의 현실적인 표면조도와 효과와 박막과 모재사이의 상호 확산, 박막의 이방성 성장 등에 따른 효과에 의해서 과장되었을 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 박막의 미세 조직과 다른 모재에서의 데이터 등을 연구하여 보다 확실한 자기 탄성 계수와 Néel 표면 에너지를 얻을 수 있으므로 향후 이러한 연구의 병행이 필요하다.

참고 문헌

- [1] Ohsung Song, C. Ballentine, R.C. O'Handley, *Appl. Phys. Lett.*, **64** (19), (1994).
- [2] Ohsung Song, MIT Ph.D. thesis, (1994).
- [3] R. Jungblut, M.T. Johnson, J. aan de Stegge, A. Reinders, and F.J.A. den Broeder, *J. Appl. Phys.*, **75** (10), 6424 (1994).
- [4] G. Bochi, O. Song, R.C. O'Handley, *Physical Review B*, **50** (3), 2043 (1994).
- [5] C. Charppert, P. Bruno, *J. Appl. Phys.*, **64**, 5736 (1988).

The Magnetoelastic Coupling Coefficients in Cu/Ni/Cu thin Films

Ohsung Song · R. C. O'Handley

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139

(Received 27 February 1995, in final form 20 April 1995)

We suggest the phenomenological model to determine the magnetoelastic coupling coefficient in Cu/Ni/Cu thin films by considering effective anisotropy energy with magnetic film thicknesses. This indirect determination can be applied other single crystalline systems.