

박막에서의 박막두께에 따른 자기탄성계수의 거동 예측

송오성 · R. C. O'Handley

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139

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

매우 얇은 박막에서 자기탄성계수는 효과이방성에너지와 마찬가지로 박막두께에 반비례하여, $B^{eff} = B^b + B^s/t$ 으로 수학적, 물리적으로 예측됨을 보였다. 이러한 성질은 박막두께가 얇아질수록 표면자기탄성계수(surface magnetoelastic coupling coefficient)에 의한 영향이 커지므로 많은 공학적 의미를 내포하고 있다.

I. 서 론

자기탄성계수(surface magnetoelastic coupling coefficient)는 자성과 기계적 성질의 관계를 나타내는 계수로서 자기탄성 이방성에너지(magnetoelastic anisotropy energy)를 나타내는데 중요한 계수이다. 본 연구에서는 자기탄성계수를 이하 영문 대문자, B 로 표현하기로 한다. B 는 수학적으로는 식(1)로 표현된다.

$$B = \frac{\partial K}{\partial e} \quad (1)$$

즉 B 는 주어진 모든 이방성에너지(K^{total}) 중에서 스트레인(e)와 관계있는 계수이다. 여기서 $B \cdot e$ 는 단위부피당 에너지 [J/m^3]의 단위를 갖는다. 따라서 자기탄성 이방성에너지(magnetoelastic anisotropy energy, f_{me})는 자기탄성계수와 스트레인의 곱으로 식(2)와 같이 표현된다.

$$f_{me} = B \cdot e \quad (2)$$

여기서 B 는 자기탄성에너지를 쉽게 표현할 수 있는 계수로서 다른 자성계수들과 같이 계의 온도, 조성, 두께 등의 함수이다. 한편 B 는 식(3)과 같이 좀더 많이 쓰이는 자기변형계수(magnetostriction coefficient, λ)와 선형적으로 비례하기 때문에 B 를 연구하면 쉽게 λ 를 표현할 수 있다.

$$B = -\lambda \cdot C_{ij} \quad (3)$$

여기서 C_{ij} 는 영률(Young's modulus)들의 조합이며 B 와 λ 가 서로 다른 부호를 가짐을 유의한다.

II. 본 론

1. 박막에서의 효과이방성에너지(K^{eff})

매우 얇은 박막에서 효과이방성에너지(K^{eff})가 표면이방성에너지(K^s) 또는 적층박막에서 계면이방성에너지(K^i)의 영향으로 식(4)와 같이 표현되는 것은 잘 알려져 있다[1].

$$K^{eff} = K^b + \frac{K^s}{t} \quad (4)$$

즉 표면효과에 의해서 박막에서의 효과 이방성에너지는 매우 두꺼운 시편의 이방성 에너지(K^b)와 박막두께(t)에 반비례하는 표면이방성에너지(K^s/t)의 항으로 표현된다. 이는 물리적으로 매우 얇은 박막에서는 K^s/t 항이 중요해져서 실제로는 두꺼운 시편의 자기적 성질과는 매우 다른 성질을 나타냄을 의미한다.

식(4)는 물리적으로 Fig. (1)에 의해 쉽게 이해될 수 있다[2]. 만약 너비가 W 이고 길이방향 격자간 간격이 l ,

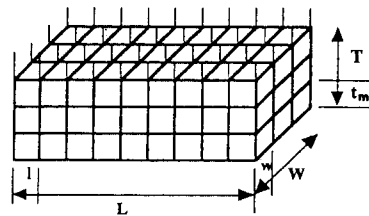


Fig. 1. Illustration of ultrathin film with surface

총 시편길이 L , 두께방향 격자간 간격이 t_m 박막두께가 T 인 표면이 있는 박막계를 고려해보자.

ρ [atom/cm³]는 원자밀도이고 E_{0-6} 는 격자간 이방성

에너지, E_{b-s} 는 표면에너지의 이방성에너지라 하면, 박막계가 가진 모든 원자가 이방성 에너지(E^{total})는 식(5)로 나타내진다.

$$E^{total} = \rho E_{b-b} TLW + \rho E_{b-s} t_m LW$$

$$= (\text{bulk anisotropy})$$

$$+ (\text{surface anisotropy}) \quad (5)$$

즉 박막계가 가진 원자간 이방성에너지는 표면을 제외한 시편의 원자간 이방성에너지와 표면의 원자간 에너지의 합으로 표현된다. 따라서 단위부피당 이방성 에너지(HTW)를 고려하고, $t = T/t_m$ 라면, 식(5)는 식(6)이 된다.

$$K_{total}^{eff} = K^b + \frac{K^s}{t} \quad (6)$$

즉 박막두께에 반비례하는 박막의 효과에너지인 식(4)와 같이 표현된다. 식(4)는 수학적으로 양변에 t 를 곱하여 식(7)로 표현될 수 있다.

$$K^{eff} t = K^b \cdot t + K^s \quad (7)$$

식(7)에서 만약 Fig. (2)와 같이 $K^{eff} t$ 와 t 를 그려보면 그래프의 기울기는 K^b 를, y축 절편은 K^s 를 나타낼 수 있다.

2. 박막에서의 자기변형에너지(f_m)

물리적으로 박막에서의 효과 이방성에너지는 자기결정 에너지(magnetocrystalline anisotropy energy, K_u), 자기변형에너지(Be), 자기형상에너지(shape anisotropy energy, $\mu_0 Ms^2/2$)와 표면에너지(surface anisotropy energy, K^s/t) 또는 적층시편일 경우 계면에너지(interface anisotropy, K^i/t)의 합으로 식(8)과 같이 표현된다.

$$K^{eff} = K_u + B^b \cdot e + \frac{\mu_0}{2} M_s^2 + \frac{K^s}{t} + \dots \quad (8)$$

여기서 K^s 는 순수한 표면효과 ($K^{s,0}$)와 표면에서의 이방성 자기변형에너지($B^s \cdot e$)의 합으로 식(9)와 같이 표현된다.

$$K^s = B^s \cdot e + K^{s,0} \quad (9)$$

따라서 식(8)은 식(9)를 대입하여 식(10)과 같이 쓸

수 있다.

$$K^{eff} = K_u + B^b \cdot e + \frac{\mu_0}{2} M_s^2$$

$$+ \frac{B^s \cdot e}{t} + \frac{K^{s,0}}{t} + \dots \quad (10)$$

한편 수학적 정의에 의하면 자기탄성계수는 식(1)로 주어진다. 따라서 식(10)을 스트레인에 대해서 미분해보면 식(11)을 얻는다.

$$B^{eff} = B^b + \frac{B^s}{t} \quad (11)$$

이 의미는 일반적으로 모재와의 계면효과를 무시하면 자기탄성에너지도 효과이방성에너지와 마찬가지로 아주 얇은 박막에서는 벌크자기탄성에너지와 박막두께에 반비례하는 표면자기탄성에너지의 합으로 표현되며 시편두께가 얇아질수록 B^s/t 항이 중요해짐을 알 수 있다.

또한 앞서보인 식(3)의 B 와 λ 와의 선형적 관계에 의해서 λ 도 식(12)와 같은 모양으로 쓸 수 있다.

$$\lambda^{eff} = \lambda^b + \frac{\lambda^s}{t} \quad (12)$$

3. 박막에서의 자기변형계수의 공학적 의미

식(11), 식(12)와 같은 효과는 최근의 NiFe와 Ni 박막이 두께 반비례 효과를 보인 송오성 등의 보고[3]와 Fe 박막에서 3nm 미만에서 λ 의 부호가 바뀔을 보인 Weber 등의 연구[4]로 확인되고 있다. S. Sun은 비정질 NiCoFeB 박막에서 두께가 얇아질수록 자기변형계수가 벌크시편과 3배 정도 달라짐을 보고하고 있다[5].

실제적으로 식(11)와 같은 자기변형계수의 공학적인 의미는 매우 중요하다. 첫째, 매우 예민한 센서를 만들 수 있다. 약 100Å 이하정도 두께의 박막 또는 박막적층스트레인 계층을 만들면 감도를 100배정도 향상시킬 수 있을

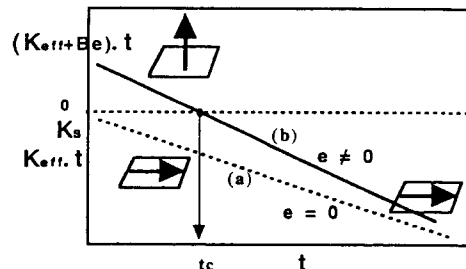


Fig. 2. Schematic plot of $K^{eff} t$ vs. t .

을 의미한다. 둘째, 얇은 박막 또는 적층자기응용기기에
서 스트레인과 박막두께를 조절하여 원하는 자성을 얻을
수 있다. 예를 들어 Fig. (2. a)에서와 같이 주어진 스트
레인 하에서 K^{eff} 가 음수라서 항상 수평자화를 보이는 재
료를 외부스트레인을 가하면 Fig. (2. b)와 같이 두께 t_c
미만에서는 수직자화 기록매체를 얻을 수 있다. 또한 t_c 는
 $K^{eff} = 0$ 이므로 소프트 마그네틱이 요구되는 헤드재료로
서 적당함을 의미한다.

III. 결 론

이제까지 물리적, 수학적 의미에서 자기탄성계수는 박
막두께에 반비례하는 성질을 가지며 이는 많은 기술적 잠
재력을 가지고 있음을 살펴보았다.

따라서 표면자기탄성계수를 예측하고 측정하는 것은
박막자기응용기기를 설계, 개발하는데 매우 중요하다. 이
론적으로 이상적인 박막의 자기탄성계수는 박막계수에

반비례하는 표면자기탄성계수를 포함하고 있지만 이러한
효과는 현실적으로 모재의 조도나 박막의 미세구조에 따
라 큰 의존성을 가질 것이므로 믿을만한 표면자기탄성계
수의 결정을 위해서는 보다 많은 박막의 미세조직 연구가
병행되어야만 한다.

References

- [1] U. Gradmann, Phys. Rev. B, **27** (3), 1935 (1983).
- [2] D. Chuang, MIT Ph. D. thesis, (1994)
- [3] O. Song, C. Ballentine, R. C. O'Handley, Appl. Phys. Lett., **64** (19), (1994)
- [4] Weber et al, Phy. Rev. Lett., **73** (8), (1994)
- [5] S. Sun, R. C. O'Handley, Phys. Rev. Lett., **66** 2798, (1991).

Magnetoelastic Coupling Coefficients with Film Thicknesses in Ultrathin 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 show physically and mathematically that magnetoelastic coupling coefficients can be predicted to have a form of $B^{eff} = B^b + B^s/t$, similarly in effective magnetic anisotropy energy in ultrathin films. The inverse thickness dependence of magnetoelastic coupling coefficients implies lots of technical potentials.