

Co₇₉Cr₂₁ 박막의 강자성 공명 연구*

백종성·김약연·임우영

고려대학교 물리학과, 서울 136-701

(1993년 4월 23일 받음, 1993년 5월 11일 최종수정본 받음)

강자성 공명 실험을 사용하여 고주파 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작된 Co₇₉Cr₂₁ (at.%) 박막의 자기적 특성을 조사하였다. Co₇₉Cr₂₁ 박막은 $K = 2.91 \times 10^5$ erg/cm³, $H_k' = 2526$ Oe, $g = 2.17$ 인 특성을 보이며, Q-band 강자성 공명 실험 결과와 토오크 실험결과는 서로 잘 일치함을 볼 수 있었다.

I. 서 론

강자성 공명(FMR : ferromagnetic resonance)은 강자성체가 매우 큰 DC 자기장과 이에 수직한 마이크로파 사이에 놓여질 때, DC 자기장에 의해 세차운동을 하는 전자스핀의 세차진동수와 마이크로파의 진동수가 서로 일치할 때 일어나는 공명현상으로서, 1946년에 J. H. E. Griffith[1]에 의해 Fe, Co, Ni 박막에 대해서 최초로 관측되었으며, 그 이듬해인 1947년에 W. A. Yager 및 R. M. Bozorth등[2]에 의해 그 실험사실이 확증되었고, C. Kittel[3]에 의해 반자장 및 결정 자기 이방성을 고려한 이론적 기반이 마련되었다. 초기에는 강자성 공명 실험을 사용하여 강자성체의 형상 자기 이방성과 결정 자기 이방성을 연구했으며, 그 후 강자성체의 미세 자기 구조를 규명할 수 있는 분광학적 분리인자, 포화자화, 그리고 자화의 현상론적 감쇠 등을 구하는데 이용되어 왔다.

본 연구에서는 강자성 공명 실험을 사용하여 자성박막의 유효 이방성 상수 K , 유효 이방성 자기장 H_k' , 그리고 분광학적 분리인자 g 를 결정하는 방법을 제시하고, 고주파 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 제작한 Co₇₉Cr₂₁ 박막의 수직 이방성 성장상태를 강자성 공명 실험을 통하여 고찰하고자 한다.

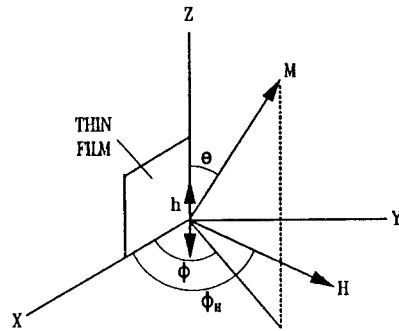


Fig. 1. The coordinate system used in the calculation.

II. 이 론

Fig.1과 같이 마이크로파 h 가 Z-축을 향하고, DC 자기장 H 가 XY-평면에서 박막시료의 면에 대해 수평에서 수직으로 회전하는 경우, 자화 M 의 운동 방정식을 고려하면 식(1)과 같이 공명 자기장과 공명 진동수의 관계를 기술해주는 Smit-Beljers 일반식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2 \sin^2 \theta} (E_{\theta\theta} E_{\phi\phi} - E_{\theta\phi}^2) \quad (1)$$

여기서, ω 는 마이크로파의 각진동수, γ 는 자기회전비

*본 연구는 1992년 교육부 기초과학육성 연구비의 지원에 의한 것임.

$ge/2mc$, g 는 분광학적 분리인자이고, E_θ 와 E_ϕ 는 자유 에너지 밀도 E 의 θ 및 ϕ 에 대한 편미분을 각각 의미한다.

이때, 시료의 면에 수직한 방향으로 일축 자기 이방성이 존재하면 시료 내부의 자유 에너지 밀도 E 는 다음과 같이 표현된다.

$$E = -M_s H \sin \theta \cos(\phi_H - \phi) + 2\pi M_s^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi - K_{ul} (\sin^2 \theta \sin^2 \phi - 1) \quad (2)$$

한편, E 가 최소가 되는 평형상태($\theta = \theta_o$, $\phi = \phi_o$)를 고려하면, E 는

$$\left. \frac{\partial E}{\partial \theta} \right|_{\theta_o} = -M_s H \cos \theta_o \cos(\phi_H - \phi) + 4\pi M_s^2 \sin \theta_o \cos \theta_o \sin^2 \phi - 2K_{ul} \sin \theta_o \cos \theta_o \sin^2 \phi = 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial E}{\partial \phi} \right|_{\phi_o} = -M_s H \sin \theta \sin(\phi_H - \phi_o) + 4\pi M_s^2 \sin \theta \sin \phi_o \cos \phi_o - 2K_{ul} \sin^2 \theta \sin \phi_o \cos \phi_o = 0 \quad (4)$$

과 같은 관계를 만족한다.

여기서, 이방성 자기장 $H_k (= 2K_{ul}/M_s)$ 과 유효 이방성 자기장 $H_k' (= H_k - 4\pi M_s)$ 을 고려하여, 식(3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\cos \theta_o = 0; \theta_o = \pi/2 \quad (5)$$

$$\sin \theta_o = -\frac{H \cos(\phi_H - \phi)}{H_k' \sin^2 \phi} \quad (6)$$

식(5), (6)으로 표현되는 조건을 식(4)에 대입하여 정리하면,

$$\theta_o = \pi/2; H \sin(\phi_H - \phi_o) = -H_k' \sin \phi_o \cos \phi_o \quad (7)$$

$$\sin \theta_o = -\frac{H \cos(\phi_H - \phi)}{H_k' \sin^2 \phi}; \tan(\phi_H - \phi_o) \tan \phi_o = 1 \quad (8)$$

와 같이 되는데, 식(8)의 조건은 물리적으로 적당하지 못하므로 버린다. 결국, 공명조건을 얻기 위하여, 식(2)와 같이 표현되는 자유 에너지 밀도 E 를 식(1)에 대입한 후, 식(7)의 조건을 적용하면 다음과 같이 공명 진동수 ω ,과

공명 자기장 H ,사이의 관계를 구할 수 있다.

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_r^2 \cos^2(\phi_H - \phi_o) + H_r H_k' \cos(\phi_H - \phi_o) (3 \sin^2 \phi_o - 1) + H_k'^2 \sin^2 \phi_o (2 \sin^2 \phi_o - 1) \quad (9)$$

한편, 모든 방향에 대해 시료가 완전히 포화되었다면 식(9)에서 $\phi_H \approx \phi_o$ 로 놓을 수 있다. 따라서, 박막시료에 가해진 DC 자기장의 방향이 박막면에 수직한 경우($\phi_H = 90^\circ$)와 평행한 경우($\phi_H = 0^\circ$)에 대한 공명조건은 다음 식과 같이 각각 표현된다.

$$\frac{\omega_r}{\gamma} = H_r(\perp) + H_k' \quad : \phi_H = 90^\circ \quad (10)$$

$$\left(\frac{\omega_r}{\gamma}\right)^2 = H_r(\parallel) [H_r(\parallel) - H_k'] \quad : \phi_H = 0^\circ \quad (11)$$

여기서, $H_r(\perp)$ 와 $H_r(\parallel)$ 는 각각 $\phi_H = 90^\circ$ 및 0° 인 경우에 대응하는 공명 자기장이며, 미분형 흡수선과 base line이 만나는 점으로부터 구해진다. 따라서, 실험에서 $H_r(\perp)$ 와 $H_r(\parallel)$ 을 구하면 식(10), (11)을 사용하여 분광학적 분리인자 g 와 유효 이방성 자기장 H_k' 을 구할 수 있으며, 이 결과와 다른 실험에서 구한 포화자화 M_s 로부터 유효 이방성 상수 K 를 결정할 수 있다.

III. 실험방법

1. 시료제작

실험에 사용된 $Co_{79}Cr_{21}$ 박막시료는 고주파 마그네트론 스파터링 장치를 이용하여 제작했는데, 이때 사용한 제작 조건은 Table. 1과 같다. 제작된 박막시료의 두께측정에는 Tolansky 방법[4]을 사용했고, 성분 분석은 원자 발광

Table 1. Deposition conditions for RF magnetron sputtered $Co_{79}Cr_{21}$ thin film.

target-substrate distance	5.2 cm	RF high voltage	1.6 kV
diameter of target	10 cm	substrate temperature	R.T.
Cr content for target	23 at. %	deposition rate	90 (± 5) $\text{\AA}/\text{min}$
back ground pressure	5.0×10^{-7} Torr	sputtering time	60 min
argon pressure	25 mTorr		

분석법(ICP, Inductive Coupled Plasma-Spectroscopy)

pe)으로 수행하였다.

2. 강자성 공명 실험

본 연구에서는 Bruker사의 전자 상자성 공명 분석기 (EPR Spectrometer, ESP 300 Series)를 사용하여 강자성 공명신호를 관측했는데, 이때 사용한 공명 공동 (resonant cavity)은 TE₁₀₂ 진동방식을 갖는 직방형 공동이며, 마이크로파의 진동수는 9.77 GHz(X-band) 및 33.9 GHz(Q-band) 이다.

공명 진동수에 대응하는 공명 자기장을 측정하기 위하여, goniometer와 연결된 석영봉에 박막시료를 부착하여 마이크로파와 DC 자기장이 서로 직교하는 공동내에 위치시킨후, 상온에서 DC 자기장을 15 kOe까지 변화시켜 주면서 미분형 공명 흡수선을 관측했다. 이와같은 방법으로 DC 자기장과 시료의 면이 만드는 각을 0°에서 90°까지 변화시켜 주면서 실험을 반복했다.

IV. 결과 및 논의

강자성 공명 실험을 통해 얻어진 미분형 공명 흡수선은 Fig.2, 3과 같다. Fig.2는 X-band 실험 결과로서, $\phi_H = 90^\circ$ 일때 두개의 신호가 관측되는데, J. O. Artman 등은 첫번째 신호를 수직 자기 이방성에 의한 신호, 두번째 신호는 반자장항($4\pi M_s$)에 의한 신호로 해석했다.[5, 6] 이때, ϕ_H 가 점차 감소함에 따라 두번째 신호는 앞으로 이동하는 모습을 보이며, 첫번째 신호는 두번째 신호에 합성되어 $\phi_H = 0^\circ$ 인 경우 base line 밑에 존재하므로 공명 자기장을 결정할 수 없다. Fig.3은 Q-band 에서 측정된 미

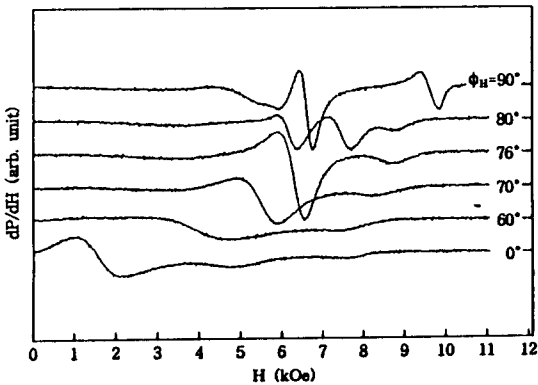


Fig. 2 X-band FMR spectra of RF magnetron sputtered Co₇₉Cr₂₁ thin film. (T_s = R.T., V_{RF} = 1.6 kV, P_{Ar} = 25 mTorr)

분 흡수선인데, 여기서 보면 $\phi_H = 90^\circ$ 인 경우 수직 이방성에 의한 신호가 반자장항에 의한 신호에 비해 우세한 모습을 보이며, ϕ_H 의 감소에 따라 첫번째 신호는 뒤로 이동하며, 두번째 신호는 앞으로 이동하면서 그 모습이 점차 약해져서 $\phi_H = 0^\circ$ 이 되면 완전히 소멸되는 모습을 보인다.

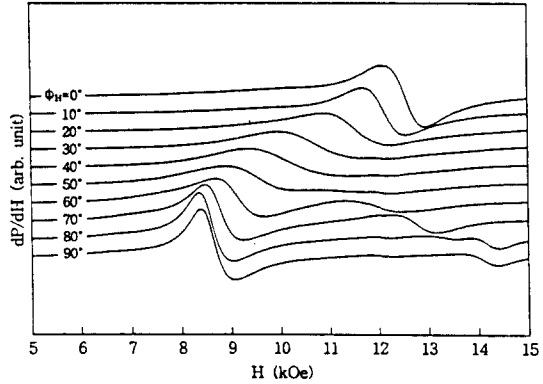


Fig. 3 Q-band FMR spectra of RF magnetron sputtered Co₇₉Cr₂₁ thin film. (T_s = R.T., V_{RF} = 1.6 kV, P_{Ar} = 25 mTorr)

이와같이 관측된 공명 신호를 식[10], [11]에 대입하여 얻은 계산결과와 토오크 실험 및 VSM 실험에서 구한 결과[7], [8]를 Table. 2에 나타냈다. Table. 2를 보면, Q-band 강자성 공명 실험결과는 토오크 실험 및 VSM 실험결과와 잘 일치하는 모습을 보인다. 그리고, 실험에 사용된 시료의 유효 이방성 상수는 비교적 큰 양의 값($\sim 2.91 \times 10^5$ erg/cm³)을 가지므로, Table. 2와 같은 제작조건에서 제작된 시료는 자화용이축이 면에 수직인 방향으로 존재하며, 수직 이방성이 잘 발달된 것으로 생각된다.

Table 2. The values of $4\pi M_s$, K, K_{eff}, H_k, H_k', and g for Co₇₉Cr₂₁ thin film. (T_s = R.T., V_{RF} = 1.6 kV, P_{Ar} = 25 mTorr)

	$4\pi M_s$ (emu/cm ³)	K (erg/cm ³)	K _{eff} (erg/cm ³)	H _k ' (Oe)	H _k (Oe)	g
X-band FMR exp.	6133	☆	☆	☆	☆	2.03
Q-band FMR exp.	2943	2.91×10^5	6.41×10^5	2526	5470	2.17
Torque exp.	☆	2.88×10^5	6.32×10^5	2459	5398	☆
VSM exp.	2930	☆	☆	☆	☆	☆

☆는 계산 및 측정불가를 의미함.

한편, X-band 강자성 공명 실험에서는 K , K_{eff} , H_k , 그리고 H_k' 등을 구할 수 없었는데, 이는 $\phi_H = 0^\circ$ 인 경우 수직 이방성에 의해 나타나는 신호가 base line 밑에 존재하여 공명 자기장을 결정할 수 없었기 때문이다. 그리고, X-band 강자성 공명 실험에서 구한 $4\pi M_s$ 및 g 는 Q-band 강자성 공명 실험 및 VSM 실험결과와 상당히 큰 차이를 보이는데, 이와같은 현상은 다음과 같이 설명된다. 즉, 강자성 공명 신호를 분석하기 위해 도출된 식 (10), (11)은 시료가 포화된 경우에 대해서 얻어진 식이므로, 시료가 포화되지 않은 상태에서 나타나는 신호에 대해 이 식들을 적용하는 것은 적합하지 않다. Fig.4에

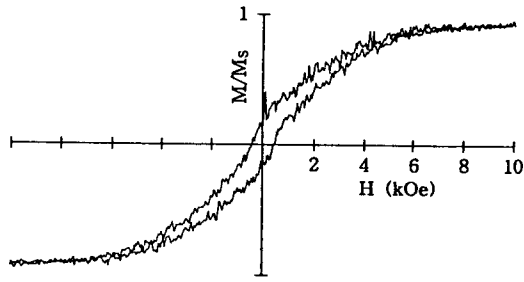
공명신호는 시료가 완전히 포화된 상태에서 관측되나, $\phi_H = 0^\circ$ 인 경우에는 자기장이 약 1,500 Oe일때 공명신호가 나타난다. 따라서, 시료가 완전히 포화되지 않은 상태에서 나타나는 신호에 대해 식(10), (11)을 사용하여 분석한 X-band 강자성 공명 실험결과를 시료의 특성으로 보는 것은 적합하지 않다고 생각된다. 따라서, 강자성 공명 실험을 사용하여 자성체의 특성을 조사하는 경우, 정확한 공명신호를 얻기 위하여 사전에 VSM 실험을 통해 시료의 자화상태를 고찰한 후, 실험에 사용되는 마이크로파의 진동수를 결정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

V. 결론

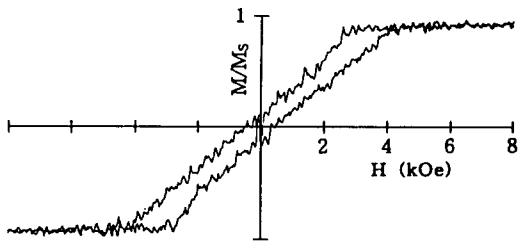
강자성 공명 실험을 이용하여 $Co_{79}Cr_{21}$ 박막의 자기적 특성을 고찰한 결과, 본 연구에 사용된 $Co_{79}Cr_{21}$ 박막은 $K = 2.91 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $H_k' = 2526 \text{ Oe}$, $g = 2.17$ 인 특성을 보이며, Q-band 강자성 공명 실험결과와 토오크 실험결과를 서로 잘 일치함을 볼 수 있었으며, 자성 박막의 자기 이방성 연구에 강자성 공명 실험은 아주 유용하다고 생각한다.

참고 문헌

- [1] J. H. E. Griffiths, *Nature*, **158**, 670(1947)
- [2] W. A. Tager and R. M. Bozorth, *Phys. Rev.*, **72**, 80(1947)
- [3] C. Kittel, *Phys. Rev.*, **73**, 155(1948)
- [4] L. Eckertova, *Physics of thin films*, (New York and London : Plenum Press, 1977), 60~67
- [5] J. O. Artman, P. V. Michell, A. Layad, and N. S. VanderVen, *J. Appl. Phys.*, **57**(1), 3976 (1985)
- [6] G. W. D. Spratt, M. C. A. Mather, J. O. Artman, K. R. Mountfield, and M. H. Kryder, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 135(1990)
- [7] 백종성, 임우영, 유성초, *전기학회논문지*, **40** (11), 1147(1991)
- [8] J. O. Artman, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-21** (3), 1271(1985)



(a)



(b)

Fig. 4 (a) In-plane M-H loop of RF magnetron sputtered $Co_{79}Cr_{21}$ thin film. ($T_s = R.T.$, $P_{Ar} = 25 \text{ mTorr}$, $V_{RF} = 1.6 \text{ kV}$)
 (b) Perpendicular M-H loop of RF magnetron sputtered $Co_{79}Cr_{21}$ thin film. ($T_s = R.T.$, $P_{Ar} = 25 \text{ mTorr}$, $V_{RF} = 1.6 \text{ kV}$)

VSM 실험에서 구한 자기이력곡선을 나타냈는데, 여기서 보면 수평방향의 경우 자기장의 크기가 약 7,000 Oe 이상 일때 시료가 포화되는 모습을 보이고, 수직방향의 경우 자기장의 크기가 약 3,000 Oe 이상 일때 시료가 완전히 포화되는 경향성을 갖는다. 그러나 X-band 강자성 공명 실험결과를 보면 $\phi_H = 90^\circ$ 인 경우

Ferromagnetic Resonance for Co₇₉Cr₂₁ Thin Film

Jong-Sung Baek, Yark-Yeon Kim, and Woo-Young Lim

Department of Physics, Korea University, Seoul 136-701

(Received 23 April 1993, in final form 11 May 1993)

The magnetic properties of *RF* magnetron sputtered Co₇₉Cr₂₁ (at. %) thin film have been examined by using of ferromagnetic resonance. The properties of Co₇₉Cr₂₁ thin film show the effective first order anisotropy constant of 2.91×10^5 erg/cm³, the effective anisotropy field of 2526 Oe, and the spectroscopic splitting factor of 2.17. The torque experimental results, analyzed by employing modified Artman method, coincide with the ferromagnetic resonance experimental results.