

## FeNb 박막의 강자성 공명 연구

임우영\* · 백종성

고려대학교 정보소자학과

충남 연기군 조치원읍 서창동 208, 339-700

이수형

청주대학교 컴퓨터응용물리학과

충북 청주시 상당구 내덕동 36, 136-701

(2004년 6월 21일 받음, 2004년 7월 30일 최종수정본 받음)

DC 마그네트론 스파터링 방법으로 제작한 Fe<sub>84</sub>Nb<sub>16</sub>(wt.%) 박막의 온도변화에 따른 자기적 특성을 강자성 공명 흡수선의 거동을 통하여 고찰했다. 모든 온도영역에서 다수의 체적 모드 스핀파와 한 개 또는 두 개의 표면 모드가 관측되었는데, 이와 같은 현상은 시편 양면의 표면 자기 이방성이 0 보다 작은 경우에 나타나는 특성이다. 113~293 K 온도영역에서 포화자화는 Bloch의 T<sup>3/2</sup>법칙과 부합되는 모습을 보였으며, 분광학적 분리인자는 온도변화에 비교적 작은 변화폭을 보였다. 233~293 K 온도구간에서 기판과 접하는 시편면의 표면 자기 이방성 상수 K<sub>s2</sub>는 온도감소에 따라 그 값이 비교적 큰 폭으로 증가하는 특성을 나타냈다. 그리고 공기와 접하는 시편면의 표면 자기 이방성 상수 K<sub>s1</sub>은 상온에서 -0.322 erg/cm<sup>2</sup>인 값을 보이다가, 온도가 253 K로 내려가면 -0.394 erg/cm<sup>2</sup>로 감소한 후, 그 이하의 온도영역에서는 온도에 비교적 둔감한 특성을 보였다.

**주제어:** FeNb 박막, 강자성 공명, 분광학적 분리인자, 표면 자기 이방성

### I. 서 론

강자성체에 매우 큰 정자기장을 인가시켜주면, 격자점에 있는 원자스핀은 정자기장 방향을 축으로 세차운동을 하면서 이웃한 격자와의 상호작용에 의한 감쇠현상에 의해 원자스핀의 세차운동이 점차 약화된다. 이때, 정자기장에 수직한 방향으로 원자스핀의 세차진동수와 동일한 진동수를 갖는 마이크로파를 인가시켜주면 세차운동이 지속되는 공명현상이 나타나는데, 이와 같은 현상을 강자성 공명(FMR: ferromagnetic resonance)[1-4]이라 한다. 강자성 박막에서 관측되는 강자성 공명 신호의 종류를 살펴보면, 균일 모드(uniform mode), 스핀파 모드(spin wave mode)[5, 6], 그리고 표면 모드(surface mode)[7-9] 등이 있다. 균일 모드 및 스핀파 모드는 체적 모드(volume mode)에 포함되는데, 균일 모드는 시편 내부의 모든 원자스핀들이 동일한 위상을 갖고 세차운동을 하는 경우에 관측되며, 이웃한 원자스핀들 사이의 교환상호작용에 의해 그 위상들이 조금씩 차이가 나는 모습으로 세차운동하는 경우에는 스핀파 공명이 발생한다. 그리고, 기판쪽 경계면과 공기와 접하는 경계면의 특성이 시편 내부의 특성과 각각 다른 경우 표면파 모드가 관측된다. 이와 같은 강자성 공명 현상은 1946년에 J. H. E. Griffith[2]에 의해 Fe, Co, Ni 박막에 대해서 최초로 관측되었으며, 그 이듬해인 1947년에 W.

A. Yager 및 R. M. Bozorth 등[3]에 의해 그 실험사실이 확증되었고, C. Kittel[4]에 의해 반자장 및 결정 자기 이방성을 고려한 이론적 기반이 마련되었다. 스핀파가 형성되려면 외부에서 가해주는 섭동에너지와 섭동에 대한 복원력이 요구되는데, 강자성공명 실험의 경우 섭동에너지는 마이크로파 자장에 의해 공급되며, 복원력은 스핀들 사이의 교환력에 의해 형성된다. 이와 같이 형성되는 스핀파는 시편의 내부특성과 시편면의 경계조건에 매우 민감한 특성을 보이므로, 공명 신호를 분석하면 교환상수(exchange stiffness constant) 및 표면 자기 이방성(surface magnetic anisotropy) 등에 관한 정보를 고찰할 수 있다. 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. 국내에서도 1966년에 강자성 공명실험에 관한 연구결과가 발표[10]된 이후, 이 분야에 대한 다수의 연구결과가 발표[11-17]되고 있다.

본 실험에서는 연자성 특성이 우수한 것으로 알려진 FeNb 박막을 직류 마그네트론 스파터링방법으로 제작하여, 제조된 시편에 대해 113~293 K 온도구간에서 강자성 공명 실험을 수행한 후, 그 신호들을 분석함으로써 온도변화가 포화자화, 분광학적 분리인자, 교환상수, 그리고 표면이방성상수 등과 같은 시편의 기초물성에 미치는 효과를 고찰했다.

\*Tel: (041)860-1321, E-mail: wylim@korea.ac.kr

## II. 실험

본 연구에 사용된 FeNb 박막시편은 직류 마그네트론 스파터링 방법으로 제조하였다. 이때 사용한 기판은 5 mm 두께의 Si(100)-wafer이며, 복합모드형 스파터링 타겟은 직경 100 mm의 Fe-plate위에 5 mm×5 mm 크기의 Nb-chip을 적절히 배치하여 준비했다. 박막제작시 배경압력(background pressure)은  $5 \times 10^{-7}$  torr, 아르곤 압력(working gas pressure)은 2.5 mtorr이었다. 스파터링 시간을 적절히 조절하므로써 시편의 두께가 100 nm가 되도록 하였으며, Fe-plate와 Nb-chip의 면적비를 조절하므로써 Nb 함량이 각각 14.7, 16, 19.5 wt.%인 세 종류의 시편을 제작했다. 제작된 시편은 EDX (energy dispersive x-ray spectroscopy)를 통해 그 성분을 분석했으며, 두께는 profile-meter를 사용하여 측정했다. 강자성 공명의 예비 실험 결과 Nb 함량이 14.7 wt.%인 시편은 자화값이 너무 커서 정자기장과 시편면이 만드는 각이 일때, 공명 신호의 위치가 본 장비의 정자기장 인가 영역(0~17 kOe)을 초과하는 모습을 보였고, Nb 함량이 19.5 wt.%인 시편의 강자성 공명 흡수선에서는 연자성 특성이 우수한 연자성 박막에서 관측되는 스핀파 신호가 매우 미약하고 복잡한 모습을 보였다. 따라서 본 논문에서는 Fe<sub>84</sub>Nb<sub>16</sub>(wt.%) 박막시편에 대해 연구의 초점을 맞추었다.

한편 시편의 포화자화(saturation magnetization), 분광학적 분리인자(spectroscopic splitting factor), 그리고 교환상수 등과 같은 물리상수와 표면자기특성을 고찰하기 위하여 다음과 같이 강자성 공명실험을 수행했다. 먼저 강자성 공명실험을 수행하기 전에 시료진동형자력계를 사용하여 시편이 포화자화에 도달하는데 필요한 자기장 범위를 검토하여 강자성 공명실험에 사용할 마이크로파의 주파수를 결정하는데, 본 연구에 사용된 시편에 대해 강자성 공명조건을 고려한 결과 X-band(~9.19 GHz) 마이크로파가 적절함을 알 수 있었다. 그리고 직경이 3 mm인 디스크형 시편을 석영봉에 부착한 후, 마이크로파와 정자기장이 직교하는 공동(TE011)내에 위치시킨 채, 0~17 kOe의 정자기장 영역에서 미분형 공명신호를 관측했다. 그리고 시편의 온도변화에 따른 자기적 특성을 고찰하기 위하여 113~293 K 온도영역(온도간격: 20 K)에서 온도를 변화시켜주면서 공명신호의 변화를 조사했다. 이와 같은 방법으로 정자기장의 방향을 시편면에 대해 수직 및 수평하게 유지시켜 주면서 실험을 반복했다.

## III. 결과 및 논의

자기이방성(magnetic anisotropy)이 작은( $H_a \approx 0$ ) 강자성 시편에 외부자기장  $H$ 를 인가시켜주는 경우, 자화  $M$ 의 운동방

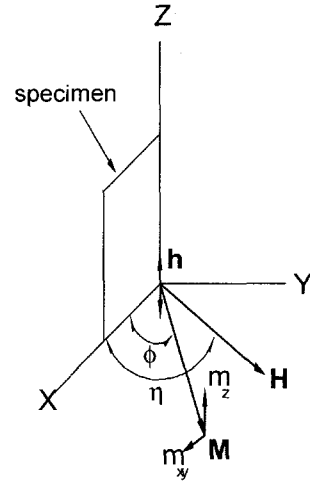


Fig. 1. The coordinate system used in the calculation.

정식[4, 5]은 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{M}}{dt} &= \gamma \vec{M} \times \vec{H}_{eff} \\ &= \gamma \vec{M} \times (\vec{H} + \vec{H}_{ex} + \vec{H}_d) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\gamma (=ge/2mc)$ 는 자기회전비,  $g$ 는 분광학적 분리인자,  $\vec{H}_{ex} (=2A \nabla^2 \vec{M}/m^2)$ 는 교환장(exchange field),  $A$ 는 교환상수, 그리고  $H_d$ 는 반자장(demagnetization field)이다.

Fig. 1과 같이 xz-평면에 놓여있는 박막시편에  $\pm z$ -축방향으로 진동하는 마이크로파 자기장과 시편을 충분히 포화시킬 수 있는 정자기장을 xy-평면에서 인가시켜주는 경우( $M_{eff} = M_s$ )에 대해, 시편의 임피던스를 계산한 후 에너지 흡수율이 최대가 되는 공명조건을 찾으면 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 &= \left( H - 4\pi M_s \sin^2 \eta + \frac{2Ak^2}{M_s} \right) \\ &\times \left( H + 4\pi M_s \cos^2 \eta + \frac{2Ak^2}{M_s} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 마이크로파의 각진동수,  $k (=n\pi/d)$ 는 파수,  $n$ 은 0, 1, 2, 3, ... 으로 주어지는 스핀파 모드의 모드 수(mode number),  $d$ 는 시편의 두께, 그리고  $\eta$ 는 시편의 면과 정자기장이 만든 각이다. 한편 시편 양면에서 스핀이 고착(pinning)되지 않으면  $n=0$ 인 균일 모드가 관측되며, 스핀이 고착되는 경우 정상 스핀파가 나타나는데 정상 스핀파가 형성되기 위한 경계조건( $k = n\pi/d$ )을 식 (2)에 적용하면 다음과 같이  $\eta=90^\circ$ , 즉 정자기장을 시편면에 수직한 방향으로 인가할 때 관측되는 스핀파 공명조건을 얻을 수 있다.

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_m - 4\pi M_s \sin^2 \eta + \frac{2A(n\pi)^2}{M_s d^2} \quad (3)$$

식 (3)에서  $H_m$ 은 모드 수가  $n$ 인 스핀파의 공명자기장인데, 여기서 보면  $H_m$ 과 모드 수의 제곱( $n^2$ ) 사이에 선형관계가 성립하는 것을 볼 수 있다. 따라서 실험에서 관측한  $H_m$ 과  $n^2$ 을 최소자승법으로 선형 fitting하면 공명자기장에 대응되는 모드 수를 찾을 수 있으며, 이 과정에서 구해지는 직선의 기울기는 교환상수를 계산하는데 사용된다.

한편 균일모드의 공명조건은 식 (2)에 스핀이 고착되지 않을 조건인  $n = 0$ 을 적용하면 다음과 같이 계산된다.

a)  $\eta = 0^\circ$ 인 경우 :

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{r\parallel}(H_{r\parallel} + 4\pi M_s) \quad (4)$$

b)  $\eta = 90^\circ$ 인 경우 :

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_{r\perp} - 4\pi M_s \quad (5)$$

식 (4) 및 (5)를 사용하면 시편의 포화자화, 분광학적 분리인자 등이 계산된다. 그리고, 정자기장과 이에 수직한 마이크로파 자기장이 시편에 인가되는 경우에 대해, 자화의 운동방정식과 맥스웰방정식으로 부터 동적자화(dynamic magnetization)  $m$ 과 흡수 에너지의 거동을 알 수 있는데, 일축이방성을 갖는 시편의 동적자화에 대한 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$A \frac{\partial m}{\partial y} - K_{s1,2} m = 0 \quad (6)$$

여기서,  $A$ 는 교환상수, 그리고  $K_{s1,2}$ 는 시편 양쪽면의 표면자기이방성상수이다. 그리고 시편에 흡수되는 에너지의 평균값은 Poynting vector의 평균값  $S_{av}$ 로 표현되는데, 이는 다음 식과 같이 시편의 임피던스에 비례한다.

$$S_{av} = \frac{1}{2} \left(\frac{ch}{4\pi}\right)^2 Re(Z_o + Z_d) \quad (7)$$

여기서  $Z_o$  및  $Z_d$ 는 시편 양쪽면의 임피던스이다. 따라서  $S_{av}$ 는 표면 자기 이방성, 포화자화, 분광학적 분리인자, Gilbert 감쇠인자, 교환상수, 전기비저항, 시편의 두께 등에 의존하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 스핀파 모드와 공명자기장과 그들의 상대적 세기는 표면자기이방성, 시편의 두께, 분광학적 분리인자, 포화자화,  $S_{av}$  그리고 교환상수 등에 의존하며, 공명 흡수선의 선폭은 Gilbert 감쇠인자와 전기비저항에 의존하는 것으로 알려져 있다.

$Fe_{84}Nb_{16}$ (wt.%) 박막시편에 대해 정자기장을 시편면에 수평한 방향으로 인가하면서 측정된 미분형 강자성 공명 흡수선을 Fig. 2에 나타냈다. 이때 측정온도는 113 K에서 293 K

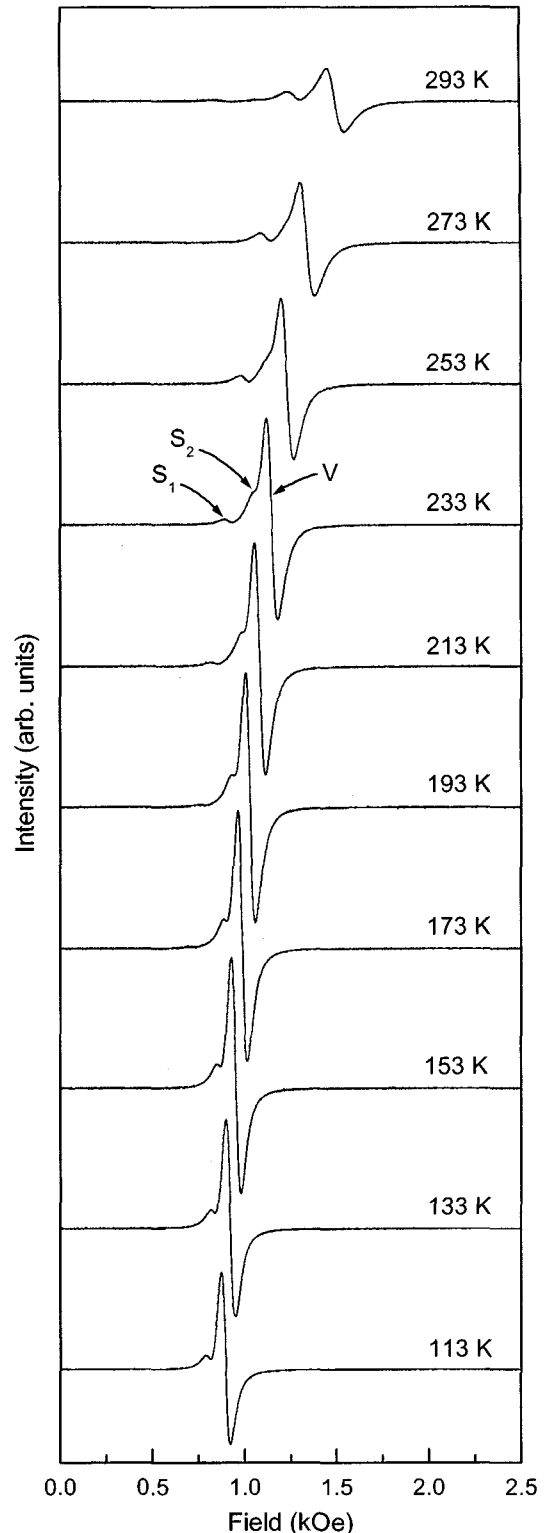


Fig. 2. FMR absorption spectra for the 100 nm thick  $Fe_{84}Nb_{16}$  (wt.%) thin films at parallel configuration.

까지(온도 간격 : 20 K) 변화시켜 주었다. 여기서 보면 그림에서 "V"로 표현한 비교적 세기가 큰 신호(main peak)와

그 앞에 작은 보조 신호가 관측되는데 공명자기장과 자화의 관계를 고려해 볼 때, 세기가 큰 신호는 체적 모드로 생각되며, 세기가 작은 신호는 표면 모드로 판단된다. 그림에서 “S<sub>1</sub>”과 “S<sub>2</sub>”로 각각 표시한 신호는 표면 모드로서, S<sub>1</sub>은 공기와 접하는 표면 모드 신호이고, S<sub>2</sub>는 기판과 접하는 표면 모드에 대응되는 신호이다. 자성박막에 대한 강자성 공명 실험에서 체적 모드와 표면 모드가 동시에 나타나는 현상은 시편의 내부특성과 공기와 접하는 표면 및 기판과 접하는 표면 쪽 특성이 서로 다른 경우에 나타나는 모습으로서, 강자성 공명 실험의 중요한 장점 가운데 하나이다. 즉 대부분의 자기 측정 실험의 경우 시편의 평균적인 자기 특성(volume average)만 조사할 수 있으나, 강자성 공명실험에서는 시편에 내재하는 서로 다른 자기 특성들을 각각 분리하여 관측할 수 있는 장점이 있다. 온도가 293 K에서 점차 감소함에 따라 체적 모드의 세기는 서서히 증가하여 온도가 173 K일 때 최대인 모습을 보이는데 이와 같은 현상은 온도가 173 K까지 감소하는 동안 S<sub>2</sub>의 자화값이 체적모드의 자화값으로 접근하는데 그 원인이 있는 것으로 생각된다. 그리고 그 이하의 온도영역에서는 온도감소에 따라 그 세기가 약간 감소하는 것을 볼 수 있으며, 공명자기장의 위치는 온도가 감소함에 따라 서서히 앞쪽으로 이동하는 현상을 관측할 수 있는데, 이와 같은 모습은 자화의 온도의존성으로 설명된다. 대체적으로 S<sub>2</sub>는 그 세기가 매우 미약하며 체적 모드에 혼합되는 모습을 보이나, S<sub>1</sub>은 온도변화에 따라 세기변화가 비교적 완만하며, 공명자기장의 거동은 체적 모드와 유사한 특성을 보인다.

Fig. 3에 정자기장을 시편면에 수직인 방향으로 인가하면서 측정된 미분형 강자성 공명 흡수선을 나타냈다. 정자기장을 시편면에 수평한 방향으로 인가하면서 측정된 공명 흡수선의 경우 체적 모드와 표면모드의 분리가 명확하지 않은 모습을 보였으나, Fig. 3과 같이 정자기장을 시편면에 수직인 방향으로 인가하면서 측정된 미분형 강자성 공명 흡수선의 경우 체적 모드와 표면모드들이 확연히 구분되는 모습을 볼 수 있다. 이는 강자성 공명 이론에서 예측되는 바와 같이 정자기장과 시편면이 만드는 각이 90°에 접근할 때, 공명 자기장의 위치가 자화에 매우 민감하기 때문이다. Fig. 3을 보면, 공명신호는 세 종류의 형태, 즉 표면 모드 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, 그리고 체적 모드 V로 구분되는데, 체적 모드는 다시 균일 모드와 스핀파 모드로 구분된다. 그림에서 점선으로 표현한 신호는 스핀파 모드를 관측하기 위하여 공명 흡수선의 배율(gain)을 10 배 확대한 모습이며, 스핀파 모드는 n = 1, 3, 5 등으로 나타났다. 여기서 n은 스핀파 모드의 모드 수(mode number)를 의미한다. 공기와 접하는 S<sub>1</sub>은 측정온도 감소에 따라 공명자기장의 위치가 서서히 앞으로 이동하며, 그 세기변화는 미미한 특성을 보인다. 기판과 접하는 S<sub>2</sub>는 온도가 233 K 까지 감소하

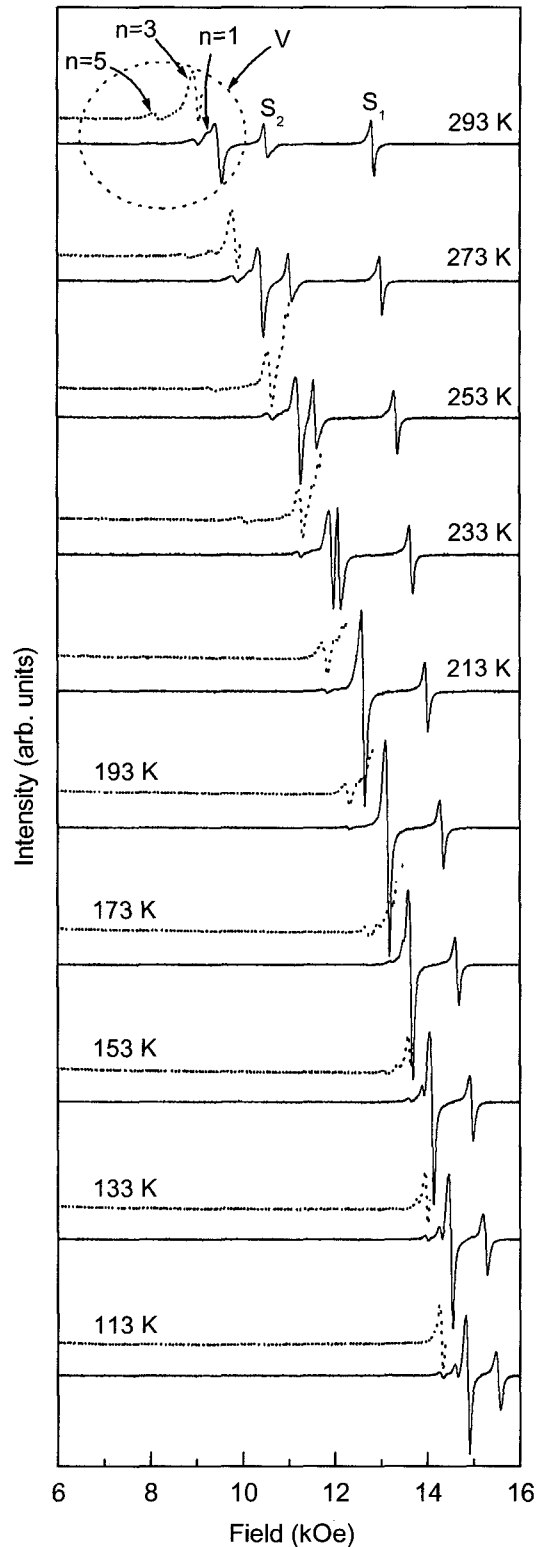


Fig. 3. FMR absorption spectra for the 100 nm thick Fe<sub>84</sub>Nb<sub>16</sub> (wt.%) thin films at perpendicular configuration.

는 동안 세기가 비교적 큰 폭으로 증가하고, 공명점의 위치가 균일 모드 쪽으로 이동하다가 온도가 213 K에 도달하면

두 신호가 서로 합성되는 모습을 보인다. 그리고 체적 모드의 공명점의 위치는 온도감소에 따라 점차 높은 자기장 영역으로 이동하는 모습을 보이는데, 이와 같은 모습은 자화의 온도의존성으로 설명되는 특성이다. 한편, 식(3)에 설명된 바와 같이 각각의 스핀파 모드에 대응되는  $H_m$ 과 모드 수의 제곱  $m^2$ 을 최소자승법으로 선형 fitting하면 공명자기장에 대응되는 모드 수와 균일 모드의 공명자기장, 그리고 직선의 기울기 등을 구할 수 있으며, 이 결과와 Fig. 2에서 얻은 공명자기장을 사용하면 포화자화, 분광학적 분리인자, 교환상수 등이 계산되는데, 그 결과를 각각 Fig. 4, 5, 6에 나타냈다.

Fig. 4, 5를 보면, 자화의 온도의존성은 Bloch의 법칙과 부합되는 모습을 알 수 있다. 그리고 분광학적 분리인자는 온도 변화에 대해 비교적 무관한 특성을 보였다.

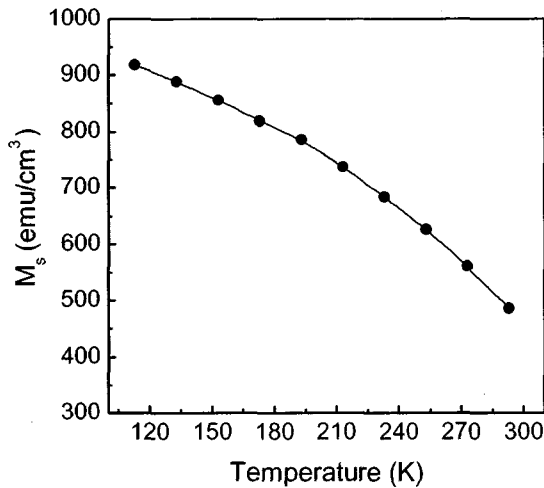


Fig. 4. Saturation magnetizations as a function of the temperature for the 100 nm thick  $Fe_{84}Nb_{16}$  (wt.%) thin films.

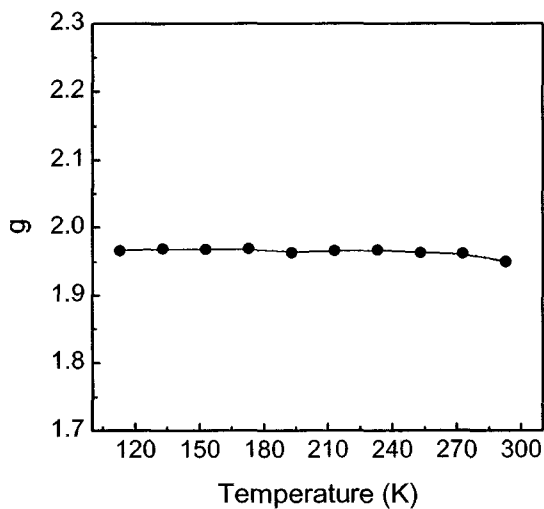


Fig. 5. Spectroscopic splitting factors as a function of the temperature for the 100 nm thick  $Fe_{84}Nb_{16}$  (wt.%) thin films.

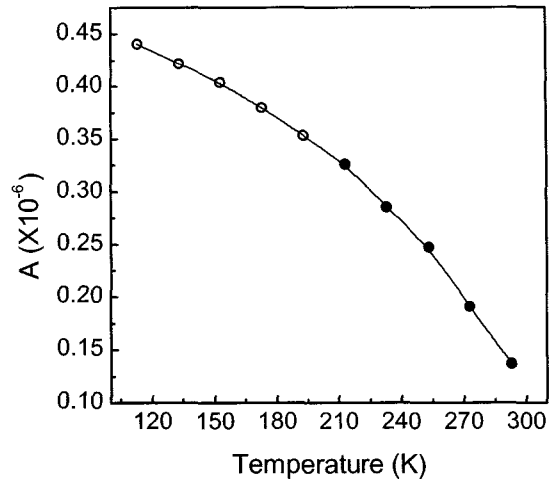


Fig. 6. Exchange stiffness constants as a function of the temperature for the 100 nm thick  $Fe_{84}Nb_{16}$  (wt.%) thin films.

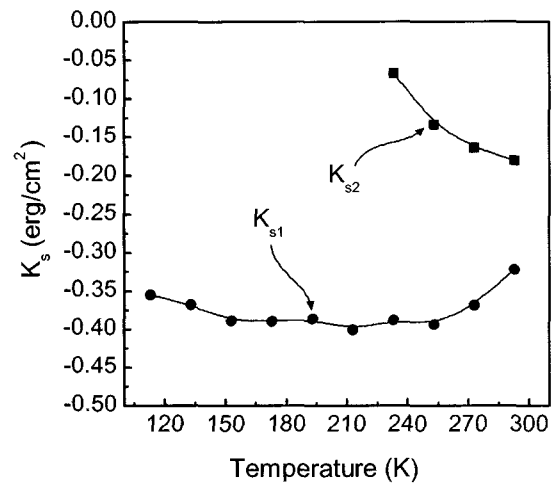


Fig. 7. Surface magnetic anisotropy constants as a function of the temperature for the 100 nm thick  $Fe_{84}Nb_{16}$  (wt.%) thin films.

한편, 온도가 213 K 미만인 영역의 경우, 스핀파의 모습이 매우 복잡한 특성을 보였는데(Fig. 3 참조), 이는  $S_2$ 와 체적 모드가 서로 혼합된 결과로 생각된다. 이 경우 각각의 스핀파에 모드 수를 부여하기가 어려워 스핀파 분석을 할 수 없었다. Fig. 6은 교환상수의 온도의존성을 나타낸 그림인데, 속이 채워진 원으로 표시한 값은 213~293 K 온도구간에서 얻은 스핀파를 분석하여 계산한 결과이며, 속이 빈 원으로 표시한 값은 213~293 K 온도구간에서 얻은 값을 외삽법으로 추정하여 나타낸 값이다.

Fig. 7에 표면 자기 이방성 상수를 나타냈다.  $K_{s1}$ 은 공기와 접하는 표면의 표면 자기 이방성 상수이고,  $K_{s2}$ 는 기판과 접하는 표면의 표면 자기 이방성 상수이다.  $S_2$ 는 온도가 213 K에 도달하면 체적 모드와 완전히 합성되기 때문에, 213 K

이하의 온도영역에서  $K_{s2}$ 를 계산할 수 없었다. 233~293 K 온도구간에서  $K_{s2}$ 는 온도감소에 따라 그 값이 비교적 큰 폭으로 증가하는 특성을 나타냈다. 그리고,  $K_{s1}$ 은 상온에서  $-0.322 \text{ erg/cm}^2$ 인 값을 보이다가, 온도가 253 K로 내려가면  $-0.394 \text{ erg/cm}^2$ 로 감소한 후, 그 이하의 온도영역에서는 온도에 비교적 둔감한 특성을 보였다. 온도변화에 따른  $K_{s1}$ 과  $K_{s2}$ 의 개략적인 거동이 서로 상이한 모습을 보이는데, 이와같은 현상은 강자성 공명 신호의 위치 및 세기에 영향을 주는 다양한 인자들(표면 자기 이방성, 포화자화, 분광학적 분리인자, Gilbert 감쇠인자, 교환상수, 전기비저항 등) 사이의 상호작용이 온도에 따라 변화하는데 그 원인이 있는 것으로 추정되며, 이에 대한 정량적인 계산은 향후의 지속적인 연구를 통해 규명될 과제라고 생각된다.

#### IV. 결 론

113~293 K 온도영역에서 측정된  $\text{Fe}_{84}\text{Nb}_{16}(\text{wt.}\%)$  박막시편의 강자성 공명 흡수선을 분석하여 포화자화, 분광학적 분리인자, 교환 상수, 그리고 표면 자기 이방성 상수 등을 계산했다. 이때 표면 자기 이방성 상수의 계산에는 일축 표면 자기 이방성(uniaxial surface magnetic anisotropy)을 갖는 박막에 적용되는 partially pinning model을 사용했다. 113~293 K 온도영역에서 포화자화는 Bloch의  $T^{3/2}$ 법칙과 부합되는 모습을 보였으며, 분광학적 분리인자는 온도변화에 비교적 작은 변화폭을 보였다. 233~293 K 온도구간에서 기판과 접하는 시편면의 표면 자기 이방성 상수  $K_{s2}$ 는 온도감소에 따라 그 값이 비교적 큰 폭으로 증가하는 특성을 나타냈다. 그리고, 표면 자기 이방성 상수  $K_{s1}$ 은 상온에서  $-0.322 \text{ erg/cm}^2$ 인 값을 보이다가, 온도가 253 K로 내려가면  $-0.394 \text{ erg/cm}^2$ 로 감소한 후 그 이하의 온도영역에서는 온도에 비교적 둔감한 특성을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2003년도 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V. K. Arkad'yev, J. Russ. Phys. Chem. Soc., **45**(103), 312(1913).
- [2] J. H. E. Griffiths, Nature, **158**, 670(1946).
- [3] W. A. Yager and R. M. Bozorth, Phys. Rev., **72**, 80(1947).
- [4] C. Kittel, Phys. Rev., **73**(6), 155(1948).
- [5] C. Kittel, Phys. Rev., **110**(6), 1295(1958).
- [6] M. H. Seavey and P. E. Tannenwald, Phys. Rev. Lett., **1**, 168(1958).
- [7] R. F. Soohoo, Phys. Rev., **131**(2), 594(1963).
- [8] P. E. Wigen, C. F. Kooi, and M. R. Shanabarger, Phys. Rev. Lett., **9**(5), 206(1962).
- [9] A. M. Portis, Appl. Phys. Lett., **2**(4), 69(1963).
- [10] 임우영, 새물리, **6**(2), 63(1966).
- [11] 백종성, 서영수, 김약연, 임우영, 이수형, 한국자기학회지, **4**(2), 101(1994).
- [12] 백종성, 김약연, 이성재, 임우영, 이수형, 한국자기학회지, **5**(6), 968(1995).
- [13] 김약연, 백종성, 이성재, 임우영, 이수형, 한국자기학회지, **7**(1), 39(1997).
- [14] 백종성, 김약연, 이성재, 임우영, 이수형, 한국자기학회지, **7**(3), 129(1997).
- [15] Y. Y. Kim, J. S. Baek, S. J. Lee, W. Y. Lim, S. C. Yu, and S. H. Lee, IEEE Trans. Magn., **33**(1), 3067(1997).
- [16] Y. Y. Kim, J. S. Baek, K. W. Lee, W. Y. Lim, S. C. Yu, and S. H. Lee, J. Appl. Phys., **85**(8), 6004(1999).
- [17] J. S. Baek, C. O. Kim, W. Y. Lim, and S. H. Lee, J. Kor. Phys. Soc., **35**, S252(1999).

## A Study on the Ferromagnetic Resonance of FeNb Thin Films

Woo-Young Lim and Jong-Sung Baek

*Department of Information Electronics, Korea University, Chochiwon 339-799*

Soo-Hyung Lee

*Department of Physics, Choungju University, Cheongju 360-764*

(Received 21 June 2004, in final form 30 July 2004)

In order to understand the temperature dependence of magnetic properties of  $\text{Fe}_{84}\text{Nb}_{16}$ (wt.%) thin films, ferromagnetic resonance experiments have been carried out. The ferromagnetic resonance spectra for all temperatures consist of several volume modes and one (or two) surface modes. It is suggested that both surface of the film have a perpendicular hard axis to the film plane (negative surface magnetic anisotropy). Saturation magnetization coincides with the Bloch's  $T^{3/2}$  law and spectroscopic splitting factor is almost constant in the temperature range from 113 K to 293 K. The surface magnetic anisotropy constant  $K_{s2}$  of the film-substrate interface increased with decreasing temperature in the temperature range from 233 K to 293 K. The surface magnetic anisotropy constant  $K_{s1}$  of the air-substrate interface decreased from  $-0.322 \text{ erg/cm}^2$  to  $-0.394 \text{ erg/cm}^2$  as the temperature decreased to 253 K and was almost constant below 233 K.

**Key words :** FeNb thin film, ferromagnetic resonance, spectroscopic splitting factor, surface magnetic anisotropy