

## CoZr/Ag/CoCr 삼층박막의 교환결합

백종성 · 박용성 · 임우영

고려대학교 자연과학대학 물리학과  
충남 연기군 조치원읍 서창동 208, 339-700

이수형

청주대학교 이공대학 물리학과  
충북 청주시 상당구 내덕동 36, 360-764

김종오

충남대학교 공과대학 재료공학과  
대전시 유성구 궁동 220, 302-764

(1998년 10월 30일 받음, 1998년 12월 2일 최종수정본 받음)

직류 및 고주파 마그네트론 스파터링 방법으로 제조한 CoZr/Ag/CoCr 삼층박막에 대해, 강자성 공명 실험을 수행함으로써 비자성층인 Ag 층의 두께변화가 CoZr 층과 CoCr 층 사이의 교환결합(exchange coupling)에 미치는 영향을 고찰했다. CoZr/Ag/CoCr 삼층박막에서 층간 결합세기(coupling strength)  $K'$ 은 Ag 층의 두께가 증가함에 따라 급격히 증가하여 Ag 층의 두께가 10 Å일 때, 최대값 748 Oe을 보였다. Ag 층의 두께가 20~100 Å인 영역에서  $K'$ 은 진동하는 모습을 보이는데, 이와 같은 특성은 80Ni-Fe/Cu/Co 다층박막에 대해 H. Koizumi 등이 관측한 결과와 유사한 모습으로서, 그 원인규명을 위해 지속적인 연구가 요망된다고 생각한다. 그리고, Ag 층의 두께가 100 Å 이상 증가하면 층간 상호작용은 0으로 수렴하는 모습을 보인다. 모든 시료에 대해  $K'$ 은 0보다 큰 특성을 보이므로, CoZr 층과 CoCr 층 사이의 상호작용은 강자성 결합으로 해석된다.

### I. 서 론

최근, 자성층/비자성층/자성층 구조를 갖는 삼층박막 및 다층박막에서 비자성층이 자성층의 층간 상호작용(interlayer coupling)에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 진행되고 있다[1-3].

자성층 사이의 층간 상호작용은 강자성 공명(ferromagnetic resonance; FMR)[4, 5], SQUID[6], 표면 자기 광 Kerr 효과(surface magneto-optical Kerr effect; SMOKE)[7], 그리고 자기저항(MR)[8] 측정 등을 사용하여 고찰할 수 있다. 특히, 강자성 공명신호의 공명자기장과 세기는 강자성층 사이의 교환결합(exchange coupling)에 매우 민감한 특성을 가지므로, 강자성 공명 실험은 강자성층 사이의 교환결합을 고찰하는데 매우 유용하다.

이 분야에 대해 보고된 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. Z. Zhang 등은 FMR 및 VSM을 이용하여, Co/Ru/Co 삼층박막의 층간 상호작용을 연구했는데, Co/Ru/Co 삼층박막에서 Co 층 사이의 층간상호작용은

Ru 층의 두께증가에 따라 선형적으로 비례하는 현상을 관측했다[2]. E. Gan'shina 등은 SMOKE와 FMR을 이용하여 Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>/Ag 다층박막의 층간상호작용을 조사했는데, 자성층 사이의 층간상호작용은 Ag 층의 두께가 증가함에 따라 비선형적으로 변화하며, Ag 층의 두께가 11, 12, 13 Å일 때 반강자성 결합(antiferromagnetic coupling)이 나타나는 현상을 관측했다[7].

본 연구에서는 직류 및 고주파 마그네트론 방법으로 제조한 CoZr(300 Å)/Ag( $t_{Ag}$ )/CoCr(300 Å) ( $t_{Ag} = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 100, 150$  Å) 삼층박막에 대해 강자성 공명실험을 수행함으로써, Ag 층의 두께변화가 CoZr과 CoCr 사이의 층간 상호작용에 미치는 효과를 고찰했다.

### II. 실험

본 연구에서는 직류 및 고주파 마그네트론 스파터링 장치를 사용하여 CoZr/Ag/CoCr 삼층박막을 제작하였다. 이때 Co<sub>89</sub>Zr<sub>11</sub>(at.%) 및 Co<sub>85</sub>Cr<sub>15</sub>(at.%) 층은 직류

마그네트론 스파터링 방법으로 제조했으며, Ag 층의 제조과정에는 두께조절이 용이한 고주파 마그네트론 스파터링 방법을 사용했다. CoCr 스파터링 타겟은 합금형이고, CoZr 스파터링 타겟은 직경 100 mm의 Co-plate위에 5 mm×5 mm 크기의 Zr-소편(chip)을 적절히 배치하여 제작한 복합모드형을 사용했다. 박막제작시 배경압력(background pressure)은  $7 \times 10^{-7}$  Torr, 아르곤 압력(working gas pressure)은 10 mTorr 였다. 투입전력은 CoZr 및 CoCr 층의 제조과정에 65 W, Ag 층의 제조과정에 20 W 이었다. 이와 같은 제작조건에서 스파터링 시간을 조절하여 CoZr 및 CoCr 층의 두께가 300 Å이 되도록 하였다. 그리고, Ag 층의 두께는 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 100, 150 Å으로 변화시켜 주었다.

한편, 시료의 유효자화, 자기회전비, 그리고 층간결합상수(interfacial coupling constant) 등과 같은 물리상수를 고찰하기 위하여 다음과 같은 강자성공명 실험을 수행했다. 먼저, 강자성 공명실험을 하기 전에 시료진동형자력계를 사용하여 시료가 포화되는데 필요한 자기장의 범위를 고찰하여 강자성 공명실험에 사용할 마이크로파의 주파수를 결정하는데, 본 연구에 사용된 시료에 대해 공명조건을 고려한 결과 X-band(~9.44 GHz) 마이크로파가 적절함을 알 수 있었다. 그리고, 직경이 3 mmφ인 디스크형 시료를 석영봉에 부착한 후, 마이크로파와 정자기장이 서로 직교하는 공동(TE<sub>011</sub>) 내에 위치시킨 채, 0~15,000 Oe의 정자기장 영역에서 미분형 공명신호를 관측했다. 이와 같은 방법으로 정자기장의 방향을 시료면에 대해 수직 및 수평 하계 유지시켜 주면서 실험을 반복했다.

### III. 결과 및 논의

Fig. 1과 같이 자성층(A-층)/비자성층/자성층(B-층) 구조를 갖는 삼층박막에서 자성층 사이의 층간결합상수(interfacial coupling constant) K와 결합세기(coupling strength) K'은 다음과 같은 관계를 만족한다[1, 3]

$$K = K' \sqrt{\frac{M_{effA} M_{effB}}{t_A t_B}} \quad (1)$$

여기서,  $M_{effA}$  및  $M_{effB}$ 는 각각 A-층과 B-층의 유효자화로서 단층막의 강자성공명실험에서 구해진다. 그리고  $t_A$  및  $t_B$ 는 A-층과 B-층의 두께이다. K'이 양수이면 자

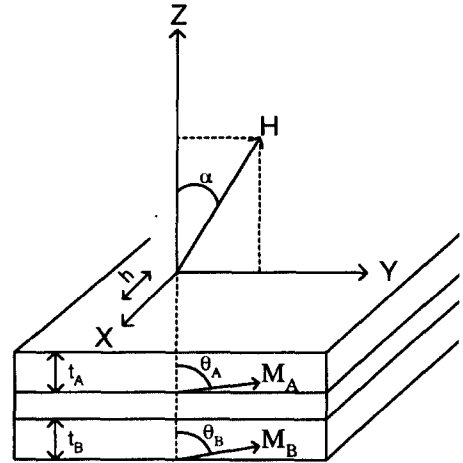


Fig. 1. The coordinate system and the structure of tri-layered film.

성층 사이의 상호작용은 강자성 결합(ferromagnetic coupling)이고, 음수이면 반강자성 결합(antiferromagnetic coupling)을 의미한다. 이때, K는 삼층박막의 강자성공명실험결과를 다음 식에 적용하므로써 구할 수 있다[1, 3].

$$(\Omega_A^2 - X^2)(\Omega_B^2 - Y^2) - K [2(XM_B \Omega_B^2 + YM_A \Omega_A^2) - 2XY(YM_B + XM_A)] - K^2[(M_A \Omega_A + M_B \Omega_B)^2 - (XM_A + YM_B)^2] = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$\Omega_A = \frac{t_A \omega}{\gamma_A}$$

$$\Omega_B = \frac{t_B \omega}{\gamma_B}$$

$$X = t_A(H_{rA} + H_{kA})$$

$$Y = t_B(H_{rB} + H_{kB})$$

$H_k'$  : 유효 이방성 자기장

$H_r$  : 공명 자기장

이다.

CoCr과 CoZr의 유효 이방성 자기장  $H_k'$ , 유효자화  $M_{eff}$  그리고 자기회전비  $\gamma$ 는 단층박막의 강자성 공명 실험결과를 다음 공명조건에 적용하므로써 구해진다 [9, 10].

1) 자기장을 시료면에 수직인 방향으로 인가한 경우 :

$$\frac{\omega_r}{\gamma} = H_r(\perp) + H_k' \quad (3)$$

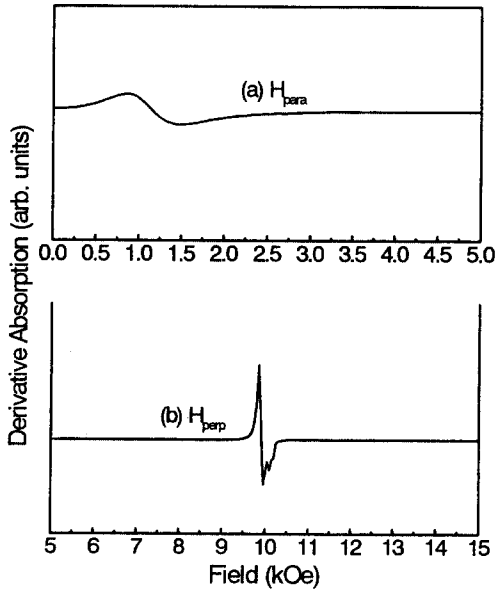


Fig. 2. Ferromagnetic resonance spectra of 300 Å thick CoCr single layer : (a) at parallel configuration and (b) at perpendicular configuration.

2) 자기장을 시료면에 수평한 방향으로 인가한 경우 :

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_r(\parallel)[H_r(\parallel) - H_k] \quad (4)$$

CoCr 및 CoZr 단층박막의 강자성공명 실험결과를 Fig.

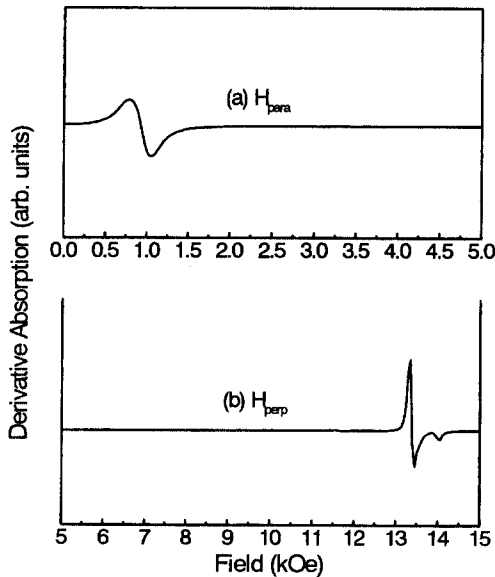


Fig. 3. Ferromagnetic resonance spectra of 300 Å thick CoZr single layer : (a) at parallel configuration and (b) at perpendicular configuration.

Table 1. Effective magnetic anisotropy field  $H_k'$ , effective magnetization  $M_{eff}$ , and magnetogyric ratio  $\gamma$  calculated by FMR measurements

	CoCr	CoZr
$H_k'$ (kOe)	6.86	10.19
$M_{eff}$ (emu/cc)	546	811
$\gamma$ (GHz/kOe)	19.53	18.50

2, 3에 각각 나타냈는데, 여기서 구한 공명 자기장을 식 (3), (4)에 대입하여 계산한 유효 이방성 자기장  $H_k'$ , 유효자화  $M_{eff}$ , 그리고 자기회전비  $\gamma$ 를 Table 1에 나타냈다.

CoCr/Ag/CoZr 삼층박막에 대해 박막면에 수평한 방향으로 정자기장을 인가하면서 구한 강자성 공명 실험결과를 Fig. 4에 나타냈다. 여기서 보면, Ag 층의 두께가 0 및 5 Å인 경우, 두 자성층의 공명자기장이 약간 다른 모습을 보이거나, 10 Å 이상에서는 그들이 서로 혼합되어 각각의 공명자기장을 구분할 수 없다. 따라서, 정자기장을 박막면에 수평한 방향으로 인가하면서 층간 상호작용을 조사하는 방법[1]을 본 시료에 적용하는 것은 곤란하다.

박막면에 수직한 방향으로 정자기장을 인가하면서 고찰한 강자성 공명실험 결과를 Fig. 5에 나타냈는데, 여기서 보면 두 신호가 명확히 구분되고, 공명자기장이 Ag 층의 두께 증가에 따라 변화하는 모습을 보인

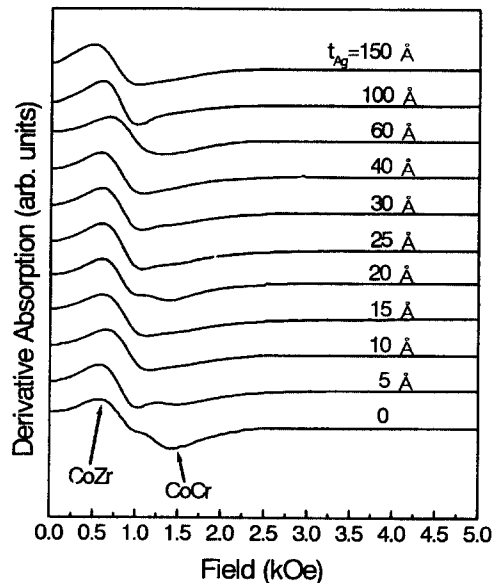


Fig. 4. Ferromagnetic resonance spectra of CoZr/Ag/CoCr trilayered films at parallel configuration.

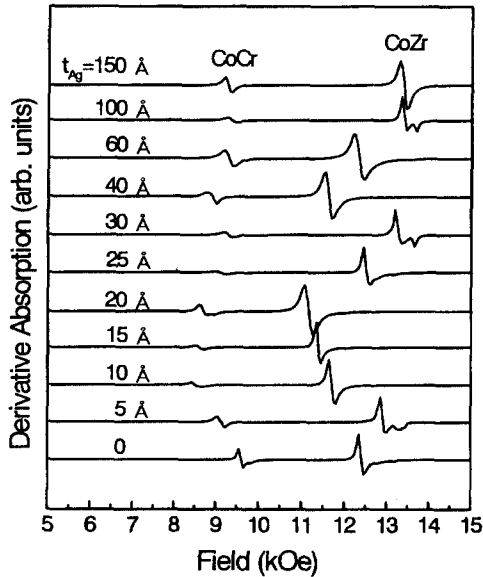


Fig. 5. Ferromagnetic resonance spectra of CoZr/Ag/CoCr trilayered films at perpendicular configuration.

다. Fig. 5에서 낮은 자기장 영역에 나타난 신호는 CoCr층의 공명신호이고, 높은 자기장 영역에서 나타난 신호는 CoZr층에 대응되는 공명신호이다. Ag층의 두께가 0인 경우, 두 신호의 공명자기장이 CoCr 및 CoZr 단층박막의 공명자기장에 비해 약간 낮은 자기장 영역으로 이동하는 모습을 보이는데, 이는 CoCr 및 CoZr 단층박막 사이의 계면효과에 의한 결과로 해석된다. Ag층의 두께가 점차 증가함에 따라 두 신호의 공명자기장은 서로 유사한 경향을 보이며 변화한다. 즉, Ag층의 두께가 60 Å까지 증가하는 동안 두 신호의 공명자기장은 Ag층의 두께증가에 따라 동시에 낮은 자기장 영역으로 또는 높은 자기장 영역으로 이동하는 경향을 보인다. 그리고, Ag층의 두께가 100 Å이상 증가하면 두 신호의 공명자기장은 일정한 모습을 보인다. 이와 같은 모습을 고려해 볼 때, CoZr/Ag/CoCr 삼층박막은 비자성층인 Ag층의 두께변화에 따라 CoCr과 CoZr층 사이에 강자성결합이 변화함을 알 수 있다.

이와 같이 구해진 공명자기장과 단층박막의 실험결과를 식(1), (2)에 대입하여 계산한 층간 결합세기  $K'$ 을 Fig. 6에 나타냈다. 여기서 보면, 모든 시료에 대해  $K'$ 이 양수인 특성을 보이므로, 본 실험에 사용한 CoZr/Ag/CoCr 삼층박막의 경우 CoCr과 CoZr층 사이의 상호작용은 강자성 결합임을 알 수 있다. Ag층의 두께

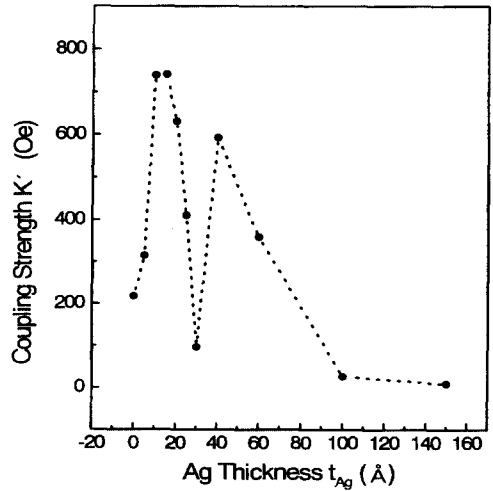


Fig. 6. Coupling strength  $K'$  as a function of Ag thickness  $t_{Ag}$  for CoZr/Ag/CoCr trilayered films.

가 증가함에 따라  $K'$ 은 급격히 증가하여 Ag층의 두께가 10 Å일 때, 최대값 748 Oe을 보인다. 한편, Ag층의 두께가 20~100 Å인 영역에서는 그 값이 진동하는 모습을 보이는데, 이와 같은 특성은 80Ni-Fe/Cu/Co 다층박막에 대해 H. Koizumi 등이 관측한 결과와 유사한 모습으로서[8], 그 원인규명을 위해 지속적인 연구가 요망된다고 생각한다. 그리고, Ag층의 두께가 100 Å이상 증가하면 층간 상호작용은 0으로 수렴하는 모습을 보인다.

#### IV. 결 론

강자성 공명 실험을 사용하여, CoZr/Ag/CoCr 삼층박막에서 비자성층인 Ag층의 두께변화가 자성층 사이의 층간 상호작용에 미치는 효과를 고찰한 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

CoZr/Ag/CoCr 삼층박막에서, CoZr과 CoCr층 사이의 상호작용은 강자성 결합으로 나타났다. 그리고 층간 결합세기  $K'$ 은 Ag층의 두께가 증가함에 따라 급격히 증가하여 Ag층의 두께가 10 Å일 때, 최대값 748 Oe을 보였다. Ag층의 두께가 20~100 Å인 영역에서  $K'$ 은 진동하는 모습을 보이는데, 이와 같은 특성은 80Ni-Fe/Cu/Co 다층박막에 대해 H. Koizumi 등이 관측한 결과와 유사한 모습으로서, 그 원인규명을 위해 지속적인 연구가 요망된다고 본다. 그리고, Ag층의 두께가 100 Å 이상 증가하면 층간 상호작용은 0으로 수렴한다.

### 감사의 글

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단 대학부설연구  
소과제(중점과제) 연구비의 지원에 의해 수행되었다.

### 참고 문헌

- [1] A. Layadi and J. O. Artman, *J. Magn. Magn. Mater.* **92**, 143(1990).
- [2] Z. Zhang, L. Zhou, P. E. Wigen, and K. Ounadjela, *Phys. Rev. B*, **50**(9), 6094(1994).
- [3] A. Layadi and J. O. Artman, *J. Phys. D* **30**, 3312(1997).
- [4] A. Layadi, *J. Appl. Phys.* **83**(7), 3738(1998).
- [5] A. Layadi and J. O. Artman, *J. Magn. Magn. Mater.* **176**, 175(1997).
- [6] J. J. Krebs, D. M. Lind, and S. D. Berry, *J. Appl. Phys.* **73**(10), 6457(1993).
- [7] E. Gan'shina and V. Guschin, *J. Magn. Magn. Mater.* **165**, 346(1997).
- [8] H. Koizumi, Y. Ando, and T. Miyazaki, *J. Magn. Magn. Mater.* **164**, 293(1996).
- [9] 백종성, 김약연, 임우영, *한국자기학회지* **3**(2), 125(1993).
- [10] 백종성, 김약연, 이성재, 임우영, 이수형, *한국자기학회지* **4**(2), 968(1994).

## Exchange Coupling in CoZr/Ag/CoCr Trilayered Films

Jong-Sung Baek, Yong-Sung Park and Woo-Young Lim

*Department of Physics, Korea University, Chochiwon 339-700, Korea*

Soo-Hyoung Lee

*Department of Physics, Chongju University, Cheongju 360-764, Korea*

Chong-Oh Kim

*Department of Material Engineering, Chungnam National University, Taejon 302-764, Korea*

(Received 30 October 1998, in final form 2 December 1998)

For CoZr/Ag/CoCr trilayered films deposited by DC and RF magnetron sputtering method, ferromagnetic resonance experiments have been used to investigate the dependence of the exchange coupling between CoZr and CoCr layers separated by Ag layer on the thickness of the Ag layer. The coupling strength  $K'$  increases with increasing Ag thickness up to 10 Å with a maximum value of 748 Oe, but oscillates with increasing Ag thickness in the range from 20 to 100 Å. The coupling strength is positive for all samples. Hence, it seems that the exchange coupling between CoZr and CoCr layers separated by Ag layer is ferromagnetic.