

Cu/Co 다층 박막에서의 거대 자기 저항과 자기 비등방성

박춘만*

서남대학교 컴퓨터 물리학과, 전라북도 남원시 광치동 590-711

(2003년 9월 30일 받음, 2003년 11월 5일 최종수정본 받음)

Si(001) 기판 위에 길러진 거대 자기 저항을 가지는 Co/Cu 다층 자성 박막에서 관측된 특이한 GMR 효과를 기판과 박막사이의 경계면 효과를 도입한 간단한 모형으로 설명하였다. 이 모형과 실험으로부터 자기 상수들을 구하였으며, 얻어진 상수들을 다른 논문에서 보고되어진 값들과 비교하였다. 제시된 모형은 경계면에 의해 유도된 다수의 easy axes를 갖는 다른 GMR 물질에도 적용할 수 있으며, 이 모형을 이용하여 기판 물질과 기판의 평면을 적절히 선택함으로써 자기 저항을 조절할 수 있는 새로운 방법을 찾을 수 있다고 판단된다.

주제어 : 자성다층박막, GMR, 경계면, 자기 비등방성

I. 서 론

거대 자기 저항(GMR) 효과를 갖는 물질들은 자기적 현상을 전기적 신호로 변환시킬 수 있어 자기 기록 매체로 활용이 가능하기 때문에 상업적으로 과학적으로 매우 광범위하게 연구되어지고 있다[1]. 특히 GMR 물질 중 강자성 금속과 비자성 금속으로 이루어진 자성 다층 박막은 특이한 GMR 성질을 갖고 있어 실험적, 이론적으로 활발히 연구되어지고 있다.

Holloway와 Kubinski는 최대 GMR 값의 비가역적 감소를 설명하기 위하여 magnetic easy axes가 임의의 방향을 갖는 다결정 다층 모형을 제시한 바가 있으며[2], Borchers는 약하게 결합된 Co/Cu 다층 박막에서 Co 자성 박막 층 사이에는 반자성 상호 작용이 있음을 보고하는 등[3] 자성 다층 박막에서 나타나는 여러 가지 특이한 GMR 효과를 설명하기 위하여 다양한 설명이 시도되고 있지만, 현재까지도 GMR에 미치는 자기 이방성의 영향, GMR 극대값의 비가역적 감소 등 여러 가지 현상이 명백하게 밝혀져 있지 않다. 특히 자성 박막을 기판 위에 증착시키는 경우 기판의 결정학적 구조가 자성 다층 박막의 자기 이방성과 같은 자기적 성질에 영향을 미치고, 변화된 자기 이방성은 자기 모멘트의 정렬에 영향을 줌으로서 GMR 효과에 영향을 줄 것으로 예상할 수 있지만, 아직까지 GMR 효과에 대한 경계면의 영향이 구체적으로 계산되어져 있지 않다[4]. GMR 효과에 대한 경계면의 영향과 관련하여 Si(001) 평면에 길러진 Co/Cu 다층 박막에서 최대 자기 저항 값이 외부 자기장의 방향에 대하여 특이한 각도 의존성을 갖는다는 실험 결과가 보고되었다[5]. 본 논문에서는 Co/Cu 다층 박막의 적층 구조를 변화시킴에 따라 어떻게 GMR 값이 변화하는지를 관찰한 후, 이의 결과를 분석함으로

서 Si/Co에서의 경계면이 GMR 효과에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다.

II. 경계면에 의한 GMR값의 변화

자성 다층 박막 $[\text{Co}(15\text{\AA})/\text{Cu}(20\text{\AA})]_{30}$ 은 0.5 Pa Ar 가스 분위기에서 UHV dc magnetron getter-sputtering system을 이용하여 상온에서 (001) Si 기판 위에 증착되었으며, 박막의 적층 구조는 Table I과 같다.

$MR(H)$ 값을 외부 자기장의 방향을 변화키면서 측정하였으며, 그림 1은 각도의 변화에 따른 최대 GMR 비(MR_{max})를 나타낸다. 이때 $MR(H)$ 는

$$MR(H) = \frac{R(H) - R(H_{sat})}{R(H_{sat})} \quad (1)$$

로 정의되는 GMR 비이다. 박막 1에서 $\phi = 0$ 주변에서 나타나는 두 극대치는 박막에 존재하는 두 개의 easy axes의 존재를 의미한다. 그림 1에 보여지는 바와 같이 MR_{max} 는 증착된 금속과 Si 기판과의 경계면에 매우 민감하게 반응한다. 특히 박막 1과 박막 4의 유일한 차이가 Si 기판과 첫 번째 Co층 사이의 Cu 박막의 존재임을 고려한다면 시료 1과 시료 4의 MR_{max} 의 차이는 놀라운 것이다. 이러한 차이는 박막 4의 경우 자성 Co 박막층과 Si 기판이 직접 접촉하고 이로인해 Co의 날알들의 자기적 배열이 Si 기판으로부터 영향을 받았기

Table I. The stacking structure of the film

sample	stacking structure
1	Si/[15 Å Co/20 Å Cu] ₃₀
2	Si/[15 Å Co/20 Å Cu] ₃₀ /Co
3	Si/[20 Å Cu/15 Å Co] ₃₀
4	Si/[20 Å Cu/15 Å Co] ₃₀ /Cu

*Tel: (063)620-0182, E-mail: cmpark@seonam.ac.kr

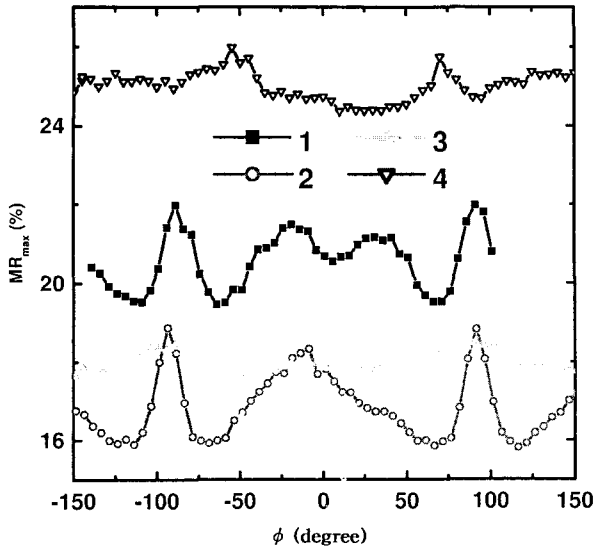


Fig. 1. Angular modulation of GMR maximum for all four samples [5].

때문이라고 가정할 수 있다. 박막 1의 경우 경계면에 있는 비자성 Cu층이 자성 Co층과 Si 기판 사이의 구조적인 완충 역할을 하므로, 박막 4에서 나타나는 Co와 Si의 경계면 효과를 감소시킨 것으로 판단된다. 따라서 박막 1과 박막 4의 MR값으로부터 두 MR의 차이, 즉 Co/Si 경계면에 기인하는 것으로 판단되는 MR을 계산 할 수 있으며, 이를 그림 2에 나타내었다.

III. 경계면에 의한 GMR 값 변화에 대한 이론적 모형

GaAs(001)평면에 증착된 Co 박막에서 four-fold 자기 비등방성을 가진 BCC Co상이 나타난다고 Wu등이 보고하였다 [6]. 이 결과는 GaAs와의 경계면에 존재하는 Co의 낱알들은 무질서하게 배열하는 것이 아니라 Co의 easy axes가 [100]와 [010]축 주변으로 집중하여 분포하도록 배열한다는 의미이다. 따라서 Kang등의 실험에서도 [5] 이와 유사하게 Si(001) 평면과의 경계면에 존재하는 Co 낱알들의 easy axes는 Si [100]축과 [010] 축 주위에 보다 많이 분포하고 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 Co 낱알들의 easy axes가 Si [100]축과 [010] 축 주위로 가우스 분포를 하고 있다고 가정하고 무질서하게 easy axes가 분포하고 있는 다른 낱알들은 기판의 회전에 따른 MR의 변화에는 무관하기 때문에 무시한다. 자기 저항의 각도 의존성을 계산하기 위하여, Holloway등과 유사하게 단위 면적당 에너지를 도입하였다[2]. 먼저 단일의 결정화적인 방향을 가지며 박막의 면에서 같은 easy axes 방향을 갖는 Si/Co/Cu/Co/Cu 박막의 에너지를 고려하였다. 외부 자기장의 방향을 x 축으로 잡고, 경계면의 Co

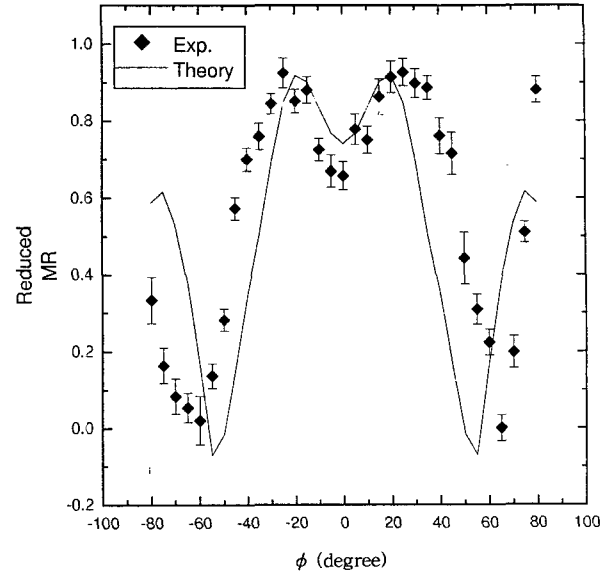


Fig. 2. Difference in MR values of sample 1 and sample 4. Solid line represents the theoretical fitting.

층과 그 다음 Co층의 자화 방향이 x축에 대하여 각각 θ_1 과 θ_2 로 변한다고 가정하였다. 이러한 모든 요소들을 결합하면 외부 자기장 H 가 존재할 경우 Co/Cu/Co/Cu의 단위 면적당 에너지의 관계식

$$E = -mt_{Co}H \cos \theta_1 + K_{\alpha 1} t_{Co} \sin^2(\theta_1 - \phi) + K_{\alpha 2} t_{Co} \sin^4(\theta_1 - \phi) - mt_{Co}H \cos \theta_2 + K_{\alpha 1} t_{Co} \sin^2(\theta_2 - \phi) + K_{\alpha 2} t_{Co} \sin^4(\theta_2 - \phi) - J_{af} \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 m 은 t_{Co} 의 두께를 갖는 Co층의 포화 자기장, K_{α} 는 비등방성 상수, 그리고 J_{af} 는 인접한 Co층들 사이의 반자성 교환 상호작용 상수, ϕ 는 Si 기판의 [100]축과 외부자기장 사이의 각이다. 식 (2)와 이미 알려진 Co의 포화 자기화 $m = 1300 \text{ emu/cm}^3$ [6], Co 낱알들의 easy axes가 Si [100]축과 [010]축 주위에 가우스 분포를 하고 있다는 가정으로부터 주어진 외부자기장의 세기 H 와 각도 ϕ 에서 에너지의 최소값이 나타나는 각 θ_1 과 θ_2 를 얻었다. 이러한 계산을 외부 자기장의 세기를 -500 Oe 에서 500 Oe 까지 5 Oe 씩 변화시키면서 반복 계산하여 반자성 질서매움상수

$$AF(H) = \frac{1}{2} [1 - \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (3)$$

와 반자성 질서 매움 상수에 비례하는 $MR(H)$ 를 구하였다. $MR(H)$ 로부터 최대 MR 값인 MR_{max} 를 구하였으며, 이러한 계산을 ϕ 를 5° 씩 변화시켜 계산함으로써 이론적인 $MR_{max}(\phi)$ 를 얻었다(그림 2). 경계면 효과를 도입한 간단한 모형으로부터 구한 MR_{max} 는 실험에서 관측된 MR_{max} 와 정확하게 일치

하지는 않으나 ϕ 의 변화에 따른 MR_{max} 의 변화는 비교적 잘 설명한다. 이로부터 박막 4에서 관측된 MR_{max} 의 특이한 변화는 Si 기판과 Co의 경계면에 의한 효과로 판단된다. 또한 관측된 MR_{max} 값과 최소 자승법을 이용하여 주어진 Co/Cu 박막의 자기 변수를 결정하였으며, 각각 $K_{a1} = 5.0 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $K_{a2} = 0.6 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $J_{af} = 0.044 \text{ erg/cm}^3$ 를 얻었다. 이 값들은 다른 논문에서 보고된 Co의 자기 변수 $K_{a1} = 5.0 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ [7], $J_{af} = 0.05 \text{ erg/cm}^3$ [8]와 같은 크기의 값을 가진다.

IV. 결 론

본 논문에서 Si(001) 기판에 길러진 Co/Cu 자성 다층 박막에서 관측된 특이한 GMR 현상을 설명할 수 있는 간단한 모형을 기판과 박막의 경계면의 효과를 고려하여 제시하였으며, 이로부터 Co/Cu 자성 박막의 자기 상수 $K_{a1} = 5.0 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $K_{a2} = 0.6 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $J_{af} = 0.044 \text{ erg/cm}^3$ 를 얻었다. 또한 계산 결과는 기판에 의해 유도된 자기 비등방성은 Co/Cu 자성 다층 박막에서 관측되는 자기 저항의 급격한 비정상적인 변이의 원인이 될 수 있음을 보여준다. 이러한 모형은 기판에 의해 유도된 다수의 easy axes 분포를 갖는 다

른 자성 박막에 적용될 수 있다고 생각되며, 이 모형을 이용하여 기판 물질과 기판의 평면을 적절히 선택함으로써 자기 저항을 조절할 수 있는 새로운 방법을 찾을 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Prinz, *Science* **282**, 660(1998).
- [2] H. Holloway and D. J. Kubinski, *J. Appl. Phys.* **83**, 2705 (1998).
- [3] J. A. Borchers, J. A. Dura, J. Unguris, D. Tulchinsky, M. H. Kelley, C. F. Majkrzak, S. Y. Hsu, R. Roloee, W. P. Pratt Jr. and J. Bass, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2796(1999).
- [4] Z. Zang, W. Zheng, G. Zhang, A. Wang, L. Xi, J. Chen and S. Ge, *J. Magn. Magn. Mat.* **198-199**, 49 (1999).
- [5] S. J. Kang, K. Y. Kim, W. T. Ye and J. Lee, *J. of Magnetism* **5**, 135(2000).
- [6] Y. Z. Wu, H. F. Ding, C. Jing, D. Wu, G. S. Dong, X. F. Jin, K. Sun and S. Zhu, *J. Mag. Mat.* **198**, 297(1999).
- [7] J. A. Wolf, J. J. Krebs and G. A. Prinz, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 1057(1994).
- [8] Z. Q. Qui, J. Pearson and S. D. Bader, *Phys. Rev.* **B46**, 8659 (1992).

Substrate-induced Magnetic Anisotropy and GMR Effects in Cu/Co Multilayers

C. M. Park*

Dept. of Physics, Seonam University, Namwon 590-701 Korea

(Received 30 September 2003, in final form 5 November 2003)

The anomalous angular modulation of magnetoresistance in Co/Cu multilayers is explained assuming substrate-induced magnetic anisotropy. The magnetic parameters of Co/Cu multilayers is determined using angular modulation of magnetoresistance and theoretical model including substrate-induced anisotropy. This mechanism introduces a new possible way of modulating the giant magnetoresistance.

Key words : magnetic multilayer, GMR, substrate-induced magnetic anisotropy.