

[Pd/Co]_N/FeMn 다층막에서의 교환바이어스 수직자기이방성과 열적안정성

주호완* · 안진희 · 김보근 · 김선욱 · 이기암

물리학과, 단국대학교, 안서동, 천안 330-714

황도근 · 이상석

컴퓨터전자물리학과, 상지대학교, 우산동, 원주 220-702

(2004년 6월 4일 받음, 2004년 6월 30일 최종수정본 받음)

본 연구는 [Pd/Co]_N/FeMn 구조의 다층박막을 dc 마그네트론 스퍼터링 시스템으로 증착하여 교환결합된 수직이방성에 대한 자기적 특성과 열적안정성을 조사하였다. 반강자성 FeMn 두께를 0~21 nm에서 변화시키면서 측정된 결과 Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm)에서 127 Oe 교환바이어스세기(exchange biasing field: H_{ex})를 얻었다. 그리고 이 구조에서 열적 안정성을 조사하기 위하여 온도 변화에 따른 H_{ex} 변화를 확인한 결과, 240°C까지는 H_{ex}가 115 Oe에서 195 Oe까지 증가하였고, 그 이후 330°C에서 교환 결합된 수직자기이방성 곡선이 사라지는 것을 관찰하였다.

주제어 : 수직자기이방성, 교환바이어스, 보자력, 다층막, 열처리효과

I. 서 론

강자성/반강자성체 사이의 교환바이어스는 최근까지도 magnetoelectronics devices로의 광범위한 응용성 때문에 활발히 연구되고 있다. 반강자성체에 기인하여 발생하는 교환바이어스 효과는 강자성체가 반강자성체와 접하면서 두 자성층 사이 계면에서의 상호작용으로 인하여 발생한다. 여기에서 반강자성층 스핀들은 강자성-반강자성 상호작용에 대해 외부자장과 약한 결합을 한다. 이러한 두 물질의 계면에서 교환바이어스의 거시적인 관찰은 히스테리 곡선의 shift 된 정도로 관찰한다.

교환바이어스 효과에 대한 일반적인 연구는 제작시 인가자장을 막 평면과 수평하게 인가하여 막 평면 방향으로 일축 이방성을 유도하여, 반강자성체 위에 막 평면으로의 자화 용이축(easy-axis)을 갖은 강자성층 사이의 계면에서의 교환결합력에 대한 연구가 거의 대부분 보고 되어져 왔다. 하지만 최근에는 NiO, CoO, 그리고 FeMn과 같은 반강자성체 위에 [Pd/Co] 다층박막의 구조에서 막 평면에 대해 수직의 수직자기이방성을 갖는 교환바이어스가 관찰 보고 되어지고 있다[1-3]. 이러한 수직자기 교환바이어스를 갖는 박막은 자기 박막 센서나 초고밀도 자기 기록 매체에 많은 응용성을 가지고 있기 때문에 활발히 연구되어지고 있다. 하지만 미시적인 자기현상은 아직까지도 모든 현상에 대해 설명되어진 것은 아니며, 이러한 이유로 앞으로도 많은 발전 가능성을 가지고 있다.

본 논문은 반강자성층으로 FeMn을 이용하여 반강자성층이 꼭대기와 바닥층으로 위치할 때 교환 결합된 [Pd/Co] 다층막 구조에서 수직자기이방성의 반강자성층 두께 의존성과 열처리를 통한 온도 의존성, 그리고 반강자성층과 [Pd/Co] 다층막 사이에 Pd를 삼입되었을 때의 보자력(coercivity: H_c)과 H_{ex}의 변화를 관찰하였다.

II. 실험방법

Ta/[Pd/Co]_N/FeMn/Ta 구조의 다층박막은 3인치 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템을 사용하여 1.5 mm×1.5 mm 크기의 코닝 1737 글래스 기판 위에 실온에서 증착하여 제작하였다. 기판의 불순물을 제거하기 위하여 아세톤, 에탄올, 증류수를 사용하여 초음파 세척기로 세척하여 준비하였으며, 다층박막 증착 시 일정한 형태를 만들기 위하여 제작된 마스크를 사용하여 증착하였다. 증착 시 초기 진공도는 9.0×10⁻⁷ Torr 이하를 유지하였으며, 작업진공도는 Ar 유입량을 MFC(Mass Flow Controller)로 제어하여 2.0×10⁻⁴ Torr에서 증착하였다. 시편 제작에 사용된 타겟은 모두 crax사의 제품을 사용하였으며, 각 층 Ta, Pd, Co, 그리고 FeMn의 증착조건은 각각 16 W(1.0Å/s), 17 W(1.4Å/s), 18 W(1.7Å/s) 그리고 16 W(1.0Å/s)의 스퍼터링 조건으로 증착하였다. 그리고 제작된 시편의 열처리 효과에 대한 온도의 의존성을 관찰하고자 150~330°C의 온도 영역에서 1시간 동안 열처리를 하였다. 이때의 진공도는 2.0×10⁻⁶ Torr 이하로 유지하였다. 이와 같이 제작된 시료는 수직자기이방성에 대한 H_{ex}와 H_c를 측정하기에 보편적인 4탐침법 자기

*Tel: (041) 550-3426, E-mail: joo425@hanmail.net

저항 측정 장비를 이용하여 측정하는 방법으로는 자성체의 자기모멘트가 매우 작기 때문에 직접적으로 측정하기 어렵다. 그래서 Hong 그리고 Giordano *et al.* 의하여 보고 되어진 4탐침법 자기저항 측정 장비를 이용한 Hall effect를 측정하였다 [4-7]. 이 측정 방법으로 측정된 곡선을 통하여 H_{ex} 와 H_c 의 변화를 관찰하였다. 시편의 결정성을 분석하기 위하여 XRD 측정장비를 사용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 FeMn(15 nm)이 [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅ 다층 박막에 꼭대기층과 바닥층으로 있을 때 Hall voltage 곡선을 나타낸 것이다. 곡선에서 보이듯이 FeMn이 바닥층에 있을 때는 교환결합된 수직자기이방성 곡선이 나타나지 않았으며, FeMn이 꼭대기층으로 있을 때 교환결합된 수직자기이방성 곡선을 관찰 할 수 있었다. 이때 교환바이어스세기(H_{ex})와 보자력(H_c)은 각각 127 Oe와 225 Oe를 얻었다. 여기에서 FeMn이 바닥층으로 있을 때는 FeMn 층의 결정성장이 [Pd/Co]

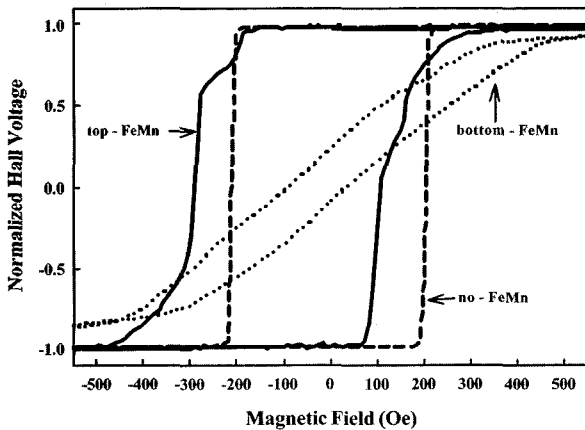


Fig. 1. Hall voltage curves of [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅ multilayer biased by top and bottom FeMn(15 nm) film.

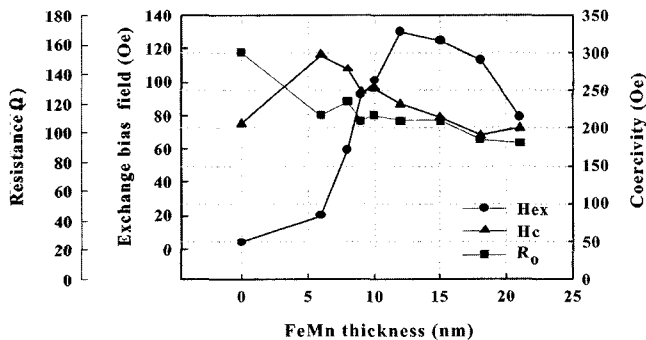


Fig. 2. Resistance, exchange bias field(H_{ex}) and coercivity(H_c) as a function of FeMn thickness in Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(X nm)/Ta(1.9 nm) multilayer.

다층 박막에 영향을 주어 수직자기이방성을 갖지 못한 것으로 사료된다.

Fig. 2는 Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(X nm)/Ta(1.9 nm) 다층막 구조에서 FeMn 두께 변화에 따른 H_{ex} 와 H_c 를 나타낸 것이다. FeMn층의 두께가 증가함에 따라 H_{ex} 는 12 nm에서 130 Oe까지 증가하다가 그 이후에서는 감소하였다. 그리고 H_c 는 그 값이 200 Oe에서 300 Oe 영역 안에서 FeMn 두께가 증가함에 따라 297 Oe까지 증가하다가 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다.

Fig. 3은 Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]_N/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 다층박막 구조에서 [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)] 다층 박막의 반복 횟수에 따른 H_{ex} 와 H_c 의 변화를 나타낸 것이다. 그 결과 2회 반복 증착했을 때에는 수직자기이방성에 대한 H_{ex} 와 H_c 가 전혀 나타나지 않았으며, 그 이후 3회 반복 증착했을 때부터 수직자기이방성에 대한 H_{ex} 와 H_c 가 나타나기 시작하였고, 6회 반복 했을 때 190 Oe까지 증가하다 감소하였다. 하지만 H_c 는 5회 반복하였을 때 215 Oe 까지 증가하였으며 그 이후 거의 변화가 없었다.

Fig. 4는 Ta(1.9 nm)/[Pd 0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/Pd(X nm)/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 다층막 구조에서 삽입층 Pd의 두께에 따른 H_{ex} 와 H_c 의 변화를 나타낸 것이다. 강자성층과 반강자성층 사이에 삽입한 Pd의 두께(X = 0~0.84 nm)가 증가함에 따라 교환바이어스는 삽입층 두께가 0 nm일 때 127 Oe, 0.1 nm 일 때 140 Oe로 증가하다 그 이후로 급격히 감소하는 현상을 볼 수 있다. H_{ex} 는 강자성/반강자성층 계면에서 상호작용력에 의하여 발생하는 것으로, 삽입층의 두께가 0.1 nm로 증가 했을 때 교환바이어스의 세기가 증가하는 현상은 마지막 Co 층의 스핀이 수직적으로 더 잘 배열되었기 때문이라 사료되며, 그 이후의 감소는 두 층 사이의 거리가 너무 멀어져서 상호작용력이 감소하는 것으로 설명될 수 있다. 이러한 경향은 [Pt/Co]/FeMn 다층박막 구조에서 F. Garcia *et al.*의

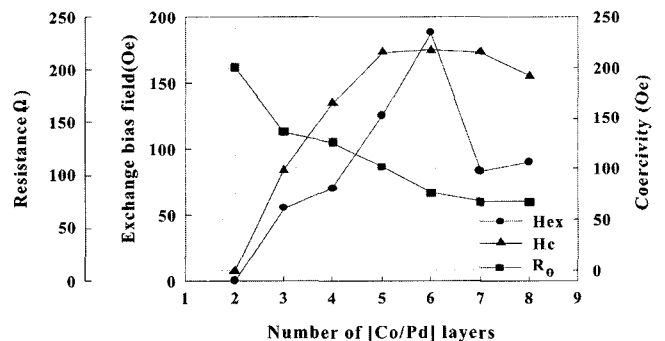


Fig. 3. Resistance, exchange bias field(H_{ex}) and coercivity(H_c) as a function of the number of [Pd/Co] layers in Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]_N/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) multilayer.

해서 보고 되어진 결과와 같은 경향을 나타낸다[8]. 이때 보자력(H_c)은 큰 변화를 보이지 않았다.

Fig. 5는 Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]_N/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 구조의 다층박막으로 열처리에 의한 열적안정성을 관찰하기 위하여 온도변화(150~300°C)에 따른 Hall voltage 곡선과 H_{ex} 그리고 H_c를 나타낸 것이다. 이 결과 H_{ex}는 열처리 온도 240°C에서 195 Oe의 값으로 증가하다가 그 이상의 온도에서 감소하였으며, 반면 H_c는 열처리 온도에 따라 계속적으로 증가하는 경향을 관찰하였다. 교환바이어

스(H_{ex})의 증가하는 현상은 열처리를 통하여 각층의 스핀들이 재배열함으로 인하여 증가하는 것으로 사료된다. 이것은 XRD 측정결과 43.4°(2θ)에서 FeMn의 (111) 피크의 회절세기의 증가하는 것으로 확인하였다. 또한 감소하는 현상은 뿔뿔이 산란되는 정도가 강한 Mn 원자가 FeMn 막과 경계를 이루는 Ta 층으로의 빠른 확산효과로 인하여 반강자성체 FeMn에 Mn의 결핍으로 고정층으로서 역할을 못하여 감소하는 것으로 사료된다[9-12].

IV. 결 론

Ta/[Pd/Co]_N/FeMn/Ta 구조의 다층박막을 dc 스퍼터링 시스템으로 증착하여 수직이방성에 의한 자기적 특성과 열적특성을 조사하였다. FeMn이 꼭대기층으로 있을 때와 [Pd/Co] 다층막만 있을 때의 경우 수직자기이방성에 대한 곡선을 확인할 수 있었다. 하지만 FeMn이 바닥층인 경우는 수직자기이방성 효과를 관찰할 수 없었다. 이 결과는 [Pd/Co] 다층막의 수직자기이방성 효과는 바닥에 증착되어지는 물질에 따라 영향을 받는다는 것으로 사료되며, 이러한 영향에 대해서 좀 더 확인할 필요성이 있다. FeMn의 두께가 증가함에 따른 의존성은 FeMn의 두께가 12 nm일 때 130 Oe의 값을 얻었으며, Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]_N/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 구조에서 [Pd/Co] 다층막의 반복 증착에 따른 변화에서는 최소한 3회 이상 반복했을 때 수직자기이방성 효과가 발생한다는 것을 확인하였다. 그리고 이때에 H_{ex}의 최대 값은 6회 반복에서 190 Oe의 값을 얻었다. 또한 보자력(H_c)에 경우 5회 반복에서부터 거의 일정한 값을 얻었다. [Pd/Co] 다층막과 FeMn 층 사이에 삽입층 Pd를 삽입함으로 인하여 매우 얇은 Pd 두께(0.1 nm)에서 H_{ex}가 증가하다 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다. 열처리에 따른 수직자기이방성에 대한 열적안정성에 관한 실험결과 240°C까지는 열적으로 안정한 것을 관찰할 수 있었다. 위에 실험의 결과들로 바닥층으로 놓이는 물질에 따른 수직자기이방성 효과의 변화와 삽입층으로 Pd를 얇게 삽입함으로 FeMn과 [Pd/Co] 다층막의 분리로 나타나는 열처리에 의한 효과는 현재 실험 중에 있다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Z. Y. Liu, et al., Phys. Rev. Lett., **91**, 037207(2003).
- [2] F. Garcia, et al., J. Appl. Phys., **93**, 8397(2003).

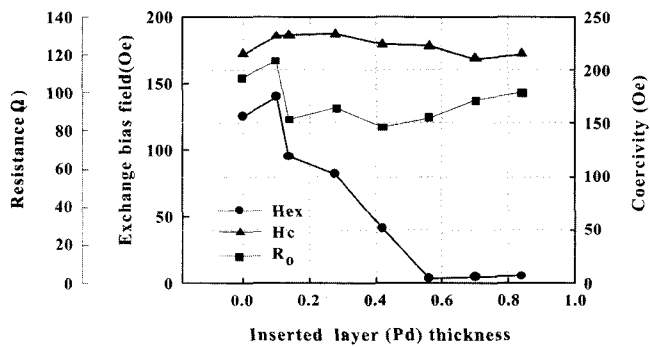


Fig. 4. Resistance, exchange bias field(H_{ex}) and coercivity(H_c) as a function of the insert layers(Pd) thickness in Ta(0.4 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/Pd(X nm)/FeMn(15 nm)/Ta(0.4 nm) multilayer.

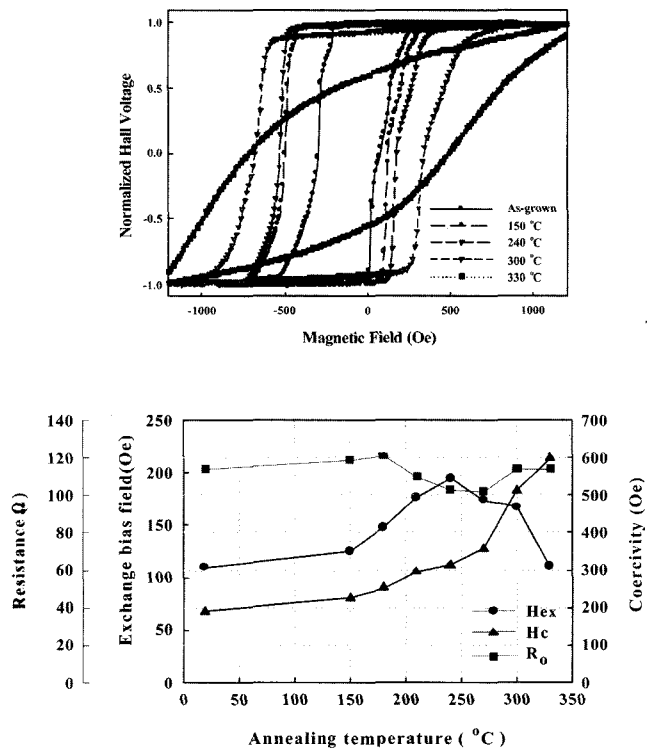


Fig. 5. Hall voltage curves, resistance, exchange bias field(H_{ex}) and coercivity(H_c) of [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm) multilayer as a function of the annealing temperature.

- [3] S. M. Zhou, L. Sun, P. C. Searson, and C. L. Chien, *Phys. Rev.*, **B 69**, 024408(2004).
- [4] K. Hong, N. Giordano, *J. Magn. Magn. Mater.*, **151**, 9855(1995).
- [5] S. Haan, C. Lodder, T. J. A. Popma, *J. Magn. Soc. Jap.*, **15**, 349(1991).
- [6] K. Okamoto, *J. Magn. Magn. Mater.* **35**, 353(1983).
- [7] S. Nakagawa, K. Takayama, A. Sato, M. Naoe, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2739(1999).
- [8] F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3537(2003).
- [9] S. W. Kim, et al., *J. Appl. Phys.*, **93**, 6602(2003).
- [10] S. S. Lee, D. G. Hwang, and C. M. Park, *J. Mag. Mater.*, **89**, 198-199(1999).
- [11] K. Y. Kim, S. H. Jang, K. H. Shin, H. J. Kim, and T. Kang, *J. Appl. Phys.*, **89**, 7612(2001).
- [12] K. Li, Y. Wu, J. Qin, G. Han, Z. Guo, H. Xie, and T. Chong, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3663(2001).

Exchange Bias Perpendicular Magnetic Anisotropy and Thermal Stability of [Pd/Co]_N/FeMn Multilayer

Ho-Wan Joo*, Jin-Hee An, Bo-Keun Kim, Sun-Wook Kim, and Kee-Am Lee

Department of physics, Dankook university, Cheonan 330-714, Korea

Sang-Suk Lee and Do-Geun Hwang

Department of computer and electronic physics, Sangji university, Wonju 220-702, Korea

(Received 4 June 2004, in final form 30 June 2004)

Magnetic properties and thermal stability by exchange biased perpendicular magnetic anisotropy in [Pd/Co]_N/FeMn multilayer deposited by dc magnetron sputtering system are investigated. We measured the perpendicular magnetization curves of [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn multilayer as function of FeMn thickness and annealing temperature. As FeMn thickness increases from 0 to 21 nm, the perpendicular exchange bias(H_{ex}) obtained 127 Oe at FeMn thickness 15 nm. As the annealing temperature increases to 240°C, the H_{ex} increased from 115 Oe to 190 Oe and disappeared exchange biased perpendicular magnetic anisotropy effect at 330°C .

Key words : Perpendicular magnetic anisotropy, Exchange bias, Coercivity, Multilayer, Annealing effect.