

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Ferromagnet] 다층막에서 표면자기이방성에 따른 교환력과 보자력의 의존성

허장 · 김현신 · 최진협 · 이기암*

단국대학교 물리학과, 충남 천안시 안서동 산29번지, 330-714

(2008년 5월 26일 받음, 2008년 6월 20일 최종수정본 받음)

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co]_N와 [Pd/Co(CoFe)]_N/FeMn 다층박막 구조를 이용하여 표면자기이방성 효과와 강자성 물질에 따른 보자력(coercivity, H_c)과 교환력(exchange bias, H_{ex})의 변화를 관찰하였다. Ta(2.1 nm)/[Pd(3.1/N)/Co(1.2/N)]_N/Ta(2.1) 다층박막의 구조에서 반복층수 증가에 따라 보자력 670 Oe까지 선형적으로 증가하였으며, 교환 결합된 구조에서의 보자력은 물질에 따라 같은 증가 경향의 결과를 얻었다. 강자성 물질에 따른 가장 큰 보자력은 Co(600 Oe) > Co₃Fe₅(520 Oe) > Co₈Fe₂(320 Oe) 크기를 얻었다. 반면 교환력의 경우 반복 층수가 N=3 일 때 각 물질 모두 300 Oe의 결과 값을 얻었으며, 반복층수 3층 이후에는 300~200 Oe 사이에 거의 일정한 크기를 얻었다.

주제어 : 수직자기이방성, 교환바이어스, 보자력, Pd/Co 다층박막, 표면자기이방성

I. 서 론

최근까지도 MRAM(magnetic random recording memory) 그리고 고밀도 자기기록 read sensors로의 광범위한 응용성 때문에 스핀밸브 디바이스(spin-valves devices)는 활발히 연구되고 있다. 특히 스핀밸브 구조에서 반강자성체와 결합한 강자성체 사이의 계면에서 발생하는 교환바이어스(exchange bias; H_{ex}) 현상에 대한 학문적 규명은 스핀밸브 디바이스(devices)로의 응용성 향상을 위하여 많은 연구가 이루어졌다. 스핀밸브와 교환바이어스 효과에 대한 일반적인 연구는 면상(in-plane) 자기이방성을 갖는 박막구조가 대부분이었다. 이러한 면상 자기이방성을 갖는 박막구조는 그 크기를 마이크로 이하로 패터닝(patterning) 할 때, 자화변형 및 미세 자구(magnetic domain)가 패턴소자의 가장자리에서 소용돌이(vortex) 자화로 인하여 꽃무늬(flower structure)를 발생시켜 박막의 보자력(coercivity; H_c) 증가와 자화의 왜곡현상이 발생하는 요인이 된다[1, 2]. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 제안된 것이 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy; PMA)을 갖는 Pt/Co 그리고 Pd/Co 다층박막을 이용한 박막 구조이다. 이러한 연구는 자기기록매체에 많은 연구가 이루어졌으며, 근래에 F. Garica 등을 비롯하여 몇몇의 연구그룹에 의하여 교환바이어스에 대하여 연구되고 있다[3-6]. 하지만 강한 수직자기이방성으로 인한 큰 보자력은 스핀밸브 구조에서 자유층의 큰 스위칭장(switching field)과 교환바이어스의 감소를 발생하며, 이는 수직자기이방성을 갖는 스핀밸브 디바이

스의 응용에 있어 단점으로 발생한다. 또한 수직자기이방성을 갖는 구조에서의 자기 특성에 대한 명확한 규명이 미비한 상태이다. 이러한 이유로 본 논문은 수직자기이방성을 갖는 [Pd/ferromagnet]_N 그리고 [Pd/ferromagnet]_N/FeMn 다층박막에서 강자성체의 물질 Co, CoFe에 따라 최적화된 다층박막의 층 두께를 고정하여 각 강자성체의 물질의 자화(magnetization)를 고정하여 반복층수에 따른 보자력과 교환바이어스의 변화를 관찰하였다.

II. 실험 방법

수직자기이방성을 갖는 [Pd/ferromagnet]_N 다층박막 위에 반강자성체 FeMn이 있고 없는 경우로 제작하였다. 이때 시편은 실온에서 3인치 dc 마그네트론 스퍼터링 시스템(magnetron sputtering system)을 이용하여 glass 와 Si 웨이퍼 위에 증착하였다. 시편의 일정한 형태를 유지하기 위하여 제작된 금속 마스크를 사용하여 인가자장 없이 증착하였다. 초기진공도(background pressure)는 3.0×10^{-7} Torr 이하를 유지하였고, 작업진공도(working pressure)는 Ar gas를 주입하여 2.0×10^{-3} Torr 이하로 유지하였다. 꼭대기층 FeMn의 산화를 방지하기 위하여 보호층(capping layer)으로 Ta를 증착하였다. 제작시 사용한 각 물질 Ta, FeMn, Pd, Co 그리고 CoFe 물질들은 0.06~0.11 nm/s의 증착비로 제작되었다. 이와 같이 제작된 시료는 수직자기이방성에 대한 H_{ex} 와 H_c 을 측정하기에 보편적인 4-탐침법 자기저항 측정 장비를 이용하여 측정하는 방법으로는 자성체의 자기모멘트가 매우 작기 때문에 직접적으로 측정하기 어렵다. 그래서 Hong 그리고

*Tel: (041) 550-3426, E-mail: conetpower@nate.com

Giordano *et al.* 의하여 보고 되어진 4-탐침법 자기저항 측정 장비를 이용하여 실온에서 EHE(extraordinary hall effect)를 측정하였다[7-9]. 또한 자화거동을 관찰하기 위하여 VSM (vibrating sample magnetometer) 그리고 MOKE(magneto-optical Kerr effect)를 측정하였고, 각 시편의 결정성장을 관찰하기 위하여 XRD(x-ray diffraction)를 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

교환결합 현상을 관찰하기 전에 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy)을 갖는 [Pd/Co]₅ 다층박막의 각층의 최적 두께를 조사하였다. 각층의 두께에 따라 EHE 측정된 결과 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅ 다층박막에서 가장 최적의 사각형의 히스테리 곡선을 얻었다[10, 11]. 여기서 수직자기이방성은 크게 [Pd/Co] 다층박막의 표면이방성(surface anisotropy)과 부피이방성(bulk anisotropy) 두가지로 고려할 수 있다. 이러한 이유로 실험적으로 두 종류의 이방성을 나누어서 디자인 할 수 있으며, 전체 이방성(total anisotropy) K_{eff} 는 다음과 같이 정의 한다.

$$K_{eff} = K_v + \frac{2K_s}{t_{FM}} - 2\pi M_s^2 \quad (1)$$

여기서, K_v 는 부피이방성이며, K_s 는 Pd와 결합하는 강자성체의 전체 계면의 표면이방성 에너지이고, t 는 강자성체의 두께이다[12-15].

Fig. 1(a)는 수직자기이방성을 가지는 Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]_N/Ta(2.1) 다층박막구조에서의 반복층수 N에 따른 보자력(coercivity; H_c)의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 1(b)는 Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₅/Ta(2.1)의 최적화된 구조에서 (Pd/Co)의 총 두께를 유지하고 표면자기이방성만의 변화에 따른 보자력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 1(a)에서 반복층수 N이 2층까지는 수직자기이방성에 의한 결과는 나타나지 않았다. 반복층수 N이 3층에서 수직자기이방성을 갖는 결과를 얻었으며 이때의 보자력은 90 Oe였으며 그 이후 반복층수 증가에 따라 표면자기이방성의 에너지가 증가하여 8층과 9층에서 450 Oe의 보자력을 얻었다. 그리고 수직자기이방성을 갖는 기본 구조 [Pd(0.6 m)/Co(0.2)]₅ 다층박막의 각층의 5층에 대한 총 두께 즉, [Pd(3.1 nm)/Co(1.2)]의 두께를 고정하여 부피자기이방성을 일정하게 하고 총 두께를 반복층수 N에 대한 결과를 Fig. 1(b)에 보였으며, 이 결과는 식 (1)에서 표면자기이방성(K_s)만의 의존성을 관찰한 것이다. 반복층수 N = 1층일 때는 부피자기이방성 에너지가 크기 때문에 수직자화의 결과는 나타나지 않았으며, N = 2에서부터 수직자화를 갖는 결과가 나타났으며, 반복층수 N = 2에서 7층으로

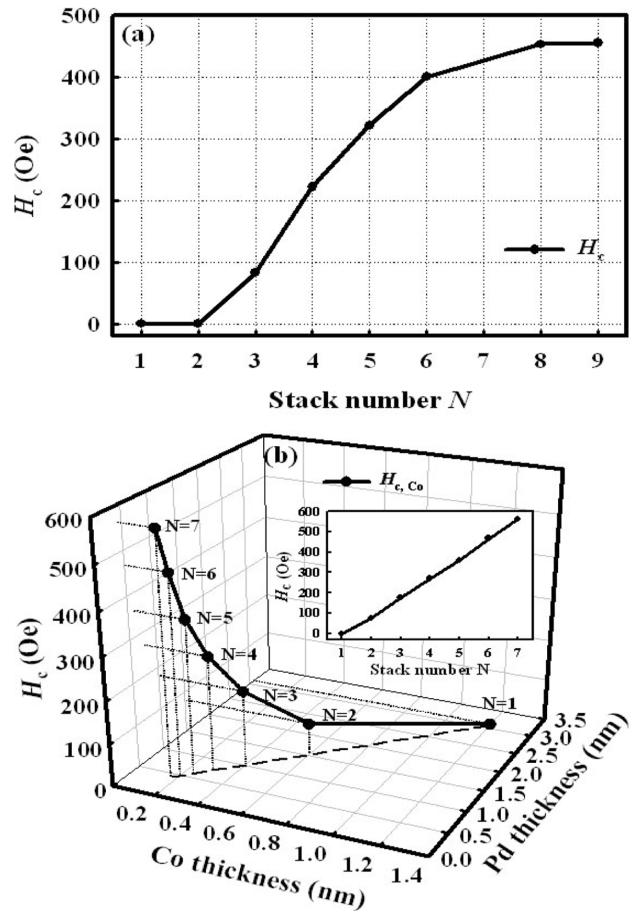


Fig. 1. (a) The H_c of Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]_N/Ta(2.1) multilayers as function of stack number N. (b) The H_c of Ta(2.1 nm)/[Pd(3.1/N)/Co(1.2/N)]_N/Ta(2.1) multilayers as function of the thickness of Co and Pd layers and the inset of (b) shows H_c as function of stack number N.

증가함에 따라 100 Oe에서 670 Oe의 선형적인 결과를 얻었다. 이 결과에서 표면자기이방성이 수직자기이방성에 가장 크게 작용하는 것이며, 이 표면자기이방성의 효과는 반복층수가 증가함에 따라 Pd/Co 사이 계면에서의 stress의 변화에 의한 것이다. 또한 이 결과는 수직자기이방성을 갖는 구조를 이용한 응용성에서 문제시 되는 강한 이방성으로 인한 큰 보자력을 조절할 수 있는 결과이다.

[Pd/Co]/FeMn 다층박막 구조에서의 수직자기이방성에 의한 교환력(exchange bias field; H_{ex})을 관찰하기 위하여 먼저 반강자성체 FeMn이 꼭대기층(top)과 바닥층(bottom)에 있을 때 교환력을 확인하였다. 이때 바닥층에 놓인 경우 FeMn이 결정성장이 잘 형성되지 않음으로 인하여 교환력이 발생하지 않았으며, FeMn이 꼭대기에 놓였을 때 수직자기이방성을 갖는 교환력이 나타났다. 최적화는 실험을 통하여 glass/Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₅/FeMn(10.8)/Ta(2.1) 구조에서 얻었다. Fig. 1에서의 결과와 최적화된 반강자성체의 최적 두께를 이

용하여 자기이방성 효과 중 수직자화를 형성함에 가장 밀접한 연관성이 있는 표면자기이방성에 의한 교환력을 관찰하였다. Ta(2.1 nm)/[Pd(3.1/N)/Co(1.2/N)]_N/FeMn(10.8)/Ta(2.1) 다층박막을 이용한 결과는 Fig. 2(a) MOKE(magneto-optical kerr effects) 곡선과 (b) 교환력(H_{ex})과 보자력(coercivity; H_c) 그리고 (c) XRD를 나타내었다. 반강자성체가 없는 [Pd/Co] 다층박막에서 표면자기이방성만의 효과로 인한 결과는 반복층수 증가에 따라 선형적으로 증가하는 반면 교환바이어스

가 걸린 경우 반복층수에 따라 100 Oe에서 약 600 Oe까지 증가하는 결과를 보이고 있지만 교환바이어스가 없는 경우와 다른 증가 경향성을 나타내고 있다. 이는 Co/FeMn 계면 사이의 교환결합으로 인한 Pd/Co 층에 강한 교환결합과 약한 교환결합에 의한 것이라 할 수 있다[4]. 교환력은 반복층수 N=3까지 300 Oe의 최대값을 나타냈으며, 그 이후 증가에 따라 서서히 감소하여 반복층수 N=7 층에서는 200 Oe였다. 이 결과는 일반적인 면상(in-plane) 이방성을 갖는 교환결합된 구조와는 다른 결과라 할 수 있다. 교환력의 감소는 반강자성체 FeMn 층의 바닥 면상 스핀에 인접한 강자성 Co의 꼭대기의 수직 자화의 스핀과의 이루는 각도의 감소에 기인한 것이라 할 수 있다. 수직자기이방성을 갖는 [Pd(3.1/N)/Co(1.2/N)]_N/FeMn(10.8) 교환결합 구조에서의 H_{ex} 의 감소는 계면에서의 교환결합 에너지(J_{int})의 감소를 말하며 이것은 반복층수가 증가함에 기인한 수직자기이방성의 증가와 그리고 반강자성체 FeMn 바닥의 면상스핀들과 수직 자화된 강자성 Co 꼭대기의 스핀들 사이에 이루는 각도의 방향과 밀접한 관련이 있는 것이다. 수직자기이방성에 의한 현상과 결정성장의 의존성을 관찰하기 위하여 XRD 측정 결과를 Fig. 2(c)에 나

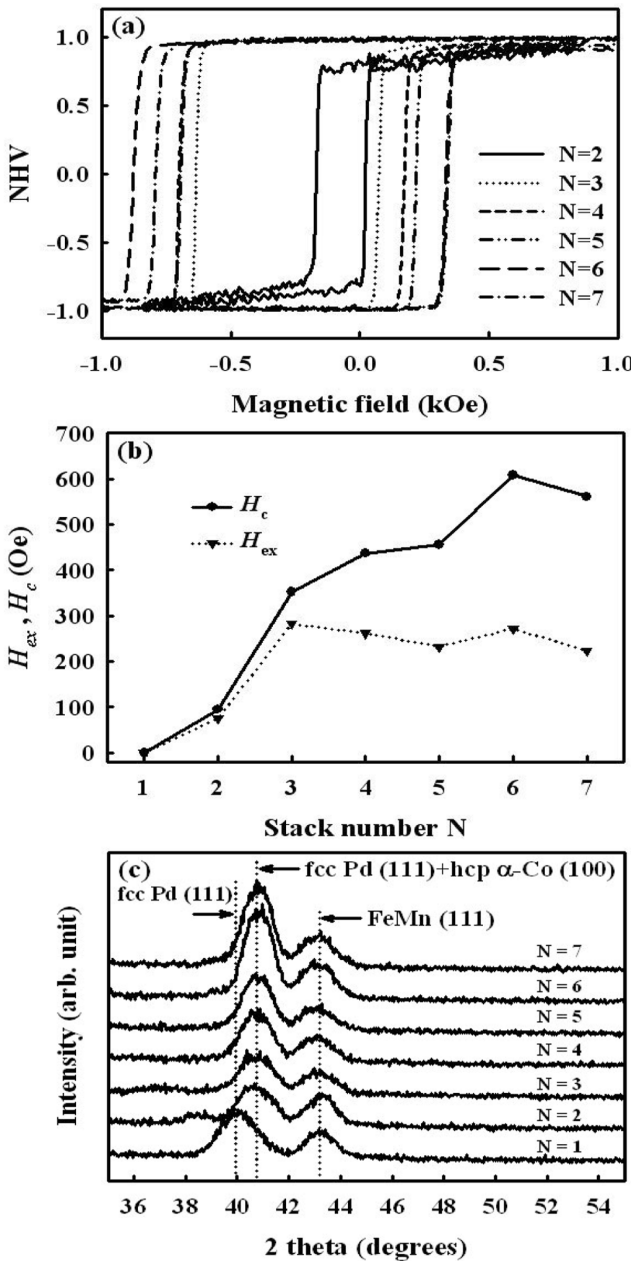


Fig. 2. The (a) MOKE curves, (b) H_c , H_{ex} and (c) XRD as function of stack number N in Ta(2.1 nm)/[Pd(3.1/N)/Co(1.2/N)]_N/FeMn(10.8)/Ta(2.1) multilayers.

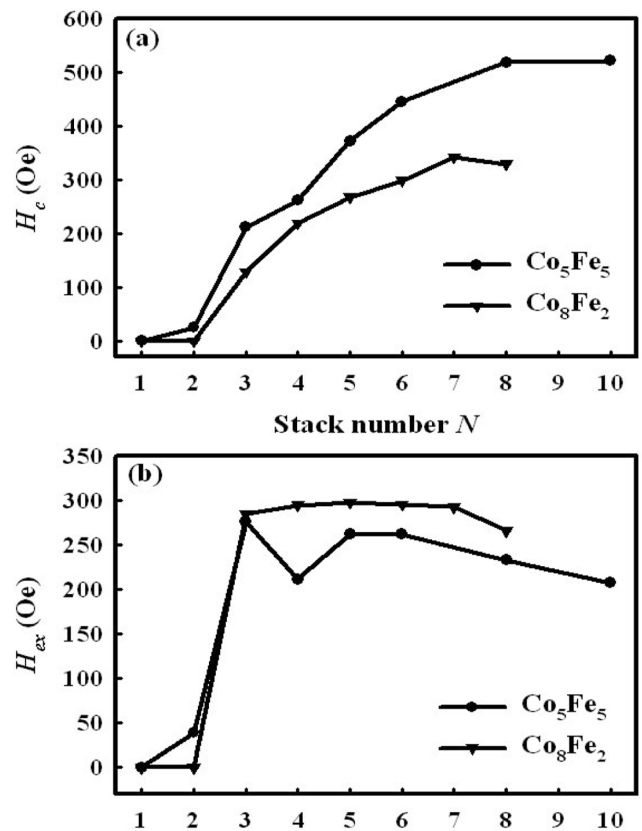


Fig. 3. The (a) H_c and (b) H_{ex} as function of stack number N in Ta(2.1 nm)/[Pd(3.1/N)/CoFe(1.0/N)]_N/FeMn(10.8)/Ta(2.1) multilayers.

타내었다. 반복층수 $N=1$ 일 때는 Fig. 1에서와 결과와 마찬가지로 수직자기이방성에 의한 현상은 발생하지 않았으며, 이 때 39.8° 에 Pd fcc (111) 피크가 나타났다. 반복층수의 증가에 따라 Pd fcc (111) 피크는 Pd/Co 사이의 계면에서의 stress로 인한 Co의 잡아당김으로 hcp α -Co (100) 결정성장과 혼합하여 40.7° 로 이동하여 나타나고 있다[16].

Fig. 3은 교환력을 증대하기 위하여 강한 수직자기이방성으로 인한 큰 보자력을 줄이기 위하여 Pd와 결합하는 강자성체의 물질을 Co_5Fe_5 , Co_8Fe_2 에 따른 보자력과 교환력의 변화를 관찰하였다. 그 결과 보자력(H_c)은 강자성체가 Co인 경우와 마찬가지로 반복층수의 증가에 따라 같은 증가하는 현상을 나타나고 있다. 하지만 각 물질의 최대 보자력은 Co, Co_5Fe_5 그리고 Co_8Fe_2 의 경우 각각 600 Oe, 520 Oe 그리고 320 Oe의 크기로 Co_8Fe_2 가 가장 작은 크기를 나타내고 있다. 교환력(H_{ex})의 경우도 Co 물질을 이용할 때와 마찬가지로 반복층수 $N=3$ 까지는 300 Oe로 현저히 증가하였으며, 그 이상 증가에 따라 거의 일정한 300~200 Oe의 크기를 유지하였다. 이 결과에서 주목할 만한 것은 Co와 Co_5Fe_5 의 경우 $N>3$ 에서는 교환력이 서서히 감소하는 반면 Co_8Fe_2 의 경우 300 Oe의 값을 유지하는 점이며, 또한 교환력의 경우 수직자기이방성을 갖는 구조에서 보자력의 크기와 그리고 반복층수와는 크게 관련이 없는 것으로 사료된다. 또한 보자력을 감소시키고 교환력을 유지하는 이 결과는 교환결합된 스핀밸브 구조를 이용한 수직자화를 갖는 MRAM 또는 read head 등의 자기저항 소자로 응용하기 위한 중요한 정보를 제시한 결과라 할 수 있다.

IV. 결 론

수직자기이방성을 갖는 $[\text{Pd}/\text{Co}]_N$ 다층박막과 $[\text{Pd}/\text{Co}(\text{CoFe})]_N/\text{FeMn}$ 다층박막 구조에서 강자성 물질 Co와 CoFe에 대한 의존성과 Pd/강자성층의 반복층수 $N=5$ 층에 대한 층 두께를 고정하고 반복층수의 증가에 따른 자기적 특성을 관찰하였다. 반복층수가 증가함에 따라 Pd 계면에서의 stress 증가로 강자성층의 잡아당김의 증가로 수직자기이방성은 증가하여 보자력은 $[\text{Pd}/\text{Co}]$ 구조에서 선형적으로 증가한 반면 교환 결합된 구조에서는 다른 증가 현상을 나타냈다. 그리고 강자성 물질을 교체함으로써 큰 보자력은 줄일 수 있었다. 강자성 Co와 CoFe 두 물질의 교환력에 경우, 반복 층수 $N=3$ 까지는 300 Oe의 현저한 증가를 보였으며, $N>3$ 에서는 300~200 Oe의 거의 일정한 크기를 얻었다. 이러한 결과는 면상(in-plane)이방성을 갖는 교환 결합된 구조에서의 현상과 차이가 있는 결과이며, 이 현상은 FeMn의 큰 일축이방성에 대한 영향이 경강자성과 연강자성물질의 혼합비에 따른 큰 보

자력과 안정적인 교환력을 가질 수 있는 것을 보여준 결과이다. 이것을 이용하여 수직자기이방성에 의한 보자력의 크기를 조절하고, 스핀밸브 구조에서의 단점이었던 큰 switching field와 자유층/고정층의 큰 보자력을 갖는 단점들을 극복하여 스핀밸브 구조를 이용한 devices 로의 응용 발전에 기인할 수 있는 결과이다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Camerero, Y. Pennec, J. Vogel, M. Bonfim, S. Pizzini, F. Ernult, F. Fettar, F. Garcia, F. Lancon, L. Billard, and B. Dieny, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 27201 (2003).
- [2] H. G. Cho, Y. K. Kim, and S. R. Lee, *IEEE Trans. Magn.*, **38**(5), 2685 (2002).
- [3] J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.*, **83**(9), 1800 (2003).
- [4] F. Garcia, G. Casali, S. Auffret, B. Rodmacq, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.*, **91**, 6905 (2002). and references therein.
- [5] S. V. Dijken, M. Besnier, J. Moritz, and J. M. D. Coey, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10K114 (2005).
- [6] S. Wiebel, J. P. Jamet, N. Vernier, A. Mougin, J. Ferre, V. Baltz, B. Rodmacq, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 142502 (2005).
- [7] K. Hong and N. Giordano, *J. Magn. Magn. Mater.*, **151**, 9855 (1995).
- [8] S. Haan, C. Lodder, and T. J. A. Popma, *J. Magn. Soc. Jap.*, **15**, 349 (1991).
- [9] S. Nakagawa, K. Takayama, A. Sato, and M. Naoe, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2739 (1999).
- [10] H. W. Joo, S. W. Kim, J. H. An, J. H. Choi, M. S. Lee, K. A. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. Magnetism*, **10**(1), 33 (2005).
- [11] H. W. Joo, J. H. An, B. G. Kim, S. W. Kim, K. A. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, *J. of Kor. Mag. Soc.*, **14**(4), 127 (2004).
- [12] F. Garcia, F. Fettar, S. Auffret, B. Rodmacq, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.*, **93**(10), 8397 (2003).
- [13] J. Sort, B. Rodmacq, F. Garcia, S. Auffret, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.*, **95**(11), 7163 (2004).
- [14] J. Sort, B. Dieny, M. Fraune, C. Koenig, F. Lunnebach, B. Beschoten, and G. Guntherodt, *Appl. Phys. Lett.*, **84**(18), 3696 (2004).
- [15] J. Moritz, F. Garcia, J. C. Toussaint, B. Dieny, and J. P. Nozieres, *Europhysics Lett.*, **65**(1), 123 (2004).
- [16] N. Thiagarajah, S. Bae, H. Joo, Y. C. Han, and J. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 062504 (2008).

Dependence of Coercivity and Exchange Bias as Surface Magnetic Anisotropy in [Pd/Ferromagnet] Multilayer with Out-of-plane Magnetic Anisotropy

Jang Heo, Hyun-shin Kim, Jin-hyup Choi, and Ky-am Lee*

Department of Physics, Dankook University, Cheonan-si, Chungnam 330-714, Korea

(Received 26 May 2008, in final form 20 June 2008)

Dependence of the exchange bias and coercivity as surface magnetic anisotropy and ferromagnet materials for $[Pd/Co]_N$ and $[Pd/Co,(CoFe)]_N/FeMn$ multilayers with perpendicular magnetic anisotropy were investigated. The coercivity was proportionally increased to 670 Oe by increasing stack number N in $Ta(2.1\text{ nm})/[Pd(3.1/N)/Co(1.2/N)]_N/Ta(2.1)$ multilayers with perpendicular magnetic anisotropy. Also, the coercivity in exchange biased multilayer was tend to increased by increasing stack number N . But coercivity of each materials have been in order of Co (600 Oe), Co_5Fe_5 (520 Oe) and Co_8Fe_2 (320 Oe) as function of the ferromagnet materials. The other side, exchange force of each materials is 300 Oe when the reiteration layer number N is 3. In over number of reiteration layer 3, they maintained coercivity between 200 Oe and 300 Oe.

Keywords : perpendicular magnetic anisotropy, exchange bias, coersivity, Pd/Co multilayer, surface magnetic anisotropy