

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co]₅/X/FeMn 다층박막에서 삽입층 물질과 두께에 따른 교환바이어스와 보자력의 의존성

허장 · 박동훈 · 강왕손 · 지상훈 · 이기암*
단국대학교 물리학과, 충남 천안시 안서동, 330-714

(2008년 9월 17일 받음, 2008년 10월 9일 최종수정본 받음, 2008년 10월 9일 게재확정)

수직자기이방성을 갖는 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) 다층박막 구조를 이용하여 삽입층 물질과 각 물질의 두께 증가에 따른 보자력(coercivity, H_c)과 교환력(exchange bias, H_{ex})의 변화를 관찰하였다. [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₄/Pd(0.6)/NiFe(t)/FeMn(10) 구조에서 Co 대신에 NiFe를 삽입하였을 때 0.78 nm와 1.28 nm에서 360 Oe의 교환바이어스를 얻었다. [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) 다층박막 구조에서 Co/FeMn 사이 계면에 Co₈Fe₂와 Co₉Fe₁ 물질을 삽입하여 두께 증가에 따라 Co₈Fe₂의 경우 0.68 nm에서 30 Oe 증가한 380 Oe의 교환바이어스를 얻었다. Co₉Fe₁ 경우 두께 0.52 nm에서 약 200 Oe 증가한 580 Oe 가장 큰 교환바이어스를 얻었다.

주제어 : 수직자기이방성, 교환바이어스, 보자력, Pd/Co 다층박막, 삽입층, NiFe, CoFe

I. 서 론

최근 산업기술의 발전함에 따라 스핀트로닉스(spintronics) 분야에서 면상에 수직(perpendicular)한 자화 방향으로 교환결합된 스핀밸브 구조는 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)을 갖는 MRAM(magnetic random access memory) 그리고 나노크기에서 초고밀도 자기기록 read sensors로의 광범위한 응용성 때문에 디바이스(spin-valves devices) 응용부분에서 활발히 연구되고 있다[1, 2]. 특히 스핀밸브 구조에서 강자성체와 반강자성체 사이 계면에서 발생하는 교환바이어스(exchange-bias; H_{ex}) 현상에 대한 학문적 이해는 향상된 스핀밸브 디바이스로서의 응용에 중요한 요인으로 작용한다. 이러한 교환바이어스 현상의 일반적인 연구는 면상(in-plane) 자기이방성을 갖는 구조가 대부분이었으나, 나노크기의 소자로 개발함에 있어 보자력(coercivity; H_c)의 증가, 자화의 왜곡 등과 같은 단점으로 인하여 최근 수직자기이방성을 갖는 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3, 4]. 이러한 수직교환바이어스 현상은 FeF₂-CoPt 구조에서 처음 관찰된 이후 현재 수직교환바이어스의 물리적 규명을 위한 실험적 구조는 [Pd (또는 Pt)/Co]_N/FeMn (또는 IrMn)의 다층박막에서 이루어지고 있으며, 수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co] 또는 [Pt/Co] 다층박막에서의 교환바이어스는 반강자성체에 접한 마지막 Co층의 자화의 비스듬 정도에 의한 것으로 추정만 하고 있을 정도로 수직교환바이어스 현상의 물리적 규명이 확실하게 밝혀진 것은 아니다. 또한 응용적인 면에서 강

한 수직자기이방성으로 인한 큰 보자력은 디바이스로 사용하기 위한 스핀 밸브 구조에서 자유층의 큰 스위칭장(switching field)과 교환바이어스의 감소를 발생하며, 이는 응용성에 단점으로 발생한다[5-8]. 이러한 이유로 수직교환바이어스의 물리적 규명을 통하여 교환바이어스의 개선은 응용성을 높이기 위해 요구되고 있다. 이러한 이유로 본 논문은 수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co]₅/FeMn 다층박막을 이용하여 FeMn에 접하는 Co 층 사이에 강자성 물질 CoFe를 삽입함으로써 인한 보자력과 교환바이어스의 변화를 관찰하였다.

II. 실험방법

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co]을 다층박막 위에 반강자성체 FeMn을 사용하여 제작하였다. 이때 시편은 실온에서 3인치 dc 마그네트론 스퍼터링 시스템(magnetron sputtering system)을 이용하여 corning # 1737 glass와 Si P-type (100) 웨이퍼 위에 증착하여 조사하였다. 시편의 일정한 형태를 유지하기 위하여 제작된 금속 마스크를 사용하여 인가자장 없이 증착하였다. 초기진공도(background pressure)는 2.5×10^{-7} Torr 이하를 유지하였고, 작업진공도(working pressure)는 Ar gas를 주입하여 1.7 mTorr 이하로 유지하였다. 바닥(bottom)층과 꼭대기(top)층으로 Ta 물질을 2.1 nm 증착하였다. 시편 제작 시 사용한 각 물질 Ta, FeMn, Pd, Co 그리고 CoFe의 증착 비는 0.06-0.11 nm/s의 범위로 제작하였다. 이와 같이 제작된 시료는 수직자기이방성 효과에 의한 자화 거동을 통한 H_{ex} 와 H_c 를 조사하기 위하여 4-탐침법 자기저항 측정 장비를 이용하여 실온에서 extraordinary Hall effect(EHE)를

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

측정하였다[9-11]. 그리고 자화거동을 관찰하기 위하여 vibrating sample magnetometer(VSM)을 측정하였다. 또한 강자성체 CoFe 물질을 삽입과 두께의 증가에 따라 결정성장의 변화를 확인하고자 Cu-K α radiation을 갖는 x-ray diffraction (XRD)를 측정하여 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

수직자기이방성을 발생하는데 중요하게 작용하는 요인은 [Pd/Co] 다층박막의 표면자기이방성(surface anisotropy)과 강자성체에 의한 부피자기이방성(bulk anisotropy) 두 가지로 고려할 수 있으며, 전체 이방성 효과 K_{eff} 는 다음과 같이 정의한다.

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

여기서, K_v 는 부피이방성이며, K_s 는 Pd와 결합하는 강자성체의 전체 계면의 표면이방성 에너지이고, t 는 강자성체의 두께이다[12-14].

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co] 다층박막의 최적화된 두께는 각층의 두께에 따라 EHE 측정 그리고 VSM 측정 결과 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅ 다층박막에서 가장 최적화된 결과의 히스테리 곡선을 얻었다[15].

Fig. 1은 수직자기이방성을 갖는 Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₄/Pd(0.6)/NiFe(t)/FeMn(10)/Ta(2.1) 구조에서 삽입층 NiFe에 두께에 따른 (a) EHE 측정 히스테리 곡선과 이 측정 결과로부터 얻어진 (b) 교환바이어스(H_{ex})와 보자력(H_c)을 나타낸 것이다. 수직자기이방성을 갖는 [Pd/ferromagnet] 다층박막에서 반강자성체 FeMn에 접한 강자성체로 사용한 NiFe의 두께를 0.08 nm에서 4.0 nm까지 증가시키에 따라 교환바이어스는 0.78 nm와 1.28 nm 두께에서 360 Oe의 높은 교환바이어스를 얻었다. 1.28 nm 이후 교환바이어스는 51 Oe까지 감소하였다. 한편 보자력은 NiFe 두께가 0.32 nm 이상에서 감소하였다. NiFe가 삽입되지 않은 [Pd(0.6)/Co(0.2)]₄/Pd(0.6)/FeMn에 경우 교환바이어스는 발생하지 않았으며, 이 결과는 보고된 것이다[16, 17]. NiFe의 두께가 0.08 nm 경우에 53 Oe의 작은 교환바이어스가 나타난다. 이것은 Pd와 강자성체 사이 계면에서 stress로 기인한 잡아당김으로 발생하는 수직자기이방성이 약하게 발생하여 교환바이어스가 작게 나타난 것이다. 하지만 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₄ 다층박막의 강한 수직자기이방성으로 인해 보자력은 550 Oe의 값을 얻었다. NiFe의 두께가 0.72 nm까지 증가함에 따라 378 Oe의 교환바이어스가 증가하였다. 이는 NiFe의 두께가 증가함에 따라 [Pd/Co]₄ 다층박막에서 발생하는 강한 수직자기이방성과 NiFe 층

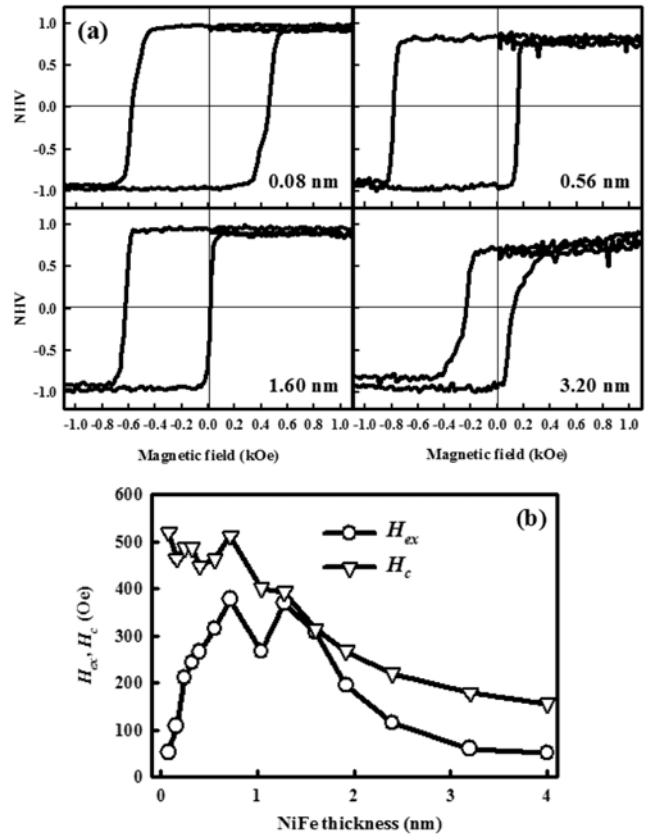


Fig. 1. The (a) EHE(extraordinary Hall effect) curves, (b) H_{ex} and H_c as a function of NiFe thickness in Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₄/Pd(0.6)/NiFe(t)/FeMn(10)/Ta(2.1) multilayer.

사이의 교환이방성의 기인하여 교환바이어스가 일어났으며 [18]. 교환바이어스의 증가는 NiFe 층에서의 강한 수직자화와 NiFe 두께가 증가함에 따라 발생하는 수평 자화의 증가로 인한 수직자화의 기울림(canting)으로 교환바이어스가 증가한 것이다. 또한 NiFe 층에서의 수직자기이방성과 두께 증가에 따른 수평자화의 조화로 0.56 nm와 1.60 nm에 보인 EHE 곡선에서 squareness가 향상된 것을 확인할 수 있다. NiFe 두께가 1.28 nm 이상에서 보자력과 교환바이어스의 감소는 NiFe의 두께가 증가하면서 수직자화의 기울임이 증가하여 수직방향의 수평자화가 더 커져 감소하는 것으로 사료되며 이것은 3.20 nm의 EHE 곡선을 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 2는 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) 다층박막에서 강자성체와 반강자성체 사이에 삽입층 Co₈Fe₂의 두께 증가에 따른 (a) MOKE(magneto-optical Kerr effect) 곡선과 (b) 교환바이어스와 보자력을 나타낸 것이다. 삽입층 Co₈Fe₂의 두께가 0 nm에서 1.72 nm까지 증가함에 따른 교환바이어스는 0.68 nm까지는 약 30 Oe 정도의 작은 증가를 보인 후 그 이상의 두께에서는 87 Oe까지 감소하였고 보자력은 0 nm에서 433 Oe로 나타나지만 1.72 nm에서는 120 Oe로 계속적으

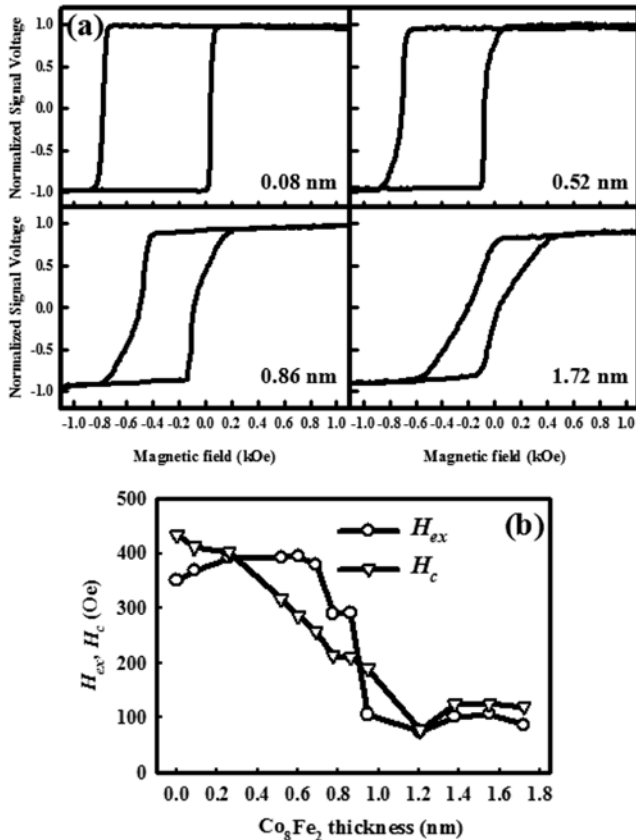


Fig. 2. The (a) MOKE curves, (b) H_{ex} and H_c as a function of Co_8Fe_2 thickness in Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₄/Co₈Fe₂(t)/FeMn(10)/Ta(2.1) multilayer.

로 감소하였다. 삽입층의 두께가 0.08 nm 삽입으로 인하여 교환바이어스는 350 Oe에서 370 Oe로 약간 증가하였고 MOKE의 곡선의 squareness가 계속적으로 잘 유지가 되었으며, 0.68 nm까지는 교환바이어스의 크기가 증가하는 경향을 보이고 있으나 MOKE를 통한 자화곡선에서 비대칭적인 곡선의 형태가 증가하였다. 이것은 Co/FeMn 사이에 삽입층 Co₈Fe₂의 두께 증가에 따라 반강자성층 FeMn과 접하는 Co/Co₈Fe₂ 층에서 부피자기이방성이 서서히 증가하여 발생하는 것이며 이 부피자기이방성 증가로 인한 수평자화의 증가와 [Pd/Co]₅이 갖는 강한 표면자기이방성으로 인한 수직자화의 조화로 교환바이어스는 증가하고 보자력은 계속적으로 감소한 것이다. 또한 교환바이어스의 급격한 감소 역시 Co/Co₈Fe₂에서 부피자기이방성의 증가로 수평자화가 수직자화보다 크게 발생하기 때문에 수직 교환바이어스가 발생하지 않은 것이다. 이 결과로부터 반강자성체와 접하는 강자성층이 갖는 자화 스핀의 방향이 시편 표면에 수직인 방향에서 이루는 각도에 교환바이어스가 크게 영향을 받는 것으로 사료된다. Fig. 3은 수직자기이방성을 갖는 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/Co₈Fe₂(t)/FeMn(10) 다층박막에서 두께의 증가에 따른 결정성

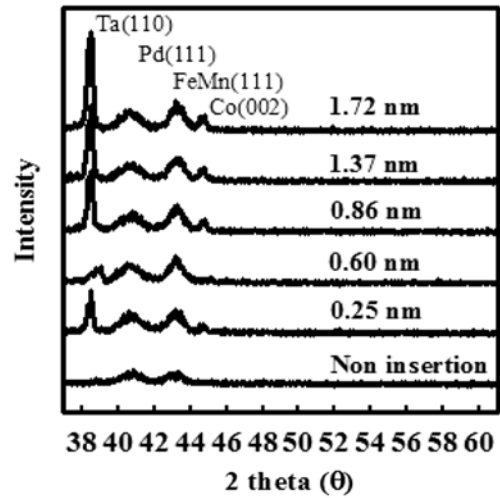


Fig. 3. XRD patterns as a function of Co_8Fe_2 thickness in Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₄/Co₈Fe₂(t)/FeMn(10)/Ta(2.1) multilayer.

장의 영향을 관찰하기 위한 XRD 측정 결과를 보인 것이다. 일반적으로 Pd fcc (111) 피크는 39.8°에서 나타나지만 Pd/Co의 stress로 인하여 Co의 잡아당김으로 인하여 Pd fcc (111) 피크와 hcp α-Co (100)의 합해진 피크가 40.7°에 발생한 것과 FeMn (111)의 피크 43.4°만이 나타난다. 삽입층의 두께가 증가함에 따라 hcp Co (002) 피크와 Ta (110)의 피크가 나타나며, 또한 FeMn (111) 피크가 증가하는 결과가 나타나는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3 XRD 측정 결과에서 보여진 결과에서 40.7°의 Pd, Co 피크와 43.4°의 FeMn 피크가 전혀 변화가 없는 것으로 볼 때 삽입층 Co₈Fe₂의 두께가 증가하면서 반강자성체와 접하는 계면에 표면 거칠기의 변화에 의한 것이다. 또한 hcp Co (002)의 발생은 [Pd/Co] 다층박막에서 꼭대기에 놓이는 Co/Co₈Fe₂에서 Co 원자의 증가에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 수직자기이방성을 갖는 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) 다층박막에서 교환바이어스가 발생하는 Co/FeMn

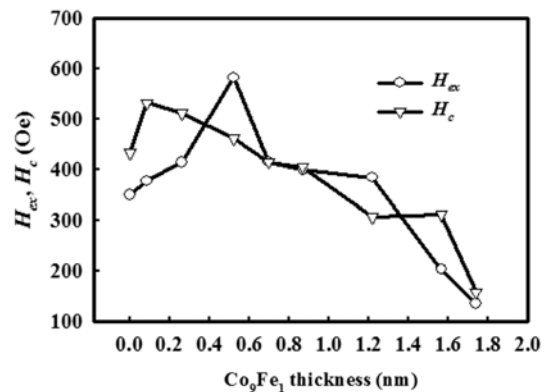


Fig. 4. H_{ex} and H_c as a function of Co_9Fe_1 thickness in Ta(2.1 nm)/[Pd(0.6)/Co(0.2)]₄/Co₉Fe₁(t)/FeMn(10)/Ta(2.1) multilayer.

사이의 계면에 삽입층 Co_9Fe_1 의 두께 증가에 따른 교환바이어스와 보자력의 변화를 보인 것이다. Co_9Fe_1 의 증가에 따라 교환바이어스와 보자력은 증가 후 감소하는 결과를 얻었다. 이때 교환바이어스는 0.52 nm에서 가장 큰 582 Oe 그리고 보자력은 0.9 nm에서 532 Oe의 큰 결과를 얻었다. 여기서 보자력의 증가는 강자성체 Co_9Fe_1 가 [Pd/Co] 다층박막이 갖는 강한 수직자기이방성으로 인하여 Co_9Fe_1 의 자화가 수직으로 쉽게 정렬했기 때문이다[18]. 그리고 그 이후의 감소하는 결과는 Co_8Fe_2 의 경우와 마찬가지로 부과자기이방성의 증가로 인한 것이라 할 수 있다. 반면 교환바이어스는 Co_8Fe_2 의 경우와는 달리 약 200 Oe의 증가한 결과를 얻었으며, 교환바이어스의 감소는 Co_8Fe_2 의 경우 급격한 감소를 보인 반면 Co_9Fe_1 의 경우 0.52 nm 이후에서 교환바이어스는 서서히 감소하였다. 이는 Co_9Fe_1 이 인접한 강자성체가 갖는 자기이방성에 쉽게 영향을 받는 특성으로 인하여 부과자기이방성의 증가에도 불구하고 수직자기이방성이 강하게 유지되기 때문에 나타나는 결과라고 할 수 있다. 이 결과로 스핀밸브 디바이스의 응용적인 면에서 Co_9Fe_1 을 삽입함으로써 큰 교환바이어스를 갖는 향상된 디바이스를 만들 수 있는 가능성을 제시한 것이라 할 수 있다.

IV. 결 론

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co]₅/FeMn 다층박막 구조에서 강자성 물질 NiFe, Co_8Fe_2 그리고 Co_9Fe_1 의 삽입층 물질과 각 물질의 두께에 따른 교환바이어스와 보자력의 변화를 관찰하였다. 수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co] 다층박막에서 FeMn과 접하는 꼭대기 Co 층 대신에 NiFe를 삽입하여 두께 증가에 따라 0.78 nm와 1.28 nm에서 가장 큰 360 Oe의 교환바이어스를 얻었다. 이 크기는 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) 다층박막에서 갖는 교환바이어스 350 Oe에 비해 크게 변화가 없는 것이라 할 수 있다. 그래서 [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) 다층박막에서 Co/FeMn 사이에 Co_8Fe_2 와 Co_9Fe_1 물질의 삽입하여 두께 증가에 따라 교환바이어스와 보자력의 변화를 관찰한 결과, 두 경우 모두 두께 증가에 따라 교환바이어스는 증가 후 감소하는 경향이 나타났지만 Co_8Fe_2 의 경우 0.68 nm에서 380 Oe의 결과를 얻었으며, 또한 감소가 급격히 발생하는 반면, Co_9Fe_1 의 경우 0.52 nm에서 가장 큰 580 Oe의 결과를 얻었고 삽입층의 두께 증가에 따라 서서히 감소하였다. 그리고 보자력은 Co_8Fe_2 삽입층의 경우 두께 증가에 따라 감소하였고 Co_9Fe_1 일 경우 증가 후 감소하는 경향을 얻었다. 이는 삽입층 Co_9Fe_1 는 인접한 자기이방성에 쉽게 영향을 받아 따라가는 특성으로 인하여 보자력과 교환바이어

스 모두 증가의 특성이 나타나는 것이라 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2007학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. W. Joo, J. H. An, M. S. Lee, S. D. Choi, K. A. Lee, S. W. Kim, S. S. Lee, and D. G. Hwang, *J. Appl. Phys.*, **99**, 08R504 (2006).
- [2] F. Garcia, F. Fetta, S. Auffret, B. Rodmacq, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.*, **93**, 8397 (2003). and references therein.
- [3] J. Camerero, Y. Penne, J. Vogel, M. Bonfim, S. Pizzini, F. Ernult, F. Fetta, F. Garcia, F. Lancon, L. Billard, and B. Dieny, *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 27201 (2003).
- [4] H. G. Cho, Y. K. Kim, and S. R. Lee, *IEEE Trans. Magn.*, **38**(5), 2685 (2002).
- [5] S. Maat, K. Takano, S. S. P. Parkin, and E. E. Fullerton, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 087202 (2001).
- [6] C. H. Marrows, *Phys. Rev. B*, **68**, 012405 (2003).
- [7] J. Sort, B. Dieny, M. Fraune, C. Koenig, F. Lunnebach, B. Beschoten, and G. Guntherodt, *Appl. Phys. Lett.*, **84**(18), 3696 (2004).
- [8] S. V. Dijken, J. Moritz, and J. M. D. Coey, *J. Appl. Phys.*, **97**, 063907 (2005).
- [9] K. Hong and N. Giordano, *J. Magn. Magn. Mater.*, **151**, 9855 (1995).
- [10] S. Haan, C. Lodder, and T. J. A. Popma, *J. Magn. Soc. Jap.*, **15**, 349 (1991).
- [11] S. Nakagawa, K. Takayama, A. Sato, and M. Naoe, *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2739 (1999).
- [12] J. Sort, B. Rodmacq, F. Garcia, S. Auffret, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.*, **95**(11), 7163 (2004).
- [13] J. Sort, B. Dieny, M. Fraune, C. Koenig, F. Lunnebach, B. Beschoten, and G. Guntherodt, *Appl. Phys. Lett.*, **84**(18), 3696 (2004).
- [14] J. Moritz, F. Garcia, J. C. Toussaint, B. Dieny, and J. P. Nozieres, *Europhysics Lett.*, **65**(1), 123 (2004).
- [15] 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).
- [16] H. W. Joo, J. H. An, M. S. Lee, B. K. Kim, S. D. Choi, and K. A. Lee, *J. of Kor. Mag. Soc.*, **14**(5), 192 (2004).
- [17] F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3537 (2003).
- [18] Naoki Nishimura, Tadahiko Hirai, Akio Koganei, Takashi Ikeda, Kazuhisa Okano, Yoshinobu Sekiguchi, and Yoshiyuki Osada, *J. Appl. Phys.*, **91**(8), 5246 (2002). and references therein.

Dependence of Coercivity and Exchange Bias by Thickness and Materials of Inserted Layer in [Pd/Co]₅/FeMn Multilayer with Out-of-plane Magnetic Anisotropy

Jang Heo, Dong-hun Park, Wang-son Kang, Sang-hun Ji, and Ky-am Lee*

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

(Received 17 September 2008, Received in final form 9 October 2008, Accepted 9 October 2008)

We observe the change of coercivity and exchange bias, depending on inserting material and thickness in a [Pd(0.6 nm)/Co(0.2)]₅/FeMn(10) multilayer structure with perpendicular anisotropy. When 0.78 and 1.28 nm thick NiFe substitutes for Co in a [Pd(0.6 nm)Co(0.2)]₄/Pd(0.6)/NiFe(t)/FeMn(10) structure, we obtain the exchange bias of 360 Oe. In addition, when Co₈Fe₂ and Co₉Fe₁ are inserted for Co/FeMn interface, we obtain the exchange bias of 380 nm for a 0.68 nm thick Co₈Fe₂ and 580 Oe for a 0.52 nm thick Co₉Fe₁.

Keywords : perpendicular magnetic anisotropy, exchange bias, coersivity, Pd/Co multilayer, insertion layer, NiFe, CoFe