

[Pd/Co]₅/FeMn 막에서의 바닥층과 삽입층에 의한 교환바이어스수직자기이방성

주호원* · 안진희 · 이미선 · 김보근 · 최상대 · 이기암
물리학과, 단국대학교 안서동, 천안 330-714

(2004년 10월 1일 받음, 2004년 10월 20일 최종수정본 받음)

본 연구는 [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm) 구조의 다층박막을 dc 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 교환결합된 수직자기이방성에 대한 자기적 특성을 조사하였다. [Pd/Co] 다층막과 FeMn 층 사이에 Pd층을 얇게 삽입함으로써 교환바이어스 세기(exchange biasing field : H_{ex})가 127 Oe에서 145 Oe로 개선된 결과를 얻었다. 하지만 열적안정성 실험 결과 삽입층이 삽입된 경우 삽입되지 않은 경우 보다 약 50°C 낮은 200°C 에서부터 감소하는 결과를 얻었다. 바닥층 물질에 따른 H_{ex} 와 보자력(coercivity : H_c)의 변화를 조사한 결과, H_{ex} 는 바닥층이 Ta 그리고 Pd인 경우, 각각 최대 127 Oe, 169 Oe를 얻었다. 반면, H_c 는 바닥층이 Ta 그리고 Pd 층인 경우, 각각 최대 203 Oe, 453 Oe를 얻었다.

주제어 : 수직자기이방성, 교환바이어스, 바닥층, 삽입층, 열처리효과

I. 서 론

강자성/반강자성체 사이의 교환바이어스에 대한 연구는 최근까지 초고밀도 자기기록 매체나 자기박막 센서 등의 여러 분야로의 광범위한 응용성 때문에 활발히 연구되고 있다. 반강자성체와 직접 결합하는 강자성체 계면에서 반강자성체에 기인하여 발생하는 교환바이어스 효과는 강자성체를 반강자성체와 접하면서 두 자성층 사이 계면에서의 상호작용으로 인하여 발생한다. 여기에서 반강자성층 스핀들은 강자성-반강자성 상호작용에 대해 외부자장과 약한 결합을 한다. 이러한 두 물질의 계면에서 교환바이어스세기는 거시적으로 히스테리 곡선의 shift 된 정도로 관찰한다. 그리고 일반적인 교환바이어스효과 연구는 인가자장을 막 평면과 수평한 방향으로 인가하여 막 평면으로 일축이방성을 유도하여, 반강자성체 위에 막 평면으로의 자화 용이축(easy-axis)을 갖는 강자성층 사이의 계면에서의 교환결합력에 대한 연구가 거의 대부분 보고되어져 왔다. 하지만 최근에는 NiO, CoO, 그리고 FeMn과 같은 반강자성체 위에 [Pd/Co]나 [Pt/Co] 다층박막의 구조에서 제작시 인가자장 없이 막 평면에 대해 수직의 수직자기이방성을 갖는 교환바이어스가 보고 되어지고 있다[1-3]. 이러한 수직자기 교환바이어스를 갖는 박막은 자기 박막 센서나 초고밀도 자기 기록 매체에 많은 응용성을 가지고 있기 때문에 활발히 연구되어지고 있으며, 특히 단위면적에 기록 할 수 있는 용량의 한계를 극복 할 수 있다는 점에서 많은 흥미를

끌고 있다. 또한 아직까지도 모든 현상에 대해 설명되어진 것이 아니기 때문에 앞으로도 많은 발전 가능성을 가지고 있다.

본 논문은 반강자성층으로 FeMn을 이용하여 [Pd/Co] 다층막과 반강자성체 사이에 계면에 Pd를 삽입하여 두께 변화에 따른 의존성과 열처리를 통한 온도 의존성을 조사하였다. 그리고 바닥층을 Ta과 Pd층으로 하였을 때 두께 변화에 따른 보자력(H_c)과 교환바이어스세기(H_{ex})의 변화를 관찰하였다. 또한 수직자기이방성에 대해 교환결합된 자구를 관찰하기 위하여 Magnetic Force Microscopy(MFM) 측정 장비를 사용하였다.

II. 실험방법

[Pd/Co]_N/FeMn 구조의 다층박막은 3인치 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템을 사용하여 2.25 mm² 크기의 코닝 1737 글래스 기판 위에 실온에서 증착하였다. 기판의 불순물을 제거하기 위하여 아세톤, 에탄올, 증류수를 사용하여 초음파 세척기로 세척하여 준비하였으며, 시편 제작 시 일정한 형태를 유지하기 위하여 제작된 마스크를 사용하여 증착하였다. 초기 진공도는 9.0 × 10⁻⁷ Torr 이하를 유지하였으며, 작업진공도는 Ar 유입량을 MFC(Mass Flow Controller)로 제어하여 2.0 × 10⁻⁴ Torr 에서 증착하였다. 각 층 Ta, Pd, Co, 그리고 FeMn은 각각 1.0 Å/s, 1.4 Å/s, 1.7 Å/s 그리고 1.0 Å/s 의 증착비로 제작하였다. 그리고 FeMn 증착 후 산화를 방지하기 위하여 보호층을 증착하였다. 이와 같이 제작된 시료의 수직자기이방성에 대한 H_{ex} 와 H_c 을 측정하기 위하여 4-탐침법 자기저항 측정 장비를 이용한 Hall effect를 측정하여 관찰하였다[4,5]. 시편

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

의 결정성장을 관찰하기 위하여 XRD 측정장비를 사용하여 측정하였다. 또한 시편의 표면과 자구를 관찰하기 위하여 DI 사 Dimension 3100 IV-a를 이용하여 Atomic Force Microscopy(AFM)과 Magnetic Force Microscopy(MFM)을 측정하여 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/Pd(t nm)/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 다층박막에서 삽입층 Pd의 두께에 따른 Normalized Hall Voltage(NHV) 곡선과 교환바이어스세기 (H_{ex})를 나타낸 것이다. 그림에서 보여 지듯이 삽입층 두께를 0.84 nm까지 증가시켰을 때, 교환바이어스의 세기가 증가 후 현저히 감소하는 현상을 볼 수 있다. Pd 두께를 0 nm에서

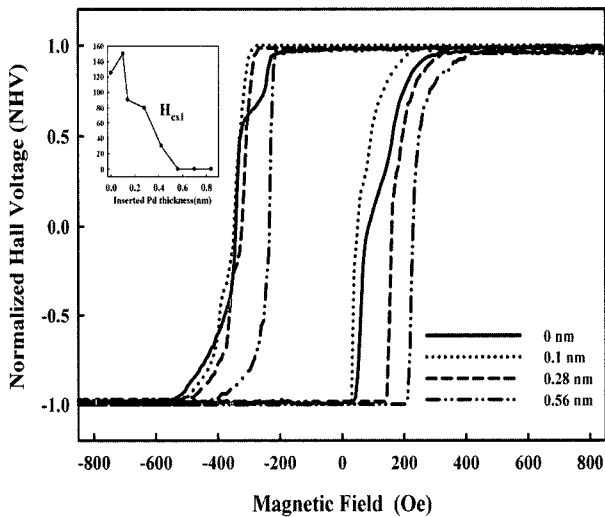


Fig. 1. The NHV curves as a function of inserted Pd thickness in Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/Pd(t nm)/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) multilayers. The insert shows H_{ex} as a function of Pd thickness.

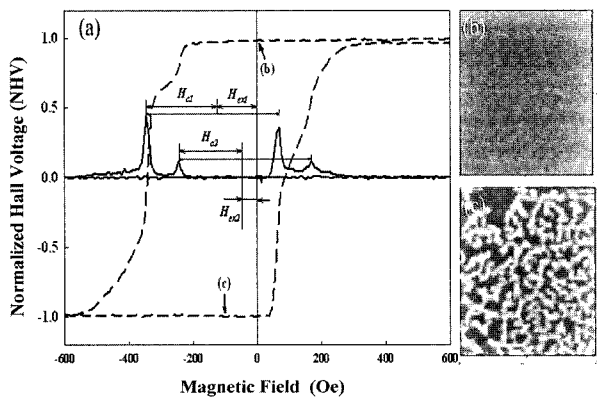


Fig. 2. The (a) NHV, $ld(NHV)/dH$ curves and (b)(c)Magnetic Force Microscopy (MFM) images of Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) multilayers.

0.1 nm로 증가시켰을 때 H_{ex} 는 127 Oe에서 145 Oe로 증가하였다. 이 결과로부터 FeMn 층과 [Pd/Co] 다층막 사이에 Pd 층을 얇게 삽입함으로써 교환바이어스의 세기를 개선할 수 있다는 결과를 얻었으며, 또한 증가 후 감소하는 현상은 보고된 결과들과 같은 경향을 나타낸다[6]. NHV 곡선에서 주목할 것은 Pd를 삽입함으로써 해서 위쪽 모서리에서 비대칭 step 현상이 사라지는 현상을 볼 수 있다. 하지만 비대칭의 사각형의 형태는 계속적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 비대칭 step 현상은 FeMn층과 직접 교환 결합된 Co 바닥층과 FeMn층에 약하게 결합된 꼭대기 Co층의 자기특성의 차이에 기인한다. 이러한 자기특성의 차이는 Co/FeMn층 사이 계면에 Pd를 삽입함으로써 확인할 수 있었다. 또한 비대칭 step(H_{ex2} , H_{c2})의 교환바이어스의 세기와 보자력을 결정짓고자로 계산하였다. 이 계산된 결과는 Fig. 2에 일반적인 step(H_{ex1} , H_{c1})과 비대칭 step(H_{ex2} , H_{c2})으로 구분하여 나타내었다. 이 곡선에서 H_{ex1} , H_{ex2} , H_{c1} 그리고 H_{c2} 의 결과값은 각각 127 Oe, 40 Oe, 190 Oe 그리고 180 Oe를 얻었다.

Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 구조에서 포화자화 되었을 때 자구의 형태를 확인하고자 Magnetic Force Microscopy(MFM)측정 장비를 이용하여 20×20 μm의 크기로 얻어진 그림을 나타내었다. MFM Fig. 2(b)는 NHV 곡선에서 상위 포화자화 상태의 그림이며, 그림 2(c)는 하위 포화자화 상태의 그림이다. Fig. 2(b)와 (c)의 그림은 확연히 다른 결과를 나타내고 있다. 여기서 Fig. 2(b)는 시편중착 면에 수직의 한쪽 방향으로 스핀이 배열되어 있는 것으로 사료되며, Fig. 2(c)는 색의 검은 부분과 하얀 부분이 고루 분포하는 것으로 보아 스핀들이 서로 엇갈려 분포된 것으로 사료된다.

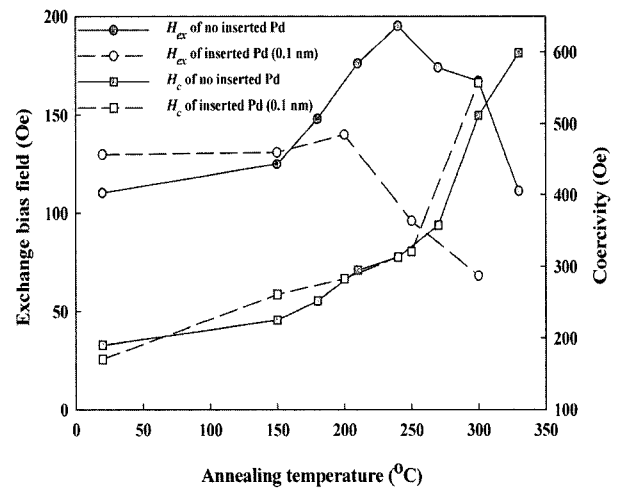


Fig. 3. The exchange bias field(H_{ex}) and coercivity(H_c) as a function of the annealing temperature in Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/Pd(0, 0.1 nm)/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) multilayers.

Fig. 3은 Ta(1.9 nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/Pd(0, 0.1 nm)/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 다층박막 구조에서 FeMn층과 [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)] 다층박막의 사이에 Pd를 0 nm 그리고 0.1 nm을 삽입하였을 때 열처리 온도에 따른 H_{ex} 와 H_c 의 변화를 나타낸 것이다. 열처리 온도가 증가함에 따라 H_{ex} 는 Pd 층이 삽입 되지 않은 경우 240°C 까지는 110 Oe에서 195 Oe으로 증가 후 감소하였다. Pd 층이 0.1 nm 삽입된 경우 200°C 까지는 130 Oe에서 140 Oe으로 약간 증가한 후 감소하였다. 그리고 두 경우 모두 330°C에서는 수직자기이방성에 의한 곡선이 사라졌다. H_{ex} 의 증가하는 현상은 열처리를 통하여 [Pd/Co] 다층에서 FeMn층과 직접 접촉하는 Co층 사이에 계면에서의 확산효과와 자성층들의 스핀이 재배열함으로써 인하여 증가하는 것으로 사료된다. 하지만 Pd층을 삽입한 경우 삽입되지 않은 경우보다 H_{ex} 가 적게 증가하고 Pd가 삽입되지 않은 경우 보다 낮은 온도에서 감소하는 현상들은 계면에서의 확산에 기인하여 H_{ex} 를 증가시키는 효과를 Co/FeMn층 사이에 Pd층이 삽입되어 두 층이 분리됨으로서 열처리를 통한 확산효과가 차단되어 H_{ex} 를 증가시키는 효과가 발생하지 않았기 때문으로 사료된다. 또한 감소하는 현상은 산란의 정도가 강한 Mn 원자가 열처리 온도의 증가에 따라 보호층 Ta로 빠르게 확산하는 효과로 인하여 발생한다 [7,8]. 두 경우의 H_c 변화는 열처리 온도가 증가함에 따라 비슷한 경향으로 증가하였다.

Fig. 4 는 Ta(t nm)/[Pd 0.8 nm]/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) 다층막 구조에서 바닥층 Ta의 두께에 따른 NHV 곡선, H_{ex1} , H_{ex2} , H_{c1} 그리고 H_{c2} 의 변화를 나타낸 것이다. 바닥층 Ta 의 두께가 증가함에 따라 H_{ex1} 는 증가 후 감소하는 경향을 나타내고 있다. 바닥층 Ta 이 없는 경우 수직자

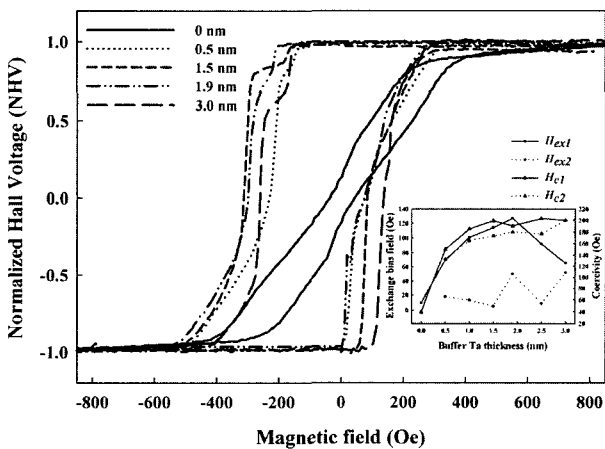


Fig. 4. The NHV curves as a function of buffer Ta thickness in Ta(t nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Ta(1.9 nm) multilayers. The insert shows H_{ex1} , H_{ex2} , H_{c1} and H_{c2} as a function of buffer Ta thickness.

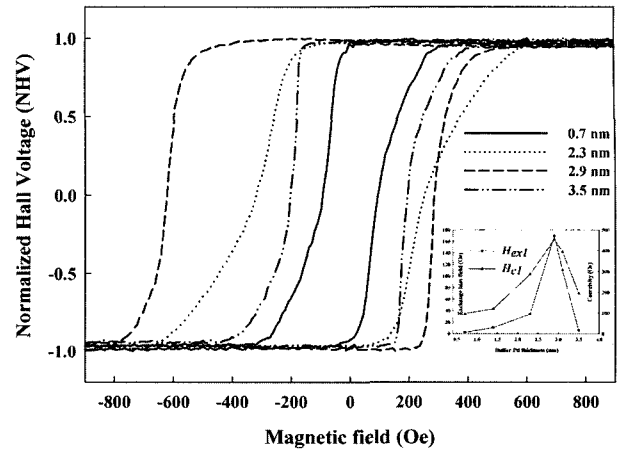


Fig. 5. The NHV curves as a function of buffer Pd thickness in Pd(t nm)/[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Pd(2.9 nm) multilayers. The insert shows H_{ex1} and H_{c1} as a function of buffer

기이방성에 의한 교환결합이 발생하지 않았다. Ta층의 두께가 0.5 nm에서 70 Oe였으며, 두께를 1.9 nm 까지 증가시켰을 때 H_{ex1} 는 127 Oe 까지 증가하였다. 그리고 Ta층의 두께 3.0 nm 까지 증가하였을 때 65 Oe 로 감소하였다. 반면 H_{c1} 은 Ta 두께 증가에 따라 1.5 nm 까지 197 Oe 로 현저하게 증가 후 거의 변화가 없었다. 또한 H_{c2} 도 H_{c1} 과 같은 경향을 나타내었다. 이 구조에서의 결정성장을 확인하고자 XRD 측정 결과 fcc Pd/Co의 (111) 피크를 40.7° (2θ)에서 확인하였으며, FeMn의 (111) 피크를 43.3° (2θ)에서 확인하였다[9,10]. 그리고 각각의 회절 세기의 결과로부터 FeMn 층의 회절의 세기가 1.9 nm 까지 증가하다가 다소 감소하는 경향을 관찰하였다. 또한 표면 거칠기의 영향을 확인하고자 Atomic Force Microscopy(AFM)을 이용하여 측정하였으나 확실한 경향의 결과는 얻지 못하였다.

Fig. 5는 Pd(t nm)/[Pd 0.8 nm]/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm)/Pd(2.9 nm) 다층막 구조에서 바닥층 Pd의 두께에 따른 NHV 곡선, H_{ex1} 그리고 H_{c1} 의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과 H_{ex1} 는 두께가 3.0 nm까지 증가함에 따라 169 Oe까지 증가하였으며, 그 이상 Pd 두께를 증가시키면 급격히 감소하였다. 또한 보자력 역시 3.0 nm 두께에서 453 Oe로 증가 후 3.5 nm에서는 195 Oe로 급격히 감소하였다. 이 결과, 바닥층을 Ta 층으로 했을 경우와 비교해 볼 때 수직자기이방성에 의한 H_{ex1} 의 경우 비슷한 경향을 볼 수 있으며, H_{c1} 의 경우는 두께가 증가함에 따라 조금 다른 경향을 나타내었다. 특히 바닥층이 Ta 인 경우의 보자력 값보다 바닥층이 Pd 인 경우 비슷한 두께로 볼 때 더 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 두 곡선의 상위 모서리에서 바닥층이 Ta 층인 경우 비대칭 step이 발생하는 반면 Pd 층인 경우는 비대칭 step이 나

타나지 않았다. 이 결과로 바닥층 물질에 따라 H_{ex1} 그리고 H_{c1} 의 영향을 받는다는 결과를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

[Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm) 구조의 다층박막을 dc 스퍼터링 시스템으로 증착하여 수직이방성에 의한 자기적 특성을 조사하였다. [Pd/Co] 다층막과 FeMn 층 사이에 Pd를 삽입함으로써 인하여 H_{ex} 가 얇은 두께에서 증가 후, 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다. 이에 Co/FeMn 층 사이에 얇은 Pd 층을 삽입함으로써 H_{ex} 를 증가시키는 효과를 얻었다. 그리고 NHV 곡선 상위 모서리에 비대칭 step이 나타나는 현상은 FeMn 층과 직접적으로 결합하는 Co 층과 꼭대기 Co 층의 자기 특성의 차이에 기인한다는 것을 확인할 수 있었으며, 수직자기이방성에 대해 교환결합된 다층박막에서 포화자화 되었을 때 서로 다른 자구의 형태가 나타나는 것을 MFM 을 통하여 얻었다. 삽입층으로 Pd 가 삽입되었을 때와 삽입되지 않았을 때 열적안정성을 확인한 결과, 보자력은 두 경우 모두 열처리 온도 증가에 따라 계속적으로 증가하였다. H_{ex} 는 Pd 층이 삽입되지 않았을 때는 240°C까지 증가하였으며, Pd 층 (0.1 nm)이 삽입된 경우 200°C 까지 증가 후 감소하는 결과를 얻었다. 이것은 Co/FeMn 사이에 삽입층이 삽입됨으로써 두 층이 분리된 상태에서 FeMn 층에 Mn 원자가 열처리를 통해 보호층 Ta 층으로 빠른 확산 효과에 의한 Mn 의 결핍에 기인한 것으로 사료된다. 마지막으로 바닥층 Ta 층과 Pd 층에 따른 H_{ex1} 그리고 H_{c1} 의 실험결과에서 볼 때 수직자기이방성에 대한 H_{ex1} 는 거의 같은 경향의 결과를 얻었으며,

H_{c1} 의 경우는 Pd 바닥층의 경우가 Ta 바닥층의 경우 보다 더 큰 값을 갖는 결과를 얻었다. 이 결과 바닥층 물질이 H_{ex} 그리고 H_c 에 관계한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 비대칭 step이 나타나지 않는 것에 대해서는 조금 더 실험을 해 볼 필요성이 있으며, 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).
- [3] C. H. Marrows, Phys. Rev. B **68**, 12405(2003).
- [4] C. L. Canedy, X. W. Li, and Gang Xiao, J. Appl. Phys. **81**, 5367(2000).
- [5] S. Nakagawa, K. Takayama, A. Sato, M. Naoe, IEEE Trans. Magn. **35**, 2739(1999).
- [6] F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, Appl. Phys. Lett., **83**, 3537(2003).
- [7] S. W. Kim, et al, J. Appl. Phys. **93**, 6602(2003).
- [8] S. S. Lee, D. G. Hwang, and C. M. Park, J. Mag. Mater **89**, 198(1999).
- [9] K. Y. Kim, S. H. Jang, K. H. Shin, H. J. Kim, and T. Kang, J. Appl. Phys. **89**, 7612(2001).
- [10] 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 by Buffer Layer and Inserted Layer in [Pd/Co]₅/FeMn Multilayer

Ho Wan Joo*, Jin Hee An, Mi Sun Lee, Bo Keun Kim, Sang Dea Choi and Kee Am Lee

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

(Received 1 October 2004, in final form 20 October 2004)

Magnetic properties by exchange biased perpendicular magnetic anisotropy in [Pd(0.8 nm)/Co(0.8 nm)]₅/FeMn(15 nm) multilayers deposited by dc magnetron sputtering system are investigated. As inserted Pd layer of interface between [Pd/Co] multilayer and FeMn film, the H_{ex} of perpendicular anisotropy was improved from 127 Oe to 145 Oe. But result of an experiment by thermal stability, the H_{ex} of the case that an inserted layer was inserted in decreased from low 200°C in about 50°C more if not inserted. If Ta was a buffer layer, the experiment results along material of buffer layer, the H_{ex} obtained the largest 127 Oe. And if Pd was a buffer layer, H_{ex} obtained the largest 169 Oe. Also, the H_c in buffer layer of Ta and Pd obtained the largest 203 Oe and 453 Oe, respectively.

Key words : Perpendicular magnetic anisotropy, Exchange bias, Buffer layer, Insert layer, Annealing effect