

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co] Spin Valve 구조에서 자기저항효과

최진협 · 이기암*

물리학과, 단국대학교, 안서동, 천안 330-714

(2006년 5월 12일 받음, 2006년 6월 26일 최종수정본 받음)

수직자기이방성을 갖는 [Pd/Co] 다층박막으로 구성된 스핀밸브 구조에서 비자성층(space layer, SL) Pd 또는 Cu의 두께와 다층박막의 반복층수 N 에 따른 자기저항효과의 의존성을 연구하였다. 비자성층을 Pd보다 Cu로 사용하였을 때 더 큰 자기저항비를 얻었다. 그리고 Cu층과 고정층 사이에 Co층을 삽입하는 경우 약 3배가량 자기저항비가 증가하는 것을 관찰하였다. $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(2.37)}/Co_{(1)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_2/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 구조에서 삽입된 Co층의 두께가 0.62 nm 또는 1.01 nm에서 최대의 자기저항비 7.4 %를 얻었다.

주제어 : 수직자기이방성, 수직스핀밸브, Pd/Co, 자기저항

I. 서 론

스핀밸브(spin-valves), 자기터널접합(magnetic tunnel junctions) 등에서 발생하는 강자성/반강자성체 사이의 교환바이어스(exchange biasing, H_{ex}) 연구는, 형상 이방성(shape anisotropy)에 의한 수평자기이방성(in-plane magnetic anisotropy)을 갖는 강자성 다층박막에 대하여 대부분 이루어져 왔다. 최근에는 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)을 갖는 Pd/Co, Pt/Co, 또는 Pt/CoFe 다층박막 위에 NiO, FeMn, 또는 IrMn과 같은 반강자성체를 인가자장 없이 증착하여 제작된 수직자기구조의 스핀밸브에서의 교환바이어스에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 이러한 수직자기구조는 자기센서나 자기기록기술에 매우 유용할 것으로 전망된다. 특히 MRAM(magnetic random-access-memory)과 HDD(hard disk driver) read head 장치에 유용하게 사용될 수 있다. 응용적인 측면에서 많은 연구가 이루어지고 있지만, 모든 관찰된 현상을 설명하는 만족스러운 자기적 원인 규명을 얻지 못하였다. 특히, 나노크기 자기구조의 가장자리에서 발생하는 stray-field 효과에 의해 자기저항효과는 작고 불안정해지는 현상이 발견되었다. 이를 극복하고 고밀도 자기정보 장치를 만들기 위하여, 수직자기구조의 스핀밸브 연구가 시급하다[5-7].

본 연구에서는 수직자기이방성을 갖는 다층박막으로 구성된 스핀밸브 구조의 자기저항효과에 대한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 1) Co층의 두께, 2) 비자성층의 조성, 3) 비자성층과 고정층 사이에 Co층을 삽입 여부, 그리고 4) 고정층과 자유층을 이루는 다층박막의 반복층수에 따른 자기저항효

과의 의존성을 관찰하였다. 이를 위하여 각각의 경우에 대한 자기저항비, 교환바이어스, 그리고 보자력(coercivity, H_c)을 측정하였다.

II. 실험 방법

$Ta/[Pd/Co]_N/SL/[Pd/Co]_M/FeMn/Ta$ 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, 증류수의 순서로 초음파 세척기에서 세척하였으며, 다층박막 증착 시 일정한 형태를 유지하기 위하여 제작된 금속 마스크를 사용하여 증착하였다. 증착 시 초기 진공도는 3.0×10^{-7} Torr 이하를 유지하였으며, 작업진공도는 Ar 유입량을 MFC(Mass Flow Controller)로 제어하여 2.0×10^{-3} Torr에서 증착하였다. 각 층의 증착비율은 0.08 nm/s~0.11 nm/s 범위에서 증착하였다. 이와 같이 제작된 시료는 수직자기이방성에 대한 교환바이어스와 보자력을 측정하기 위해 4-탐침법 장비를 이용하여 EHE(extraordinary hall effect)와 자기저항을 측정하였다[8, 9]. 이렇게 측정된 곡선을 통하여 교환바이어스와 보자력의 변화를 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

$Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(1)}]_5/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 다층박막에서 Co 두께에 따른 실험결과를 통하여, 강한 PMA를 가지는 최적의 Co 두께를 결정하였다. 이 실험결과에서 Co의 두께가 0.16 nm일 때 교환바이어스(H_{ex})와 보자력(H_c)은 각각 최대값으로서 360 Oe와 633 Oe를 나타냈다. 이때 EHE에 의하여 측정

*Tel: (041) 550-3423, E-mail: kalee@anseo.dankook.ac.kr

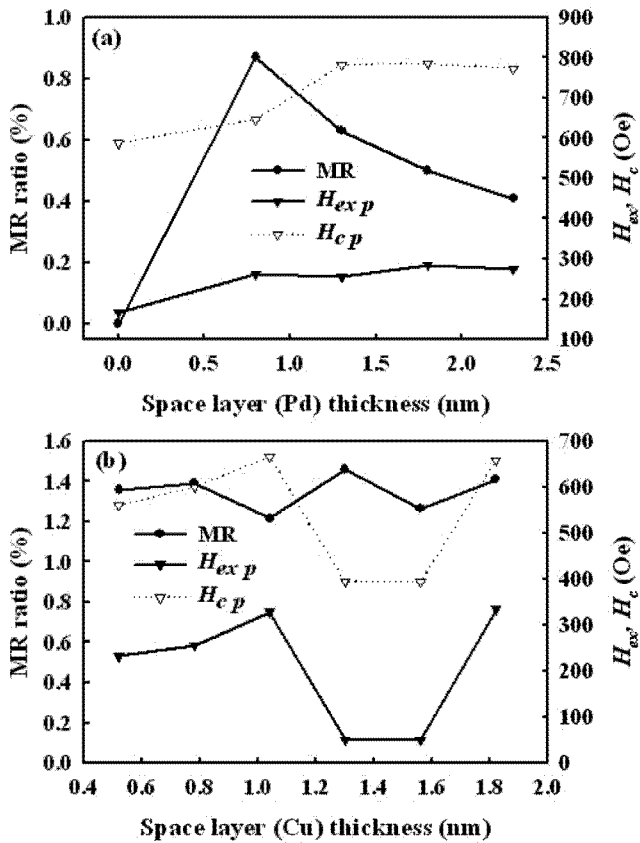


Fig. 1. Magnetoresistance ratio (%), H_{ex} and H_c as a thickness of space layer (a) Pd and (b) Cu in $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/SL_{(t)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$.

된 히스테리시스 곡선에서 얻어진 명확한 직사각형의 형태는 강한 수직자기이방성효과가 발생하였음을 나타낸다. Co층의 두께가 두꺼워짐에 따라 Co층 사이의 수직교환결합력이 약화되고, 이에 따라 H_{ex} 와 H_c 가 감소하는 현상이 관찰되었다. 또한 Co 두께가 0.31 nm보다 두꺼워지면 비대칭적인 히스테리시스 곡선이 관찰되었다. 이는 Co의 두께가 두꺼워짐에 따라 부피이방성(volume anisotropy) 증가에 의해 나타난 것이다. 이러한 실험적 결과를 통하여 본 연구에서는 Co의 최적 두께를 0.16 그리고 0.23 nm를 선택하였다. Fig. 1은 $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/SL_{(t)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 구조에서 비자성층(SL) 두께에 대한 자기저항비, 교환바이어스(H_{exp}) 그리고 보자력(H_{cp})의 변화를 보여준다. 그림에서의 첨자 p는 고정층(pinned layer)의 값을 나타낸다.

Fig. 1(a)는 비자성층이 Pd로 구성된 시료의 자기적 특성을 보여준다. 교환바이어스와 보자력은 모두 Pd층의 두께가 증가함에 따라 증가하다가 특정 두께 이후부터는 일정한 값으로 수렴하였다. 교환바이어스는 0.8 nm에서 보자력은 1.3 nm에서 각각 최대값에 수렴하였다. 반면, 비자성층을 Cu로 사용하였을 때에는 이러한 수렴현상이 관찰되지 않았다. Fig.

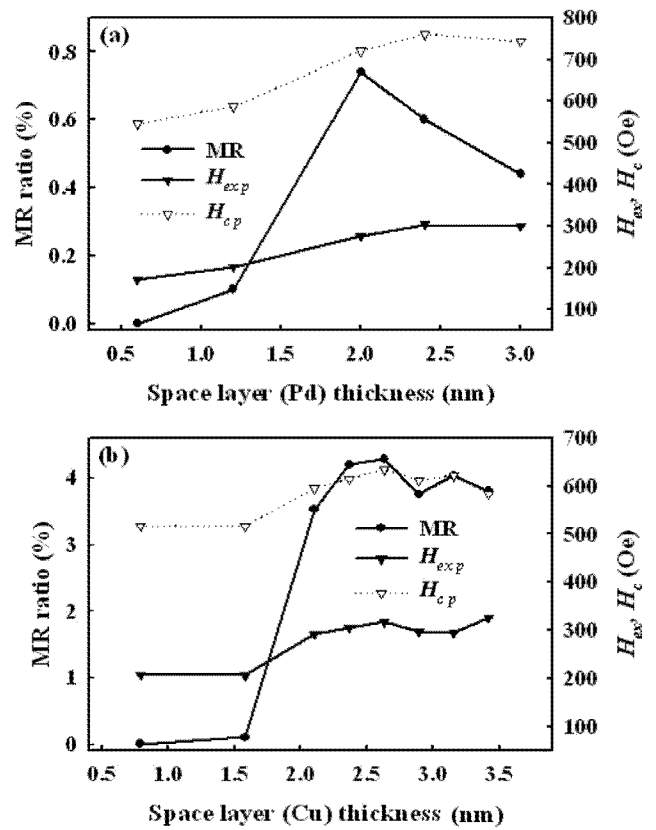


Fig. 2. MR ratio, H_{ex} and H_c as a thickness of space layer (a) Pd and (b) Cu in $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/Pd_{(t)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ and $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(t)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$.

1(b)에서 보는 바와 같이 교환바이어스와 보자력은 두께에 대하여 같은 경향성을 가지고 변화한다. 교환바이어스와 보자력의 최대값은 Cu층의 두께에 따라 두 차례 발생하였으며, 각각 1.04 nm와 1.82 nm에서 발생하였다. 그 최대값은 교환바이어스와 보자력에 대하여 각각 330 Oe와 660 Oe로 측정되었다. 비자성층이 Pd인 시료에서 더 큰 보자력이 발생하였는데, 이는 Pd의 결정성이 Pd/Co 다층박막의 수직이방성을 증가시킨 것으로 사료된다.

비자성층이 Pd인 경우 자기저항비는 0.8 nm 두께에서 0.8%의 최대값을 나타냈으며, 비자성층이 Cu의 경우 자기저항비는 전체적으로 1.2% 이상의 일정한 값을 나타냈다. 비자성층이 Pd인 경우 그 위로 증착된 Co/Pd 다층박막의 Pd층과 같은 물질이기 때문에, 높은 shunting 효과에 의하여 자기저항비가 Cu의 경우 보다 작게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 2는 비자성층과 고정층 사이에 Co를 삽입한 경우의 자기성질을 보여준다. 시료의 조성은 각각 (a) $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/Pd_{(t)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_5/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 와 (b) $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(t)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 이다. Co층의 삽입여부와 무관하게, 교환바이

어스와 보자력에는 별다른 변화가 관찰되지 않았다. 다만 자기저항비는 비자성층이 Cu인 경우, 약 3배가량 증가하여 최대값 4.28%를 얻었다. 이 때의 Cu층의 두께는 2.63 nm이었다. 이 두께에서 교환바이어스와 고정층의 보자력은 각각 320 Oe와 634 Oe로, 이 또한 최대값을 나타냈다. 또한, 이 두께에서 자유층과 고정층 사이의 상호작용력은 최소값 5 Oe를 나타냈고, 자유층의 보자력은 363 Oe로 최대값을 나타냈다. 이는 Cu/Pd 다층박막 사이에 Co를 삽입함으로써 shunting 효과의 감소 및 스핀 산란의 증가가 발생하였고, 이에 따라 고정층과 자유층의 독립성이 유지되어 자기저항비가 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 3(a)는 $Ta_{(2.1\text{nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_N/Cu_{(2.37)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_N/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 구조에서 고정층과 자유층을 이루는 Pd/Co 다층박막의 반복층수 N 을 모두 2와 4로 구성한 시료에서의 MOKE(Magneto-Optical Kerr Effect) 자기이력곡선을 보여준다. Fig. 3(b)는 반복층수 N 에 따른 자기저항비, 교환바이어스, 그리고 보자력의 변화를 보여준다. 반복층수 N 이 2에서 5로 증가함에 따라, 교환바이어스는 550 Oe에서 300 Oe로 감소하였고, 보자력은 350 Oe에서 710 Oe로 증가하였다.

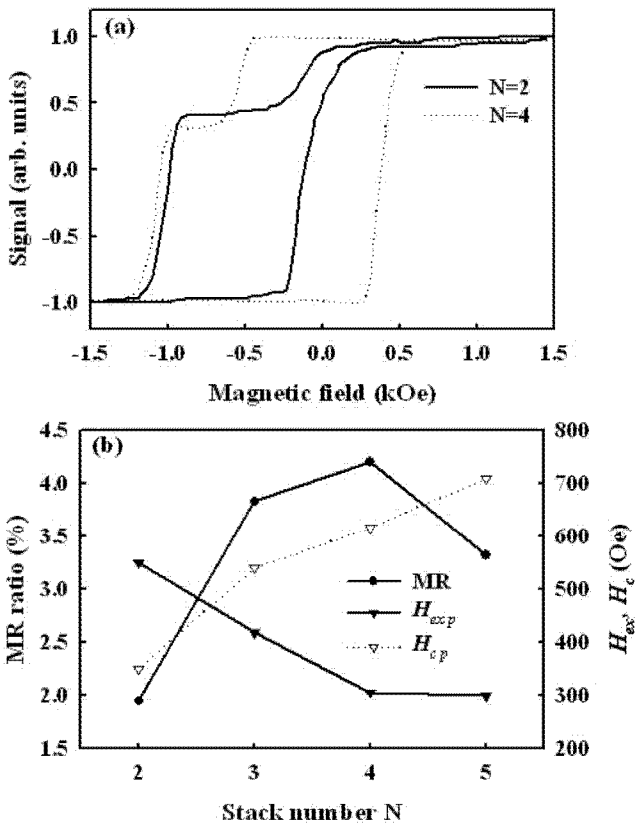


Fig. 3. (a) MOKE curve, (b) MR ratio, H_{ex} and H_c as a function of stack number N in $Ta_{(2.1\text{nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_N/Cu_{(2.37)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_N/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$.

보자력의 증가는 Pd/Co 다층박막이 이루는 계면의 수가 증가함으로써, 수직자기이방성이 증가하였고, 결과적으로 각 다층박막의 보자력이 증가하였다고 이해할 수 있다. 또한, 이로 인하여 고정층의 교환바이어스가 감소한 것으로 사료된다. 자기저항비는 Pd/Co 다층박막의 반복층수 $N=4$ 일 때 최대값 4.28%을 보이고, 반복층수가 더 늘어나면 자기저항비가 감소한다. 이는 자유층의 반복층수가 4보다 커지게 되면, 자유층의 수직자기이방성의 증가하고, 그에 따라 고정층과의 상호작용력이 증가하여, 자기저항비가 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 $Ta_{(2.1\text{nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(2.37)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_N/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 구조에서 자유층의 반복층수는 일정한 값으로 고정하고, 고정층의 반복층수 N 을 변화시키면서 제작된 시료의 자기저항비를 보여준다. 삽입된 그림은 자기저항곡선을 보여준다. 고정층의 반복층수 $N=1$ 일 때, 교환바이어스는 거의 발생하지 않았다. 이는 수직자기이방성을 갖지 못하고 독립적인 고정층으로서의 역할을 하지 못하여 교환바이어스가 발생하지 않은 것으로 사료된다. 보자력은 400 Oe로 측정되었는데, 이는 고정층과 자유층의 분리가 일어나지 않고 하나의 층으로 작용하였기 때문에 나타난 결과이다. 고정층의 반복층수 $N=2$ 일 때 5.3%의 최대 자기저항비를 얻었다. 이 때 교환바이어스는 490 Oe이고 보자력은 398 Oe로 교환바이어스보다 작았다. 또한 그 이상의 층수에서는 Fig. 3(b)에서 보인 결과와 같은 경향을 나타냈다. 자유층의 보자력은 N 의 증가에 따라 390 Oe($N=2$)에서 351 Oe($N=5$)로 감소하였다. 이는 고정층의 반복층수 증가에 따른 수직자기이방성의 증가하였고, 이에 따라 자유층과의 상호작용력이 증가하였기 때문에, 자유층의 보자력이 감소한 것으로 사료된다. 이 현상은 삽입된 자기저항곡선에서 한쪽 곡선이 무너지는 것으로 확인

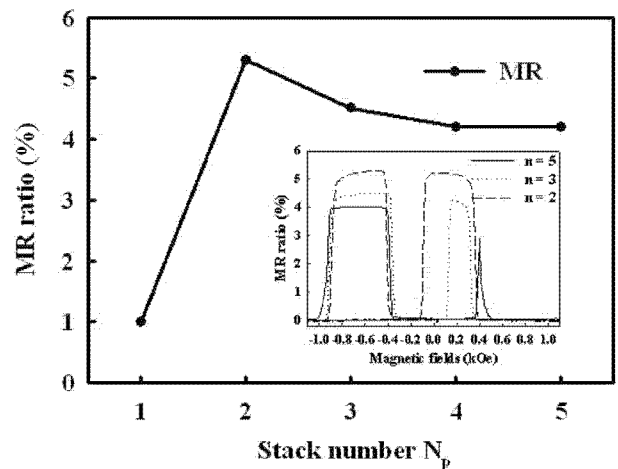


Fig. 4. MR ratio and MR curves as a function of stack number N of pinned layer in $Ta_{(2.1\text{nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(2.37)}/Co_{(0.23)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_N/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$.

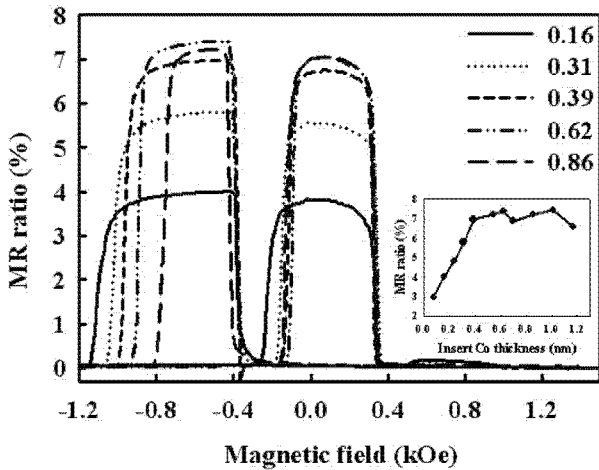


Fig. 5. MR curves and MR ratio as a function of inserted Co layer thickness in $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(2.37)}/Co_{(t)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_2/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$.

할 수 있다. 같은 원인으로 인하여 자기저항비가 4.2%로 감소하였다.

Fig. 5는 $Ta_{(2.1\text{ nm})}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_4/Cu_{(2.37)}/Co_{(t)}/[Pd_{(0.61)}/Co_{(0.23)}]_2/FeMn_{(10.6)}/Ta_{(2.1)}$ 구조에서 Cu층과 고정층 Pd/Co 다층박막 사이에 삽입된 Co 두께 증가에 따른 자기저항 측정곡선을 보여준다. 삽입된 그림은 Co층의 두께에 따른 자기저항비를 보여준다. 삽입된 Co층의 두께가 증가함에 따라 고정층과 자유층 사이의 상호작용력은 16 Oe에서 45 Oe로 증가하였으며, 자유층의 보자력에는 큰 변화가 없었다. 반면 고정층의 교환바이어스는 744 Oe에서 480 Oe로 감소하였고, 고정층의 보자력은 476 Oe에서 380 Oe로 서서히 감소하였다. 삽입된 Co층의 두께가 0.62 nm와 1.01 nm에서 각각 자기저항비가 최대값 7.4%를 나타냈다. 삽입된 Co 두께가 1.17 nm에서는 자기저항비가 6.5%로 감소하였으며, 자기저항곡선에서 한쪽 곡선이 Fig. 4에서 삽입된 $N=5$ 일 때와 같이 무너졌다. 이와 같은 현상은, 삽입된 Co층의 두께가 증가함에 따라 형상이방성에 의한 수평자기이방성이 증가하는데, 이에 따라 그 위로 증착되는 Pd/Co 다층박막의 수직자기이방성이 감소하기 때문에, 고정층의 교환바이어스와 고정층의 보자력이 감소한 것으로 사료된다.

IV. 결 론

수직자기이방성을 갖는 Pd/Co 다층박막으로 구성된 수직스핀밸브 구조에서 자기적 특성을 관찰하였다. 비자성층의 조성, 다층박막의 반복층수, Co층의 삽입 등의 구조를 변화시키면서 최대의 자기저항비를 얻는 최적조건을 찾았다. 최대의 자기저항비를 보이는 시료의 구조는 1) 비자성층으로 Cu 사용, 2) 자유층의 반복회수 4회, 3) 고정층의 반복회수 2회, 4) Cu층과 고정층 사이에 삽입된 Co층의 두께가 0.62 nm 또는 1.01 nm인 경우이다. 이때 자기저항비의 최대값 7.4%를 얻었다. 반면에 보자력은 강한 수직자기이방성에 의해 크게 발생하였다. 높은 자기저항비를 유지하면서 보자력을 낮추는 연구가 필요하겠다.

감사의 글

이 논문은 2005학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] F. Garcia, F. Fettar, S. Auffret, B. Rodmacq, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.*, **93**, 8397 (2003).
- [2] F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3537 (2003).
- [3] S. V. Dijken, M. Besnier, J. Moritz, and J. M. D. Coey, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10K114 (2005).
- [4] Z. Y. Liu, G. H. Yu, G. Han, and Z. C. Wang, *J. Magn. Magn. Mater.*, **299**, 120 (2006).
- [5] Ch. Binek, A. Hochstrat, X. Chen, P. Borisov, W. Kleemann, and B. Doudin, *J. Appl. Phys.*, **97**, 10C514 (2005).
- [6] X. M. Cheng, S. Urazhdin, O. Tchernyshyov, C. L. Chien, V. I. Nikitenko, A. J. Shapiro, and R. D. Shull, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 017203 (2005).
- [7] S. V. Dijken and J. M. D. Coey, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 022504 (2005).
- [8] S. M. Zhou, L. Sun, P. C. Searson, and C. L. Chien, *Phys. Rev. B*, **69**, 024408 (2004).
- [9] K. Hong and N. Giordano, *J. Magn. Magn. Mater.*, **151**, 396 (1995).

Magnetoresistance Effect of [Pd/Co] Spin-valve with Perpendicular Anisotropy

Jin-Hyup Choi and Ky-Am Lee*

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

(Received 12 May 2006, in final form 26 June 2006)

We have investigated the magnetoresistance (MR) effect of the spin valve structures composed of perpendicularly magnetized Pd/Co multilayers, with changing the space layer (Pd or Cu) thickness, the stacking number of the Pd/Co multilayers, and the Co insertion-layer thickness. The Cu space layer showed larger MR ratio than the Pd space layer. The Co insertion-layer between Cu layer and pinned layer enhanced the MR ratio about three times. The maximum MR ratio of 7.4 % was established in the sample with the Co insertion-layer thickness of 0.62 and 1.01 nm.

Key words : perpendicular magnetic anisotropy, perpendicular spin valve, Pd/Co, magnetoresistance