

비정질 강자성체 CoSiB/Pd 다층박막의 두께에 따른 수직자기이방성 변화

임해인*

숙명여자대학교 물리학과, 서울시 용산구 청파47길, 140-742

(2013년 6월 18일 받음, 2013년 8월 20일 최종수정본 받음, 2013년 8월 20일 게재확정)

비정질 합금인 CoSiB과 비자성체 Pd를 이용하여 CoSiB/Pd 다층박막을 제작하고, 그 자기적인 특성을 분석하였다. [CoSiB t_{CoSiB}/Pd 1.3 nm]₅ 다층박막을 $t_{CoSiB} = 0.1\sim 0.6$ nm의 범위로 제작하였고, 동일한 방법으로 [CoSiB 0.3 nm/Pd t_{Pd}]₅ 다층박막을 $t_{Pd} = 1.0\sim 1.6$ nm의 범위로 제작하여 두께에 따른 자기이방성과 포화자화도를 측정하였다. CoSiB 두께가 증가함에 따라 포화자화도가 증가하는 경향을 보였는데, 특히 CoSiB의 두께가 0.2~0.3 nm 일 때 포화자화도가 급격하게 증가하였다. 보자력은 두께 0.2 nm 에서 최대값을 보이다가 두께가 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 확인하였다. Pd의 두께 변화 실험에서는 포화자화도는 1.1~1.2 nm 구간에서 약간 감소하다가 1.3 nm 이후 점차 증가하였으며, 보자력은 포화자화도에 비해 확연한 규칙성을 보이지 않았으나, 전체적으로 Pd의 두께가 증가함에 따라 값이 감소하는 것을 알 수 있었다.

주제어 : 수직자기이방성, CoSiB/Pd, 비정질 강자성체, CoSiB, Pd

I. 서 론

수직자기이방성(Perpendicular magnetic anisotropy, PMA)이란 자성 박막의 표면에서 박막의 평면에 수직인 방향으로 자화가 일어나는 현상이다. 수직자기이방성은 1975년 Co/Cr 합금 박막에서 처음 발견되었고, 최근 고집적화 된 자성 기록매체에 대한 관심이 증가하면서 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 기존의 MRAM(Magnetic Random Access Memory)이 보완하지 못한 고집적화의 문제를 해결하기 위해 스핀전달토크(Spin Transfer Torque, STT)가 도입되면서, 수직자기이방성을 갖는 자성체 다층박막이 STT-MRAM에 적용 가능성이 있는 후보에 오름과 동시에 활발한 연구가 진행되고 있다[1-5].

스핀전달토크는 기존의 MRAM과는 달리 외부에서 자장을 걸지 않고 자기터널접합(Magnetic Tunnel Junction, MTJ)에 직접적으로 전류를 흘려 자화 반전을 유도하는 방식을 사용하는데, 최대 관심사는 자화 반전에 필요한 전류를 줄이고 열적 안정성을 높이는 것이다. 이를 위해 자기터널접합의 고정층(pinned layer)으로 낮은 포화자화도(M_s)값을 가지는 비정질 강자성체의 도입을 시도하였다.

본 실험에서는 비정질 강자성체인 CoSiB과 비자성체인 Pd를 이용하여 다층박막을 제작함으로써, 자기터널접합의 자유층에 적용하기 위한 수직자기이방성 특성을 연구하였다. 본

실험실에서 이에 앞서 연구한 Co₇₅Si₁₅B₁₀을 이용하여 다층박막을 제작, 자기적인 특성을 관찰하고, 다층박막을 구성하는 CoSiB, Pd 각각의 두께와 CoSiB/Pd 이층박막의 반복 횟수를 변화시키며 그 결과를 비교 및 분석하였다.

II. 실험 기구 및 방법

1. 박막 증착

본 실험에서는 2인치 크기의 타겟(target)이 6개 장착된 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템(DC magnetron sputtering system)을 사용하였다. 본 시스템은 시편(sample)을 장착하여 마그네틱 바를 이용해 메인 챔버(Main chamber)로 삽입하는 로드락 챔버(Load-lock chamber)와, 실질적으로 스퍼터링이 이루어지는 메인 챔버로 구성되어 있다. 기판(wafer)은 내부의 모터에 의해 정해진 방향으로 회전하고, 기판 고정대와 동축으로 연결되어 있는 회전 기판을 광센서를 이용하여 증착하고자 하는 타겟 바로 위에 시편이 위치하도록 하였다. 실험 과정에서 타겟과 기판 사이의 거리는 8 cm로 유지하였다.

시료로 사용한 기판은 100 nm의 산화막이 형성된 직경 6 인치의 SiO₂(001) 기판(wafer)을 1.4 cm × 1.4 cm의 크기로 잘라서 준비하였다. 이어 표면의 유기물이나 이물질을 제거하기 위해 아세톤, 에틸알코올 및 3차 증류수의 순서로 각각 10분씩 초음파 세척 후 건조하였다. 박막 증착 시 스퍼터링 시스템의 공정진공도는 2.0 mTorr로 유지하였다. 이 때 진공도 유지 및 플라즈마 형성을 위해 Ar가스를 사용하였다. 타겟의 증착률은 각각 CoSiB(0.127 nm/s), Pd(0.238 nm/s),

Ta(0.147 nm/s)이었고 실험은 실온에서 진행하였다.

실험은 CoSiB층과 Pd층의 두께 및 CoSiB/Pd 이층박막의 반복 횟수에 변화를 주어 CoSiB/Pd 다층박막 시료를 제작, 그 특성을 분석하는 방향으로 진행하였다.

2. VSM 측정

CoSiB/Pd의 자기적 특성을 분석하기 위해 제작한 모든 시료를 VSM으로 측정하였다. 이 때 시편 제작과정에서 박막에 가해진 자기장의 방향과 수직인 축을 자화용이축(easy axis)으로 하여 시편을 VSM 측정부의 중심에 위치시키고, 시편의 양단에 일정한 전류를 가하여 자장 변화에 대한 자화값의 변화를 이용하여 보자력(H_c)과 포화자화도(M_s)를 측정하였다. 외부에서 가해진 자장의 크기는 $-1 \sim +1$ kOe이며, 포화자화도는 자기이력곡선(hysteresis loop)에서 자화도의 최대값을 시편의 부피로 나눈 값이다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. CoSiB 두께에 따른 수직자기이방성의 변화

CoSiB/Pd 다층박막 구조에서 CoSiB 두께 변화에 대한 보자력의 변화를 알아보기 위해 Pd 층의 두께를 1.3 nm로 고정하고 $[\text{CoSiB } t_{\text{CoSiB}}/\text{Pd } 1.3 \text{ nm}]_5$ 구조로 다층박막을 제작하였다($t_{\text{CoSiB}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 \text{ nm}$). 동일한 시료의 자기적 특성을 알아보기 위해 VSM를 측정한 결과를 Fig. 1(a)에는 out-of-plane, Fig. 1(b)에는 in plane으로 나타내었다. 두께에 따른 포화자화도와 보자력의 경향성은 Fig. 3(a)에 나타내었다. 측정 결과 Fig. 1에서 CoSiB의 두께가 각각 0.1 nm, 0.6 nm인 시료에서는 수직자기이방성이 나타나지 않았고, 0.2~0.5 nm의 두께에서 확연한 수직자기이방성이 관찰되었다. 특히 CoSiB의 두께가 0.1 nm일때는 CoSiB가 강자성이 아닌 상자성의 성질을 보였는데, 이것은 CoSiB가 강자성의 성질을 가지기에는 0.1 nm의 두께가 너무 얇기 때문인 것으로 보인다. 또한, 0.6 nm 구간에는 CoSiB이 수평자기이방성 특성을 보이지 않고 수평자기이방성 특성을 보이는 것으로 관찰되었다.

VSM 측정결과 보자력은 CoSiB의 두께가 0.2~0.3 nm 사이일 때 증가하다가 이후에는 감소하는 경향을 보였고, 포화자화도는 점차적으로 증가하다 CoSiB 0.3 nm, 0.4 nm일 때 높은 squareness을 갖는 수직자기이방성 특징을 보였다. 이와 같은 현상은 기존의 연구결과에 근거하여 CoSiB 구조 내의 Co의 영향일 것으로 추측된다. 다층박막 내의 Co층의 두께가 증가하면 형상이방성에 의한 수평자기이방성이 증가하는데 [13], 이러한 이유로 CoSiB의 두께가 증가함에 따라 수직자기이방성이 감소하여 보자력이 감소하고 포화자화도가 증가하는 양상을 보이는 것으로 추측된다.

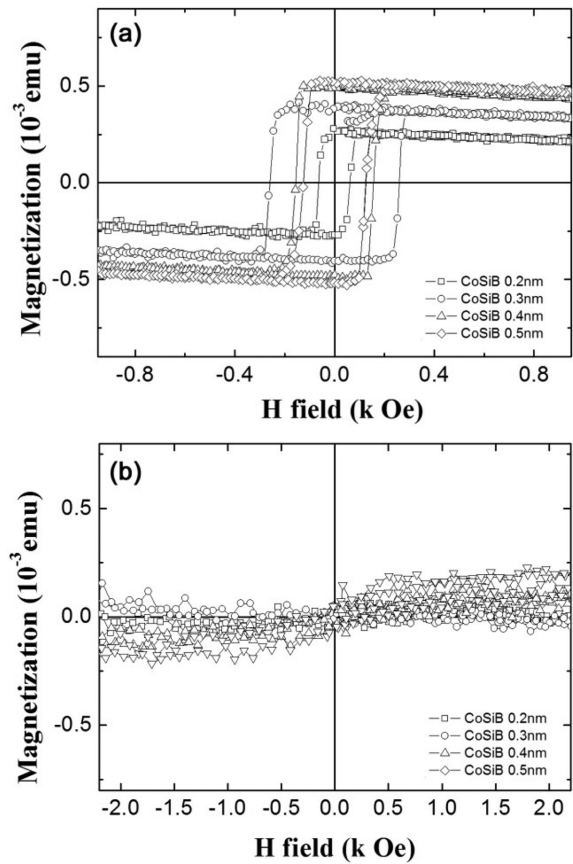


Fig. 1. Hysteresis loops of the $[\text{CoSiB } t_{\text{CoSiB}}/\text{Pd } 1.3 \text{ nm}]_5$ ($t_{\text{CoSiB}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 \text{ nm}$): (a) Out-of-plane, (b) In plane.

2. Pd 두께에 따른 수직자기이방성의 변화

CoSiB/Pd 다층박막에서 Pd 두께의 영향을 알아보기 위해 CoSiB 층의 두께를 0.3 nm로 고정하고 Pd의 두께를 1.0~1.6 nm 범위에서 0.1 nm 간격으로 변화시키면서 VSM을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 2(a)에는 out-of-plane, Fig. 2(b)에는 in plane으로 나타내었는데, 이를 보면, Pd 두께가 증가함에 따라 보자력은 큰 변화를 보였으나 포화자화도는 큰 차이를 보이지 않았다는 것을 알 수 있다. 이 실험의 결과를 CoSiB 두께 변화 실험과 비교하여 보면, 강자성체/비자성체 다층박막에서 포화자화도는 비자성체보다 강자성체의 두께에 더 많은 영향을 받는다는 것으로 해석이 가능하다. 또한, Fig. 3(b)에서 Pd의 두께가 1.6 nm일때부터 보자력이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 너무 두꺼운 Pd층이 CoSiB/Pd 다층박막에서 CoSiB와 Pd사이의 교환결합을 방해하기 때문인 것으로 추측된다.

3. CoSiB/Pd 다층박막의 반복 횟수에 따른 수직자기이방성의 변화

CoSiB 0.3 nm, Pd 1.3 nm로 두께를 고정하고 $[\text{CoSiB } 0.3$

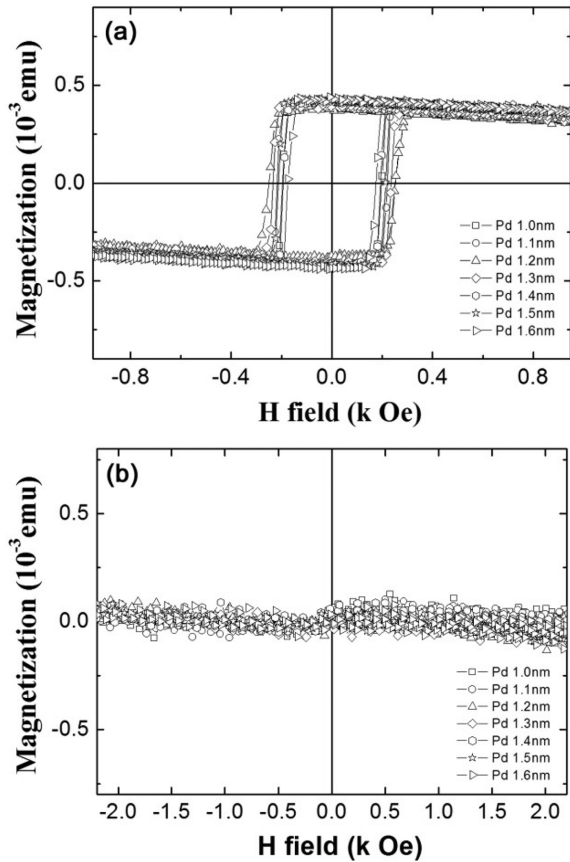


Fig. 2. Hysteresis loops of the [CoSiB 0.3 nm/Pd t_{PD}]₅ (t_{PD} = 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 nm): (a) Out-of-plane, (b) In plane.

nm/Pd 1.3 nm)_n 다층박막에서 CoSiB/Pd 이층박막의 반복 횟수를 변화시키면서 VSM을 측정하였다(n=3, 5, 7, 9, 11, 13). Fig. 3(c)를 보면 반복 횟수가 증가할수록 포화자화도가 증가하였고, 동시에 반복 횟수가 7회일 경우까지 보자력이 증가하다 그 이후에는 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 수직자기이방성이 다층박막의 반복횟수에 큰 영향을 받는 것을 시사하는 것이며, 본 실험에서는 반복 횟수가 5회일 때 포화자화도가 가장 낮게 측정되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 비정질 강자성체 CoSiB/Pd 다층박막에서 CoSiB와 Pd층의 두께에 따른 수직자기이방성 특징을 관찰하였다. CoSiB 두께를 0.1~0.6 nm 범위에서 측정한 결과 CoSiB 두께가 증가함에 따라 포화자화도가 증가하는 경향을 보였고, 특히 CoSiB의 두께가 0.2~0.3 nm 일 때 포화자화도가 급격하게 증가하였다. 보자력은 두께 0.2 nm에서 최대값을 보이다가 두께가 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 확인하였다. Pd의 두께를 1.0~1.6 nm 범위에서 변화시키면서

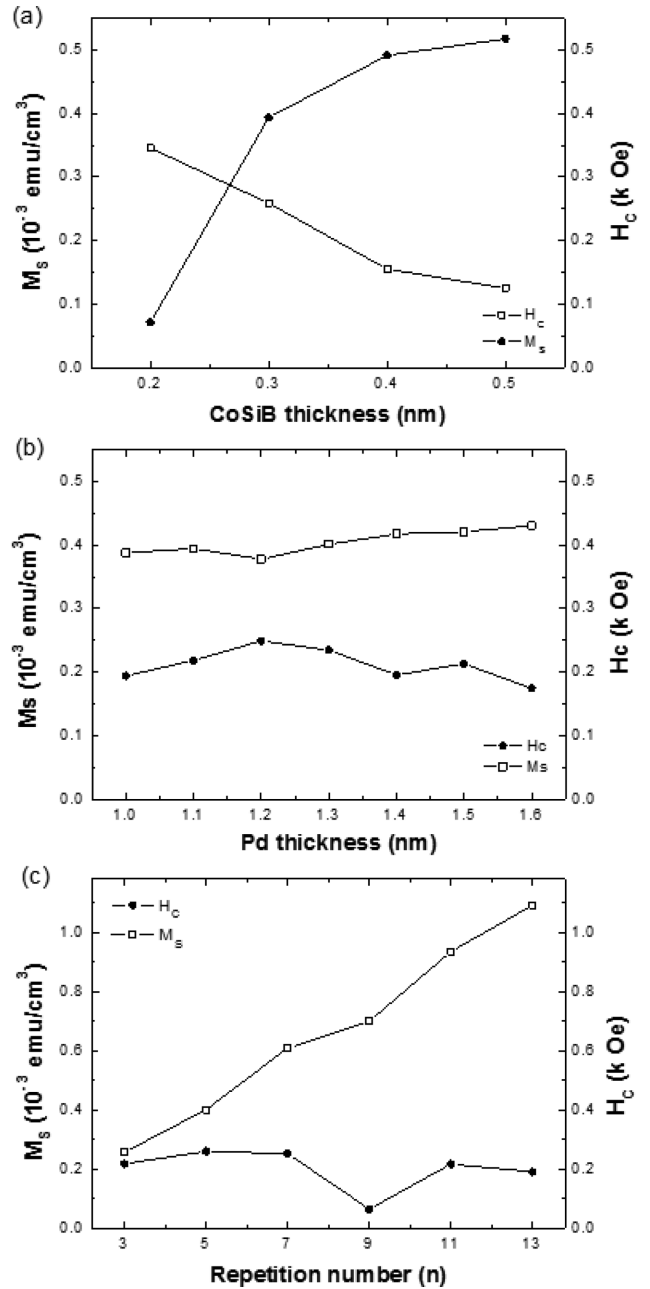


Fig. 3. (a) The tendency of H_c and M_s with increasing CoSiB thicknesses from 0.1 nm to 0.6 nm. (b) The tendency of H_c and M_s with increasing Pd thicknesses from 1.1 nm to 1.6 nm. (c) The tendency of H_c and M_s with increasing repetition numbers 3, 5, 7, 9, 11, and 13.

VSM 측정을 한 결과, 포화자화도는 1.1~1.2 nm 구간에서 약간 감소하다가 1.3 nm 이후 점차 증가하였다. 보자력은 포화자화도에 비해 확연한 규칙성을 보이지 않았으나, 전체적으로 Pd의 두께가 증가함에 따라 값이 감소하는 것을 알 수 있었다. CoSiB/Pd 이층박막의 반복 횟수에 따른 자기적 특성을 관측하기 위해 앞선 두 실험의 결과를 참고하여 CoSiB 0.3

nm, Pd 1.3 nm로 이층박막의 두께를 고정하고 CoSiB/Pd 이층박막을 반복 증착하여 시료를 제작하였다. 포화자화도와 보자력 모두 반복 횟수가 증가함에 따라 증가와 감소를 반복하였으나, 전반적으로 포화자화도는 증가하는 경향을, 보자력은 감소하는 경향을 보였다. 이 세 번의 실험을 통해 우리는 [CoSiB 0.3 nm/Pd 1.3 nm]₅으로 구성된 다층박막이 STT-MRAM을 구현하기에 앞서 MTJ를 제작하기에 가장 적합한 수직자기이방성을 보인다는 결론을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] F. J. A. den Broeder, D. Kuiper, A. P. van de Mosselaer, and W. Hoving, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2769 (1988).
- [2] G. H. O. Daalderop, P. J. Kelly, and M. F. H. Schuurmans, *Phys. Rev. B* **50**, 9989 (1994).
- [3] S.-I. Iwasaki and K. Takemura, *IEEE Trans. Magn.* **11**, 1173 (1975).
- [4] J. F. Weaver, A. F. Carlsson, and F. J. Madix, *Surf. Sci. Rep.* **50**, 107 (2003).
- [5] N. Nishiura, T. Hirai, A. Koganei, T. Ikeda, K. Okant, Y. Sekiguchi, and Y. Osada, *J. Appl. Phys.* **91**, 5246 (2002).
- [6] G. H. O. Daalderop, P. J. Kelly, and F. J. A. den Broeder, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 682 (1992).
- [7] J. Y. Hwang, S. S. Kim, and J. R. Rhee, *J. Magn. Magn.* **310**, 1943 (2007).
- [8] J. Y. Hwang, J. S. Park, H. I. Yim, T. W. Kim, and S. B. Lee, in *Perpendicular Magnetic Anisotropy in Amorphous Ferromagnetic CoSiB/Pt Multilayers*, Nano Korea 2009 (PNM188, KINTEX, Goyang, Korea, August 27, 2009).
- [9] J.-H. Park, C. Part, T. Jeong, M. T. Moneck, M. T. Nufer, and J.-G. Zhu, *J. Appl. Phys.* **103**, 07A917 (2008).
- [10] S. Jeong and H. I. Yim, *J. Kor. Phys. Soc.* **60**, 450 (2011).
- [11] J. Carrey, A. E. Berkowitz, W. F. Egelhoff, Jr., and D. J. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 5259 (2003).
- [12] V. W. Gue, H.-S. Hee, Y. Luo, M. T. Moneck, and J.-G. Zhu, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 2686 (2009).
- [13] B. Window and G. L. Hearing, *J. Vac. Sci. Technol.* **A4**, 996 (1986).
- [14] D. Weller, L. Folks, M. Best, E. E. Fullerton, B. D. Terris, G. J. Kusinski, K. M. Krichnan, and G. Thomas, *J. Appl. Phys.* **89**, 7525 (2001).
- [15] G. A. Bereto and R. Sinclair, *J. Magn. Magn. Mater.* **134**, 173 (1994).

Thickness Dependence of Amorphous CoSiB/Pd Multilayer with Perpendicular Magnetic Anisotropy

H. I. Yim*

Department of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

(Received 18 June 2013, Received in final form 20 August 2013, Accepted 20 August 2013)

Perpendicular magnetic anisotropy (PMA) is the phenomenon of magnetic thin film which is preferentially magnetized in a direction perpendicular to the film's plane. Amorphous multilayer with PMA has been studied as the good candidate to realization of high density STT-MRAM (Spin Transfer Torque-Magnetic Random Access Memory). The current issue of high density STT-MRAM is a decrease in the switching current of the device and an application of amorphous materials which are most suitable devices. The amorphous ferromagnetic material has low saturated magnetization, low coercivity and high thermal stability. In this study, we presented amorphous ferromagnetic multilayer that consists of an amorphous alloy CoSiB and a nonmagnetic material Pd. We investigated the change of PMA of the [CoSiB t_{CoSiB} /Pd 1.3 nm]₅ multilayer (t_{CoSiB} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 nm, and t_{Pd} = 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 nm) and [CoSiB 0.3 nm/Pd 1.3 nm]_n multilayer (n = 3, 5, 7, 9, 11, 13). This multilayer is measured by VSM (Vibrating Sample Magnetometer) and analyzed magnetic properties like a coercivity (H_c) and a magnetization (M_s). The coercivity in the [CoSiB t_{CoSiB} nm/Pd 1.3 nm]₅ multi-layers increased with increasing t_{CoSiB} to reach a maximum at t_{CoSiB} = 0.3 nm and then decreased for t_{CoSiB} > 0.3 nm. The lowest saturated magnetization of 0.26 emu/cm³ was obtained in the [CoSiB 0.3 nm/Pd 1.3 nm]₅ multilayer whereas the highest coercivity of 0.26 kOe was obtained in the [CoSiB 0.3 nm/Pd 1.3 nm]₅ multilayer. Additional Pd layers did not contribute to the perpendicular magnetic anisotropy. The single domain structure evolved in to a striped multi-domain structure as the bilayer repetition number n was increased above 7 after which (n > 7) the hysteresis loops had a bow-tie shapes.

Keywords : perpendicular magnetic anisotropy, CoSiB/Pd, amorphous ferromagnetic material, CoSiB, Pd