

Ga⁺ 이온 조사를 통한 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기 기록매체의 자기적 특성 변화

김성동*

기계설계자동화공학부, 서울산업대학교, 서울특별시, 139-743

박진주

서울테크노파크, 서울특별시 139-743

(2007년 11월 17일 받음, 2007년 12월 24일 최종수정본 받음)

Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기 기록매체에 대해 집속이온빔(FIB)을 이용한 Ga⁺ 이온 조사에 따른 자기적 특성의 변화를 조사하였다. Ga⁺ 이온 도즈량을 1×10¹⁵ ions/cm²에서 30×10¹⁵ ions/cm²까지 증가시켰을 때 도즈량 20×10¹⁵ ions/cm² 이상에서 수직자기이방성 및 강자성 특성이 사라지는 것이 관찰되었으며, 이는 스퍼터링 효과에 따른 수직자기 기록층의 두께 감소보다는 Ga⁺ 이온 주입에 따른 수직자기 기록매체내의 조성 분포의 변화에 따른 것으로 보인다. Ga⁺ 이온 조사법을 이용하여 70×70 nm², 100×100 nm² 크기의 자기구조체 패턴을 형성하였다.

주제어 : Ga⁺ 이온, 집속이온빔, FIB, 이온 조사, CoPt, 수직자기기록매체

I. 서 론

최근 자성박막을 이용한 다양한 자기소자에 대한 수요가 증가함에 따라 이들 소자의 제작을 위한 자성박막 가공공정의 중요성이 더욱 커지고 있다. 특히 MTJ(magnetic tunnel junction)의 배열을 이용하는 MRAM의 제작이나 기록밀도 향상을 위한 패턴 미디어(patterned media)의 개발에 있어 자성박막의 효과적인 가공기술은 필수적이다. 일반적으로 자성박막의 가공을 위해서는 Ar 등의 불활성 가스의 이온을 조사하는 이온빔 에칭(IBE, ion beam etching)이나 Cl, CO 가스 등과 Fe, Co, Ni 같은 자성원소와의 화학반응을 이용하는 반응성 이온 에칭(RIE, reactive ion etching)법이[1] 널리 쓰이고 있으며, 대면적 패턴 형성을 위한 나노임프린트(nanoimprint)도 패턴 미디어 분야의 적용을 위해 연구되고 있다[2]. 그러나 IBE 이나 RIE 방법의 경우 필요없는 자성박막을 제거하여 원하는 패턴을 제작하는 방법으로 자성박막 제거 시 발생하는 에칭 손상 및 재증착으로 인해 자기특성의 열화현상이 나타날 뿐 아니라[3], 제거된 자성박막 공간을 다른 절연물질 등을 이용하여 메우으로써 평탄화를 유지하는 추가 공정이 필요하게 된다.

한편, 이와 같은 형상가공을 통한 자성박막의 가공법과는 달리 자성박막의 자기적 성질을 부분적으로 변화시킴으로써 자성박막을 가공하고자 하는 시도가 있어왔다. Chappert 등이[4] 1998년 He⁺ 이온을 이용하여 Co/Pt 다층막의 자기적 특성을 변화시킬 수 있음을 보고한 이후 He⁺[5], Ga⁺[6],

Ni⁺[7] 등 다양한 이온의 조사를 통한 자성박막의 자기적 특성 제어에 대해 많은 연구가 진행되었다[8]. 이 가운데 Ga⁺ 이온은 집속이온빔(FIB, Focused Ion Beam) 장치를 이용하여 비교적 손쉽게 응용할 수 있을 뿐 아니라, FIB의 미세가공능력과의 조합을 통해 다양한 효과를 얻을 수 있어 많은 관심을 끌고 있다.

Chen 등은 FIB를 이용한 DTR(discrete track recording) 기록매체의 제작에 있어 Ga⁺ 이온에 의한 자기적 특성 변화로 인하여 자성층을 일부만 에칭하는 것이 효과적임을 보고한 바 있는데[9], Co₇₀Cr₁₈Pt₁₂ 수직자기매체를 이용한 패턴 미디어 제작의 경우에도 이러한 현상이 보고되었다[10]. FIB를 이용한 가공의 경우 가우시안 분포를 갖는 집속이온빔의 특성으로 인해 최소가공 크기가 제한을 받으나, Ga⁺ 이온 조사의 영향으로 FIB 가공시 자성층을 부분적으로만 에칭하는 것이 가능할 경우 가공시간의 단축 뿐 아니라 자성층 전체를 제거하는 경우에 비해 좀 더 미세한 구조를 얻을 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 FIB를 이용하여 최소한의 Ga⁺ 이온 조사를 통한 수직자기 패턴 미디어 또는 DTR 기록매체의 개발을 위해 Ga⁺ 이온 조사가 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기매체의 자기적 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

II. 실험 방법

Ga⁺ 이온의 조사를 위해서 SII사의 SMI3050 FIB를 이용하였으며, 가속에너지 30 keV, 이온빔 전류 10 pA로 조사조건을 고정하였다. 도즈량에 따른 자기적 특성의 변화를 관찰하

*Tel: (02) 970-6353, E-mail: sdkim@snut.ac.kr

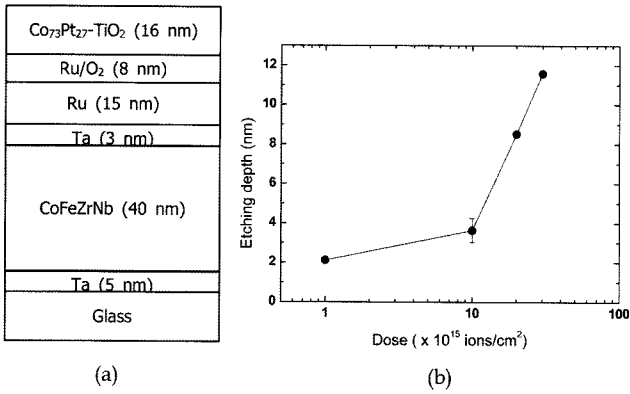


Fig. 1. (a) Layer structure of the perpendicular magnetic recording media and (b) Ga⁺ ion dose dependence of etching depth with 10 pA, 30 keV Ga⁺ beam.

기 위해 Ga⁺ 이온 도즈량을 1×10¹⁵ ions/cm²에서 30×10¹⁵ ions/cm²까지 변화시켰으며, 이 때 조사범위는 3×3 μm²의 사각형으로 하였다. 미세 패턴 형성을 위한 실험에서는 20×10¹⁵ ions/cm²의 Ga⁺ 이온 도즈량을 이용하여 전체 조사범위 2×2 μm² 내에서 바둑판 형태로 가공하였으며, 이때 가공선 폭은 60 nm로 고정하고 자기구조체(magnetic islands)의 크기를 70 nm와 100 nm로 변화시켰다. Ga⁺ 이온 조사를 위한 자성박막으로는 CoPt 계 수직자기기록매체를 사용하였으며, 유리기판위에 스퍼터링 방법을 이용하여 제작하였다. 구체적인 구조는 Fig. 1의 (a)에 나타난 바와 같이 glass\Ta 5 nm\CoFeZrNb 40 nm\Ta 3 nm\Ru 15 nm\Ru-O₂ 8 nm\Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 16 nm의 구조를 가지며 탄소 보호막은 적용하지 않았다. FIB를 이용한 Ga⁺ 이온 조사 후 수직자기기록매체의 표면형상 및 자기적 특성 변화는 Veeco사의 D3100 AFM(atomic force microscopy) 및 MFM(magnetic force microscopy)을 이용하여 관찰하였으며, 박막 내 Ga 원소의 조성 분포 분석을 위해 AES(Auger electron spectroscopy) 두께 조성분석을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

Ga⁺ 이온 도즈량에 따른 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기기록매체의 자기적 특성 변화를 관찰하기 위해 Ga⁺ 이온 도즈량을 1×10¹⁵, 10×10¹⁵, 20×10¹⁵, 30×10¹⁵ ions/cm²으로 변화시켜가며 시편에 조사하였다. FIB를 이용하여 Ga⁺ 이온을 조사할 때는 스퍼터링 효과와 이온 주입(implantation) 효과를 동시에 고려하여야 하는데, 스퍼터링 효과는 Ga⁺ 이온이 시편과 부딪힐 때 시편 표면이 깎여나가는 현상이고 이온 주입효과는 높은 에너지의 Ga⁺ 이온이 시편 내부에 침투하는 현상이다. 일반적으로 이온조사를 통한 자성박막의 특성 제어시에는 주

입된 이온이 자성박막의 구조 또는 조성에 미치는 영향을 이용하는 것이 보통이나, 얇은 박막의 경우 이온 조사에 따른 스퍼터링 효과 또한 무시할 수 없다. 본 연구에서 사용한 수직자기기록매체에 대해 Ga⁺ 이온 조사시 에칭된 깊이를 AFM으로 측정된 결과, 이온 도즈량에 따라 2 nm에서 11 nm까지 에칭된 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 1(b)). 이는 시편 표면의 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기 기록층의 두께가 16 nm인 것을 고려하면(Fig. 1(a)) 30×10¹⁵ ions/cm²의 도즈량에 대해서도 수직자기 기록층이 5 nm 가량 존재함을 알 수 있다.

Ga⁺ 이온을 시편 표면에 조사한 후 조사영역을 MFM으로 관찰한 결과 Ga⁺ 이온 도즈량에 따라 자기적 특성이 변화함을 알 수 있었다. 1×10¹⁵ ions/cm²의 도즈량으로 조사시 자기적 특성은 전혀 변화가 없었으며, 이는 Fig. 2의 (a)에 나타난 바와 같이 흰점선으로 표시된 조사영역 내부와 바깥영역의 자기구조에 전혀 차이가 없고 두 영역사이에 자구가 서로 연결되어 있음으로 확인할 수 있다. 그러나 도즈량이 10×10¹⁵ ions/cm²으로 증가함에 따라 조사영역 내에서 자구가 사라지기 시작하는 것이 관찰되는데, Fig. 2의 (b)에서와 같이 이온 조사영역과 비조사영역이 구분되기 시작한다. 도즈량이 20×10¹⁵ ions/cm² 이상이 되면 Fig. 2의 (c)와 (d)에 나타난 바와 같이 조사영역 내에서 자구가 관찰되지 않아 수직

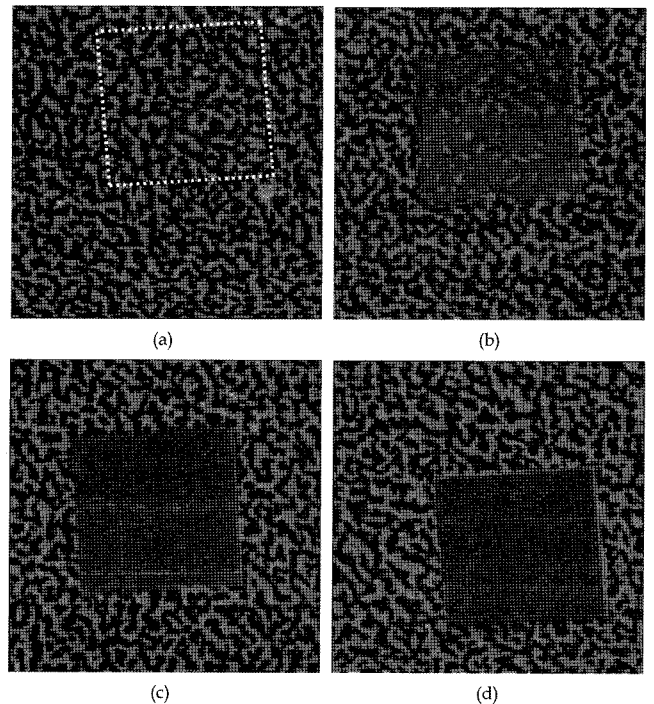


Fig. 2. MFM images of 3×3 μm² patterned regions with different exposure to 10 pA 30 keV Ga⁺ beam. The exposure doses are (a) 1×10¹⁵ ions/cm² (b) 10×10¹⁵ ions/cm² (c) 20×10¹⁵ ions/cm² and (d) 30×10¹⁵ ions/cm². The white dashed line in (a) indicates the exposed area. The MFM scan area is 6×6 μm².

자기 이방성이 사라짐을 알 수 있다. 특히, 이 경우 수평자기 이방성에 의한 자구도 관찰되지 않음으로써 20×10¹⁵ ions/cm² 이상의 Ga⁺ 이온 조사영역에서는 수직자기기록층이 수직자기 이방성 뿐만 아니라 강자성(ferromagnetic) 특성을 잃어버림을 알 수 있다. Fig. 1의 (a)와 동일한 구조에서 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기기록층의 두께를 변화시켜가며 증착한 경우, 보자력의 차이는 있으나 모든 두께 영역에서 뚜렷한 수직자기 이방성을 나타내는 것으로 확인되었다. 따라서 스퍼터링 효과에 의한 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 수직자기기록층의 두께 감소가 수직자기 이방성의 감소 또는 강자성 특성이 사라지는 직접적인 원인이 아님을 알 수 있다.

도즈량에 따른 Ga의 이온 주입 정도 및 그 영향을 알아보기 위해 Fig. 2의 시편에 대해 AES 두께 조성분석을 실시하였다(Fig. 3과 4). Ga은 도즈량에 따라 최대 3.7 at%(1×10¹⁵ ions/cm²), 5.7 at%(10×10¹⁵ ions/cm²), 6.7 at%(20×10¹⁵ ions/cm²), 7.5 at%(30×10¹⁵ ions/cm²)의 함량을 나타내고 있으며, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 침투 깊이도 도즈량이 증가함에 따라 늘어남을 알 수 있다. Ar 스퍼터링 속도를 분당 2 nm 정도로 고려하고, Ga⁺ 스퍼터링 효과에 의한 에칭 깊이를 고려하면 실제 Ga 원소의 침투깊이는 22 nm에서 60 nm 정도가 된다. 한편, Ga 원소 이외의 구성 원소를 포함한 전체적인 조성분포의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a)에 나타난 도즈량 1×10¹⁵ ions/cm²의 경우 Fig. 1의 (a)에 나타난 적층구조와 동일한 조성분포를 나타내고 있으며, 이는 Ga⁺ 이온 조사 후에도 자기적 특성의 변화가 관찰되지 않은 MFM 측정 결과(Fig. 2(a))를 확인해 주고 있다. 도즈량이 10×10¹⁵

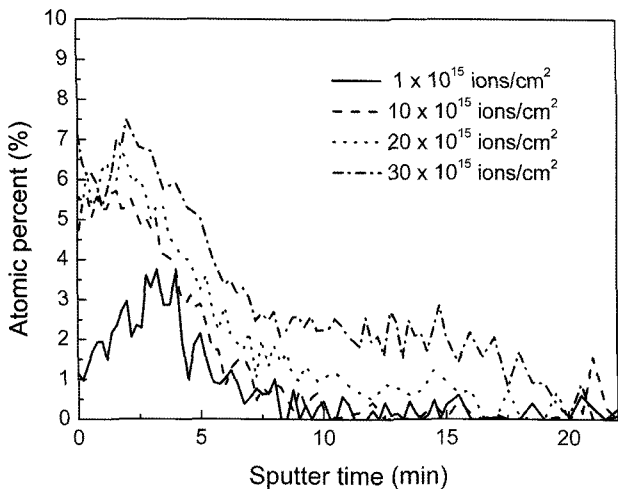


Fig. 3. AES depth profiles of Ga implanted into the PMR media with different exposure to 10 pA 30 keV Ga⁺ beam. The exposure doses are 1×10¹⁵, 10×10¹⁵, 20×10¹⁵ and 30×10¹⁵ ions/cm². Note that Ga⁺ irradiation removed the sample surface from 2 nm to 11 nm before AES depth profiling.

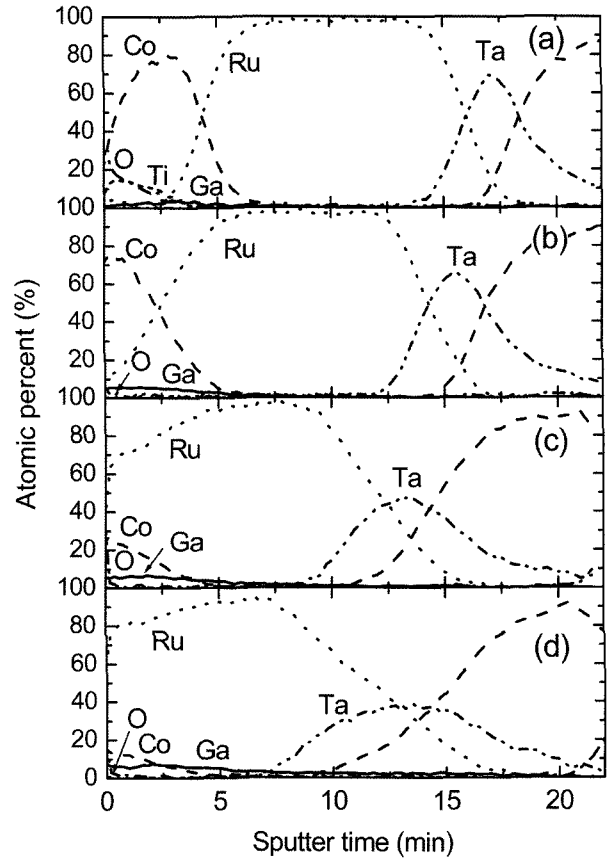


Fig. 4. AES depth profiles of PMR media with different exposure to 10 pA 30 keV Ga⁺ beam. The exposure doses are (a) 1×10¹⁵ ions/cm² (b) 10×10¹⁵ ions/cm² (c) 20×10¹⁵ ions/cm² and (d) 30×10¹⁵ ions/cm². Note that the top (a) 2 nm, (b) 3.6 nm, (c) 8.5 nm, (d) 11.5 nm of the film is already removed due to Ga⁺ ion sputtering effects.

ions/cm² 보다 증가하면서 구성원소의 조성 분포에 변화가 보이기 시작하는데, 특히 Ru 원소의 경우 도즈량이 증가함에 따라 시편 표면에서 검출되기 시작하여 도즈량 20×10¹⁵ ions/cm² 부터는 표면에서도 상당량이 존재하게 된다. 이러한 표면에서의 Ru 조성의 증가는 Ga⁺ 도즈량 증가에 따른 수직자기기록층의 수직자기이방성의 감소 및 강자성 특성이 사라지는 데 직접적인 원인을 제공하는 것으로 보인다. 실제 Fig. 4의 (b)와 같이 Ru이 표면에서 검출되기는 하나 아직 Co의 조성이 높은 도즈량 10×10¹⁵ ions/cm²의 경우 MFM 측정에서 부분적으로 자구가 존재하는 것이 관찰되며(Fig. 2(b)), Fig. 4의 (c)와 (d)에서와 같이 Co가 존재하나 Ru의 함량이 60 at% 이상이 존재하는 도즈량 20×10¹⁵ ions/cm² 이상의 경우 MFM 측정에서는 자구가 관찰되지 않는다(Fig. 2(c), (d)) 이러한 표면에서의 Ru 조성의 변화는 Ga 이온 주입에 따른 Ru/Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 계면 정합성의 열화 및 결정구조의 손상으로 Ru 원소가 표면 및 내부로 확산하기 때문으로 보인다. 한편, 도즈량이 증가함에 따라 Ru 원소의 표면 확산 뿐 아니라

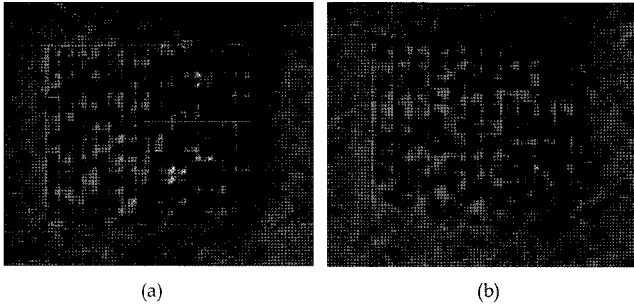


Fig. 5. MFM images of $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ patterned regions which were exposed to $20 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ dose of 10 pA 30 keV Ga^+ beam. The trench width is 60 nm and the magnetic islands size is (a) 70 nm (b) 100 nm. The MFM scan area is $3 \times 3 \mu\text{m}^2$. The specimens were ac-demagnetized.

Ta 층의 폭도 넓어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 도즈량이 증가함에 따라 Ga 원소의 침투 길이가 길어져 CoFeZrNb\TaRu 계면에도 영향을 미치기 시작하기 때문이다. 이와 같이 도즈량이 증가함에 따라 Ga 이온 주입에 의한 수직자기 매체 구성층간의 계면 및 결정구조의 손상이 발생하고 이로 인한 Ru 원소의 확산으로 인해 수직자기이방성 및 강자성 특성이 나빠지는 것으로 판단된다.

앞의 결과를 바탕으로 수직자기이방성이 사라지는 도즈량 $20 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ 을 이용하여 비둑판 형태의 나노패턴을 형성하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 전체 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 의 영역에 대해 선폭은 약 60 nm로 고정하였으며, 자기구조체의 크기는 각각 약 70 nm, 100 nm가 되게 하였다. 나노패턴한 시편을 교류 탈자 후 MFM으로 측정된 결과 자기구조체의 크기가 70 nm인 경우 Fig. 5의 (a)에서 볼 수 있듯이 단자구에 가까운 거동을 보이는 반면, (b)에 나타난 100 nm 크기의 자기구조체 경우 자기구조체 내에 자력이 존재하는 다자구 형태가 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 두 시편 모두 자기구조체 사이가 예상과 달리 완전히 자기적으로 분리되지 않은 것으로 보이며, 이는 Fig. 2의 시편과는 달리 선폭이 60 nm로 줄어들면서 Ga^+ 이온 빔의 중첩영역이 감소할 뿐 아니라 가공에 따른 온도 상승 폭이 작아져 구성원소의 확산이 충분히 일어나지 않기 때문으로 보인다.

IV. 결 론

Ga^+ 이온 조사를 통한 자성박막 가공법의 개발을 위해

$\text{Co}_{73}\text{Pt}_{27}\text{-TiO}_2$ 수직자기 기록매체에 대한 FIB법을 이용한 Ga^+ 이온 조사의 영향을 알아보았다. Ga^+ 이온 도즈량이 $1 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ 에서 $30 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ 까지 증가함에 따라 수직자기이방성은 점차 열화되었으며, 특히 도즈량 $20 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ 이상에서 수직자기이방성 및 강자성 특성이 사라지는 것이 관찰되었다. 이는 Ga^+ 이온 주입에 따른 Ru\Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 계면층 및 결정구조의 손상으로 Ru이 Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ 기록층으로 확산해 들어오기 때문으로 보인다. 이를 바탕으로 70 nm, 100 nm 크기의 자기구조체 패턴을 형성하였다.

감사의 글

본 연구의 시편 제작 및 측정에 도움을 주신 삼성종합기술원에 감사드리며, 본 연구는 서울테크노파크의 차세대 패키징 공정·장비 실용화 사업의 일환으로 산업자원부의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] I. Nakatani, IEEE Trans. Magn., **32**(5), 4448 (1996).
- [2] 이병규, 이창형, 이명복, 이두현, 조은형, 김해성, 서수정, 손진승, 한국자기학회 2007년도 동계학술대회.
- [3] S. D. Kim, J. J. Lee, S. H. Lim, and H. J. Kim, J. Appl. Phys., **85**(8), 5992 (1999).
- [4] C. Chappert, H. Bernas, J. Ferre, V. Kottler, J.-P. Jamet, Y. Chen, E. Cambril, T. Devolder, R. Rousseaux, V. Mathet, and H. Launois, Science, **280**, 1919 (1998).
- [5] J. McCord, T. Gemming, L. Schultz, J. Fassbender, M. O. Liedke, M. Frommgerger, and E. Quadt, Appl. Phys. Lett., **86**, 162502 (2005).
- [6] E. Suharyadi, S. Natsume, T. Kato, S. Tsunashima, and S. Iwata, IEEE Trans. Magn., **41**(10), 3595 (2005).
- [7] J. Fassbender and J. McCord, Appl. Phys. Lett., **88**, 252501 (2006).
- [8] J. Fassbender and J. McCord, J. Magn. Mater., **320**, 579 (2008).
- [9] Y. J. Chen, K. W. Ng, S. H. Leong, Z. B. Guo, J. Z. Shi, and B. Liu, IEEE Trans. Magn., **41**(6), 2195 (2005).
- [10] C. T. Rettner, S. Anders, T. Thomson, M. Albercht, Y. Ikeda, M. E. Best, and B. D. Terris, IEEE Trans. Magn., **38**(4), 1725 (2002).

The Modification of Magnetic Properties of Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ Perpendicular Magnetic Recording Media with Ga⁺ Ion Irradiation

Sungdong Kim*

School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

Jin Joo Park

Seoul Technopark, Seoul 139-743, Korea

(Received 17 November 2007, in final form 24 December 2007)

The effects of Ga⁺ ion irradiation on the magnetic properties of the Co₇₃Pt₂₇-TiO₂ perpendicular magnetic recording media were investigated. As Ga⁺ ion dose increased from 1×10^{15} ions/cm² to 30×10^{15} ions/cm², the perpendicular magnetic anisotropy was degraded and no longer observed above 20×10^{15} ions/cm² dose. The deterioration of the perpendicular magnetic anisotropy and ferromagnetic properties can be attributed to the concentration profile change due to Ga⁺ ion implantation. The magnetic islands of 70×70 nm² and 100×100 nm² size were successfully fabricated with Ga⁺ ion irradiation.

Keywords : Ga⁺ ion, focused ion beam, ion irradiation, CoPt, perpendicular recording media