

자성막 CoPt의 자기상호작용이 활성화 부피와 면적에 미치는 영향

김현수 · 정순영*

경상대학교 자연과학대학 물리학과 및 기초과학 연구소, 경남 진주시 진주대로 501, 660-701

서수정

성균관대학교 공과대학 신소재공학부, 경기 수원시 장안구 천전동 300, 440-746

(2013년 11월 11일 받음, 2013년 12월 2일 최종수정본 받음, 2013년 12월 3일 게재확정)

수직 자기기록 매체로 알려진 CoPt 자성막을 전기도금법으로 제작하여 자기상호작용이 활성화 부피와 면적에 미치는 영향을 조사하였다. 모든 시료의 상호작용 기구는 쌍극자 상호작용이었으며, 낮은 전류밀도에서 제작한 시료일수록 두께가 두꺼울수록 상호작용 세기가 증가하였다. 한편 활성화 부피는 낮은 전류밀도에서 제작한 시료가 더 컸으나 두께에 따른 증감현상은 뚜렷하지 않았다. 그러나 활성화 면적은 상호작용의 세기가 강할수록 전류밀도가 낮을수록 감소하는 경향을 보였다.

주제어 : CoPt 자성막, 활성화 부피, 활성화 면적, 쌍극자 상호작용, 상호작용 세기

I. 서 론

전기도금법은 고 진공 하에서 제작하는 스퍼터링법에 비해 비교적 저렴한 비용으로 대량 제작이 가능하고 전류밀도, 전해조의 온도 등 제작조건을 변화시킴에 따라 다양한 자성을 갖는 자성막을 제작할 수 있는 장점이 있다. 이들 제작조건 중 전류밀도는 막의 조성에 비해 성장속도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 막의 성장속도는 낱알(grain) 크기와 형상(morphology) 뿐만 아니라 채우기 비율 등을 결정 짓는 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 전류밀도 크기에 따라 자성막의 기본 물리량인 보자력, 각형비는 물론 자기역전 현상과 자기상호작용 등 자기특성이 크게 바뀌게 된다[1, 2].

전기도금법으로 제작한 CoPt 자성막은 고밀도 수직 자기기록 매체나 미세 전자기계 시스템(MEMS)용 재료로 활용 가능성이 큰 것으로 알려져 있어 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 낱알이 다자구(multidomains)로 구성된 자기기록 매체의 경우, 낱알 속의 자구가 인가 자기장의 영향을 받아 상호작용과 역전(reversal)을 일으키게 된다. 낱알 사이의 상호작용을 통하여 집단적으로 역전을 일으키는 활성화 부피(activation volume: V_{act})는 자성을 띤 많은 낱알로 구성되어 있다. 활성화 부피는 자기기록 매체의 기록밀도, 열적 안정성과 잡음의 크기를 평가하는 중요한 물리량으로 취급되고 있

으며, 역전의 종류(reversal type), 자기상호작용 기구 및 상호작용 세기 등에 의존하는 것으로 알려져 있으나 그 의존성은 명확하지 않다[3-5].

따라서 본 연구에서는 전기도금법으로 CoPt 자성막을 제작하고, 전류밀도 및 두께가 다른 이들 시료에 대한 활성화 부피와 면적을 구하였다. 또한 자기역전 기구, 자기상호작용 및 세기에 관한 앞선 연구결과[6, 7]를 이용하여 자기상호작용이 활성화 부피와 면적에 미치는 영향을 규명하였다.

II. 실험방법

수직 자기이방성을 나타내는 CoPt 자성막을 제작하기 위해 Si(100) 기판 위에 부착층 Ta(5 nm)과 씨층 Ru(20 nm)을 스퍼터링법으로 성장시킨 다음 씨층 Ru[8, 9] 위에 CoPt 자성막을 전기도금법으로 성장시켰다. 전해조를 pH 8.5, 온도 65 °C로 일정하게 유지한 상태에서 2전극 시스템 정전류식 모드(galvanostatic mode)로 시료의 두께가 각각 10 nm, 14 nm, 18 nm, 22 nm인 4종류는 전류밀도 10 mA/cm²에서, 15 nm, 20 nm 그리고 25 nm인 3종류는 20 mA/cm²에서 제작하였다.

시료의 자기적 성질인 자기이력곡선과 직류 자기소거 잔류 자기곡선(DC Demagnetization Remanence Curve: DCD)은 시료 진동형 자력계(VSM)를 사용하여 시료 면에 수직하게 자기장 10 kOe을 인가하여 상온에서 측정하였다. DCD 곡선은 먼저 양(+)의 방향으로 자기장 10 kOe을 인가하여 시료를 포화시킨 후, 포화시킨 자기장과 반대 방향인 음(-)의 방향으

로 일정한 크기의 자기장을 일정시간 동안 인가한 다음 자기장을 0으로 줄인 상태에서 자기모멘트를 측정하였으며, 음의 방향으로 시료가 포화될 때까지 단계적으로 줄인 각각의 일정 자기장을 인가한 후 자기장을 0으로 줄인 상태에서 반복적으로 측정하였다. 또한 자기모멘트 감쇠의 시간의존성은 먼저 자기장을 양의 방향으로 인가하여 시료를 포화시킨 후 포화시킨 자기장과 반대 방향인 음의 방향으로 일정 자기장을 인가한 상태에서 600 s 동안 측정하되 단계적으로 감소시킨 각각의 자기장에서 반복적으로 측정하였다.

III. 결과 및 논의

자기화 역전은 인가 자기장으로 인해 에너지 장벽이 낮아지거나 열적으로 활성화된 자기모멘트가 에너지 장벽을 넘어 천이(transition)하는 과정 중 하나로 일어나는데, 전자의 경우는 DCD 잔류곡선 후자는 자기모멘트 감쇠의 시간의존성에 해당된다. 또한 활성화 부피는 인가 자기장과 열적 활성화의 영향으로 자기모멘트가 에너지장벽을 넘어 집단적으로 역전을 일으키는 가장 작은 단위부피로 정의하며, 자기기록 매체에서는 물리적인 낱알이 아닌 활성화 부피가 가장 작은 정보

저장 단위인 비트(bit)에 해당한다.

Fig. 1(a)와 (b)는 전류밀도 10 mA/cm² 및 20 mA/cm²에서 제작한 두께 10 nm와 25 nm인 시료에 대한 DCD 측정 곡선과 이들 곡선의 미분인 비가역 자화율($\chi_{irr}^{dcd}(H)$)을 나타낸 것이다. 이 미분곡선, 즉 비가역 자화율의 극대값이 위치하는 자기장 영역은 각 시료의 보자력(H_c)[10]에 비해 다소 낮음을 알 수 있었으며, 모든 시료 또한 이와 같은 경향을 보였다. 여기서 H_c 는 시료별 수직 자기이력곡선으로부터 구한 보자력이다.

자기이력곡선에서 자기모멘트는 가역적인 성분과 비가역적인 성분이 있으며, 가역적인 성분에 비해 비가역적인 성분은 시간의존성이 크다. 만약 에너지장벽 분포가 빠르게 변하지 않을 경우 자기모멘트는 식 $M(H, t) = M_0(H, t_0) \pm S(H) \ln t$ 을 따르는 것으로 알려져 있다[11]. 여기서 M 와 M_0 는 시각 t 와 t_0 에서의 자기화 크기이고 S 는 자기점성계수(magnetic viscosity coefficient)이다. Fig. 2(a)와 (b)의 안쪽 그림은 두께가 각각 22 nm 및 20 nm인 시료에 대한 자기모멘트 변화를 나타낸 것이며, 바깥 그림은 인가 자기장 별 자기점성계수를 나타낸 것으로 이 자기점성계수는 자기모멘트 감쇠곡선의 기울기에

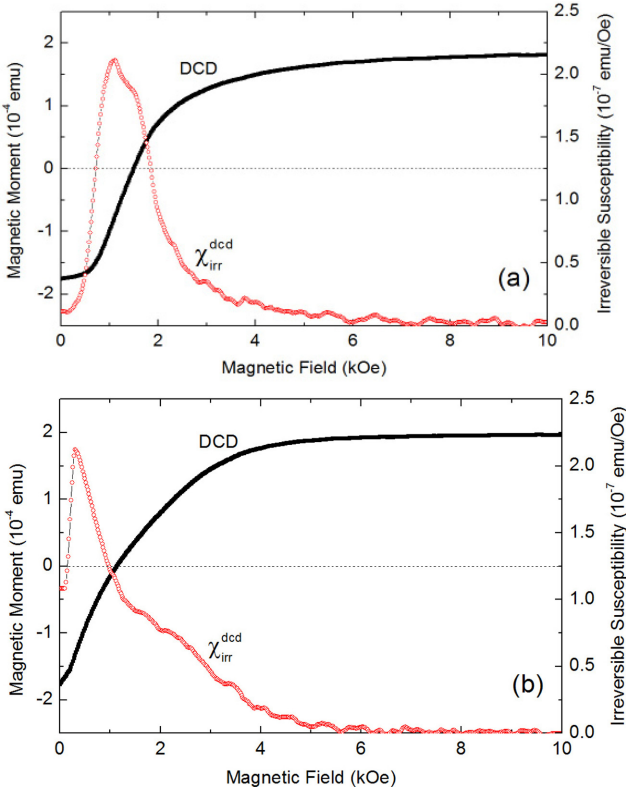


Fig. 1. (Color online) DCD and χ_{irr}^{dcd} curves for the (a) 10 nm thick sample deposited at 10 mA/cm² and (b) 25 nm thick sample deposited at 20 mA/cm².

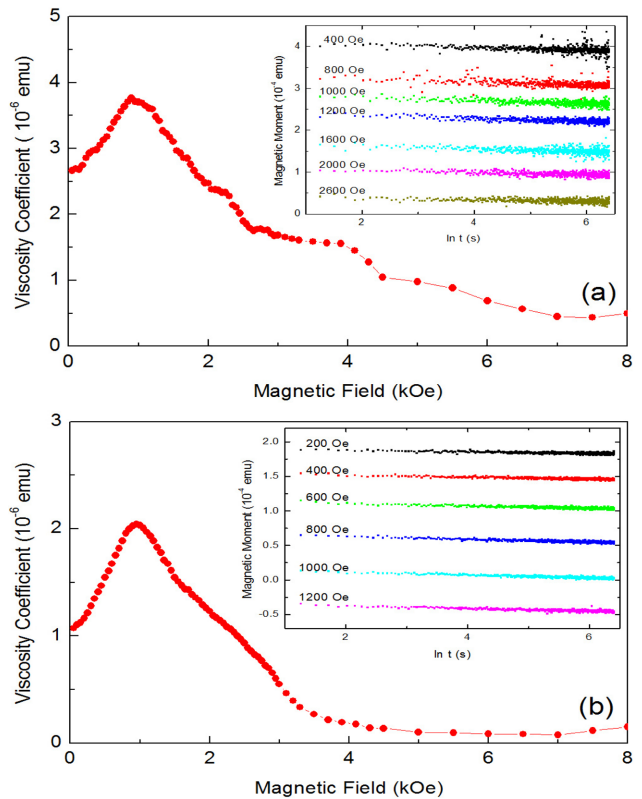


Fig. 2. (Color online) Magnetic field dependence of magnetic viscosity coefficient for the (a) 22 nm thick sample deposited at 10 mA/cm² and (b) 20 nm thick sample deposited at 20 mA/cm². Inner box represents the magnetic moment decay curves.

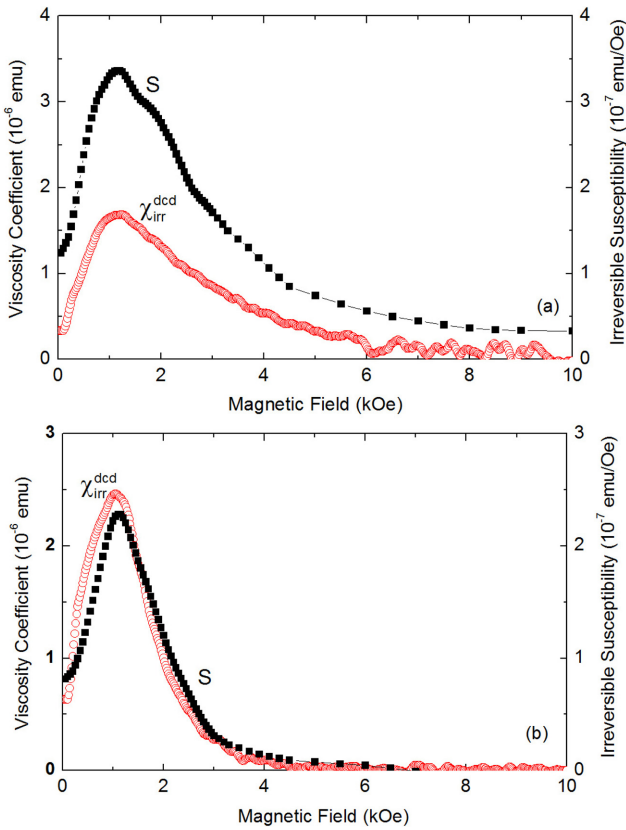


Fig. 3. (Color online) Magnetic field dependence of irreversible susceptibility and magnetic viscosity coefficient for the (a) 14 nm thick and (b) 15 nm thick samples deposited at 20 mA/cm² [10].

해당된다. 연구에 사용된 모든 시료의 자기모멘트가 시간 $\ln t$ 에 따라 선형적으로 감소하였다.

Fig. 3(a)와 3(b)는 전류밀도 10 mA/cm²와 20 mA/cm²에서 제작한 두께 14 nm와 15 nm인 시료 각각에 대한 비가역 자화율과 자기점성계수의 자기장 의존성을 나타낸 것으로 이들 극값의 자기장 위치는 거의 같았으며, 나머지 시료의 극값 모두 같은 자기장 영역에 위치함을 알 수 있었다.

기록밀도와 열적 안정성 등을 평가하는 물리량인 활성화 부피는 비가역 자화율과 자기점성계수와의 관계식 $H_f = S / \chi_{irr}^{dcd}$ 을 이용하여 구할 수 있다[12]. 요동장(fluctuation field; H_f)은 $H_f = k_B T / V_{act} M_s$ 으로 정의되므로 활성화 부피는 $V_{act} = k_B T \chi_{irr}^{dcd} / M_s S$ 가 된다. 여기서, k_B 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도, M_s 는 포화자기화이다. Fig. 4는 전류밀도 및 두께가 다른 시료에 대한 활성화 부피를 나타낸 것으로, 낮은 전류밀도에서 제작한 시료에 비해 높은 전류밀도에서 제작한 시료의 활성화 부피가 더 컸다. 그러나 동일한 전류밀도에서 제작한 시료의 활성화 부피는 두께에 관계없이 거의 같음을 알 수 있다.

수직 자기기록 매체인 경우, 활성화 부피를 면에 수직인 방

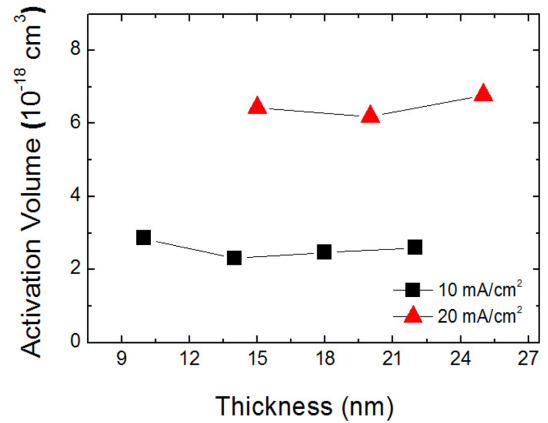


Fig. 4. (Color online) Influence of current density and thickness on activation volume for the electrodeposited CoPt films.

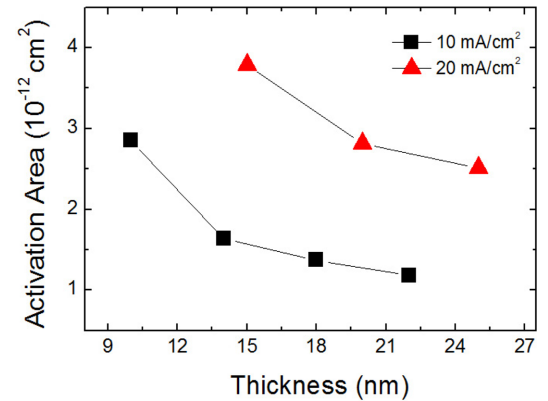


Fig. 5. (Color online) Influence of current density and thickness on activation area for the electrodeposited CoPt films.

향의 원주형 모양으로 취급할 수 있으므로 활성화 부피가 차지하는 면적, 즉 활성화 면적(S_{act})을 정의할 수 있다. Fig. 5는 시료별 활성화 면적을 나타낸 것으로, 낮은 전류밀도에서 제작한 시료에 비해 높은 전류밀도에서 제작한 시료의 활성화 면적이 더 크고, 시료의 두께가 증가할수록 면적이 감소하는 경향을 보였다. 또한 다른 전류밀도에서 제작한 두 종류 시료의 두께 의존성은 거의 같았다.

자기화 역전기구가 활성화 부피와 면적에 미치는 영향을 규명하기 위해 최근 발표한 연구결과[7, 10]를 이용하였다. 이 연구에서는 전류밀도 10 mA/cm²와 20 mA/cm²에서 제작한 모든 시료의 DCD 곡선의 미분인 비가역 자화율의 극값이 위치한 역자구 생성 자기장(H_N)이 등온 잔류자기곡선(Isothermal Remanence Curve: IRM)의 비가역 자화율($\chi_{irr}^{irm}(H)$) 극값이 위치한 자벽고착 자기장(H_p)에 비해 낮은 자기장 영역에 위치함을 확인할 수 있었다. 또한 시료 두께가 증가할수록 H_N 은 더 낮은 자기장 영역으로, H_p 는 더 높은 자기장 영역으로 이동함으로써 두 극값 간의 자기장 간극(ΔH)이 증가한다는

사실을 밝혔다. 따라서 연구에 사용된 모든 시료의 역자구는 H_p 보다 낮은 자기장 H_N 에서 생성되어 자기장 H_p 에서 역전을 일으킴을 알 수 있었다. 또한 이 연구결과에 따르면, 역전을 일으키는 활성화 부피가 인가 자기장의 크기에 관계없이 일정한 원인은 H_N 에서 생성된 역자구가 인가 자기장의 영향을 거의 받지 않고 H_p 에서 역전을 일으키는 것으로 해석할 수 있다.

시료의 자기상호작용 종류 및 세기는 P.E. Kelly 등이 수정한 Wohlfarth 관계식 $\Delta M(H) = m_d(H) - [1 - 2m_r(H)]$ [13]을 이용하여 규명할 수 있다. 이 식에서 $\Delta M(H) > 0$ 인 경우를 교환 상호작용(exchange interaction), $\Delta M(H) < 0$ 는 쌍극자 상호작용(dipolar interaction)으로 분류하며, 상호작용의 세기는 $\Delta M(H)$ 의 면적, 즉 $|\Delta M(H)_{area}| = \int_0^{H_a} \Delta M(H) dH$ 으로 평가한다. 여기서, $m_d(H) = M_d(H)/M_r(\infty)$, $m_r(H) = M_r(H)/M_r(\infty)$ 각각은 DCD 및 IRM 곡선으로부터 얻었다.

최근 발표한 연구결과[7, 10]에 의하면 연구에 사용된 모든 시료가 $\Delta M(H) < 0$ 을 보이므로 전류밀도와 두께에 관계없이 모든 시료는 쌍극자 상호작용을 일으키고, 전류밀도가 낮고 두께가 두꺼울수록 상호작용 세기가 증가함을 알 수 있다. 한편 전기도금한 CoPt 자성막의 쌍극자 상호작용 근원은 도금과정 중에 자성난알 계면에 유도된 비자성상(non-magnetic phase) P, P의 화합물 또는 다른 종류의 불순물에 의한 것으로 설명하고 있다[14-16]. 따라서 연구에 사용된 시료의 두께 및 전류밀도에 따른 상호작용 세기의 변화는 채우기 비율 증가로 자성난알을 자기적으로 고립시키는 다공성 감소, 시료의 표면형상과 조성변화 등이 주된 원인으로 판단된다.

쌍극자 상호작용이 활성화 부피와 면적에 미치는 영향을 규명하기 위해 활성화 부피와 면적에 대한 Fig. 4, Fig. 5와 쌍극자 상호작용 세기의 척도인 $|\Delta M(H)_{area}|$ 을 나타낸 Fig. 6[10]를 이용하여 분석하였다. 전류밀도 및 두께에 따른 활성화 부피를 나타낸 Fig. 4에 의하면, 전류밀도가 매우 큰 영향을 끼치지만 두께 의존성은 크지 않음을 알 수 있다. 또한 높은 전류밀도에 비해 낮은 전류밀도에서 제작한 시료가 더 강한 쌍극자 상호작용을 보였으나 활성화 부피는 오히려 작았고, 두께가 두꺼울수록 상호작용 세기가 증가하지만 활성화 부피의 증감현상은 뚜렷하지 않았다. 따라서 쌍극자 상호작용 세기가 활성화 부피 증감에 미치는 영향을 확인할 수 없었다. 한편, 전류밀도가 낮고 두께가 두꺼울수록 상호작용 세기가 증가하는 원인은 낮은 전류밀도에서는 막의 성장속도가 낮아 난알의 크기와 거칠기가 증가하고 배향성이 우수해지기 때문이며, 두께가 두꺼워지면 채우기 비율이 증가하기 때문으로 설명하고 있다[15, 16].

한편 쌍극자 상호작용의 세기와 활성화 면적과의 관계를 규명하기 위해 전류밀도 및 두께에 따른 활성화 면적을 표시한

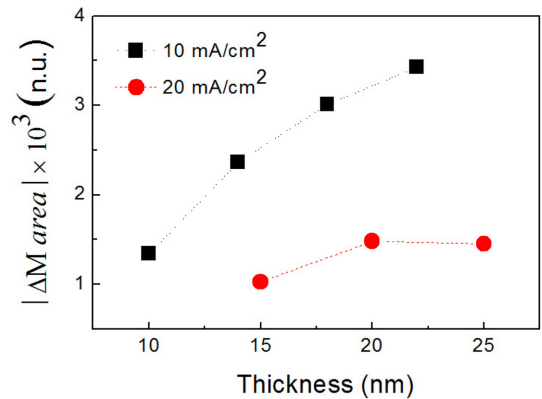


Fig. 6. (Color online) Thickness dependence of $|\Delta M(H)_{area}|$ for the samples deposited at 10 mA/cm² and 20 mA/cm² [12].

Fig. 5와 상호작용 세기를 나타낸 Fig. 6을 비교한 결과, 높은 전류밀도에 비해 낮은 전류밀도에서 제작한 시료가 더 강한 쌍극자 상호작용을 일으키지만 활성화 면적은 오히려 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 전류밀도에서 제작한 시료의 경우 두께가 두꺼울수록 상호작용의 세기는 증가하지만 활성화 면적은 감소하였다. 이 현상은 교환 상호작용이 두꺼운 시료에 비해 얇은 시료에 더 크게 작용하여 얇은 시료일수록 자기적 결합이 강하므로 활성화 면적이 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 자기기록 매체 CoCrPtTa의 활성화 부피와 자기 상호작용에 관한 G. Lauthoff 등의 연구결과[17]로 잘 설명된다. 또한 활성화 부피가 처음에 2차원으로 확장된 다음 3차원으로 성장하는 것으로 가정할 경우, 자기상호작용 기구 및 세기는 활성화 부피와 면적에 밀접하게 관련되는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

수직 자기기록 매체로 알려진 CoPt 자성막의 자기상호작용과 자기화 역전기구가 활성화 부피와 면적에 미치는 영향을 조사한 결과, 낮은 전류밀도에서 제작한 시료일수록 쌍극자 상호작용의 세기가 증가하고 활성화 면적은 감소하는 경향을 보였다. 또한 동일한 전류밀도에서 제작한 시료 중 두께가 두꺼운 시료의 상호작용 세기가 더 크고 활성화 면적은 감소하였다. 이와 같은 현상은 낮은 교환 상호작용에 의한 자기적 결합의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 경상대학교 물리학과 연구장학회의 지원과 2012년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비의 일부로 수행되었음.

참고문헌

- [1] G. Zangari, P. Bucher, N. Lecis, P.L. Cavallotti, L. Callegaro, and E. Puppini, *J. Magn. Magn. Mater.* **157/158**, 256 (1996).
- [2] G. Pattanaik, G. Zangari, and J. Weston, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 112506 (2006).
- [3] S. Franz, M. Bestetti, and P.L. Cavallotti, *J. Magn. Magn. Mater.* **316**, e173 (2007).
- [4] K. O'Grady, T. Thomson, S.J. Greaves, and G. Bayreuther, *J. Appl. Phys.* **75**, 6849 (1994).
- [5] M.L. Yan, Y. Liu, S.H. Liou, and D.J. Sellmyer, *IEEE Trans. Magn.* **37**, 1671 (2001).
- [6] H.S. Kim, J.D. Lee, S.Y. Jeong, C.H. Lee, and S.J. Suh, *J. Kor. Mag. Soc.* **21**, 151 (2011).
- [7] H.S. Kim, S.Y. Jeong, C.H. Lee, and S.J. Suh, *J. Kor. Mag. Soc.* **21**, 193 (2011).
- [8] G. Pattanaik, G. Zangari, and J. Weston, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112506 (2006).
- [9] M. Ghidini, G. Zangari, I.L. Prejbeanu, G. Pattanaik, L.D. Buda-Prejbeanu, G. Asti, C. Pernechele, and M. Solzi, *J. Appl. Phys.* **100**, 103911 (2006).
- [10] H.S. Kim, S.Y. Jeong, and S.J. Suh, to be published in *J. Magnetism* **18** (2013).
- [11] R. Street and J.C. Woolley, *Proc. Phys. Soc., Sect. A* **62**, 562 (1949).
- [12] E.P. Wohlfarth, *J. Phys.* **F14**, 155 (1984).
- [13] P.E. Kelly, K. O'Grady, P.I. Mayo, and R.W. Chantrell, *IEEE Trans. Magn.* **25**, 3881 (1989).
- [14] M. Ghidini, A. Lodi-Rizzini, C. Pernechele, M. Solzi, R. Pellicelli, G. Zangari, and P. Vavassori, *J. Magn. Magn. Mater.* **322**, 1576 (2010).
- [15] I. Zana and G. Zangari, *J. Magn. Magn. Mater.* **272-276**, 1698 (2004).
- [16] I. Zana, G. Zangari, and M. Shamsuzzoha, *J. Magn. Magn. Mater.* **292**, 266 (2005).
- [17] G. Lauhoff and T. Suzuki, *J. Appl. Phys.* **87**, 5702 (2000).

Magnetic Interaction Effect on Activation Volume and Area of CoPt Magnetic Films

Hyeon Soo Kim and Soon Young Jeong*

Department of Physics and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

Su Jeong Suh

School of Advanced Materials and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received 11 November 2013, Received in final form 2 December 2013, Accepted 3 December 2013)

The magnetic interaction effect on the magnetic activation volume and area of electrodeposited CoPt magnetic films was investigated. The dipolar interaction was predominant interaction mechanism for all samples. And the interaction strength was increased with decreasing current density and increased with increasing sample thickness. Although the activation volumes of the samples fabricated at low current density were larger than those of the high current density samples, the sample thickness seemed to have little influence on the variation of activation volume. But it was found that the activation area was apparently affected by the magnetic interaction strength as well as the current density.

Keywords : CoPt magnetic film, activation volume, activation area, dipolar interaction, interaction strength