

Magnetic Interaction Effects on Magnetic Switching Volume for Cr/CoSm/Cr Magnetic Films Deposited with Different Sputtering Pressures of Underlayer

Hae-Woong Kwon

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

Soon Young Jeong* and Hyeon Soo Kim*

Department of Physics and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received 5 November 2018, Received in final form 26 November 2018, Accepted 26 November 2018)

Magnetic interaction effects on the magnetic switching volume for Cr/CoSm/Cr magnetic films deposited with different sputtering pressures (7~10 mTorr) of underlayer (Cr) was investigated. The magnetic interaction mechanism of all the Cr/CoSm/Cr magnetic films investigated in this study was dipole interaction, and the dipole interaction was stronger at the samples fabricated at low sputtering pressure. The magnetic field (H_{AM}) at which the maximum dipole interaction occurred in each sample was larger than the coercivity (H_c). The magnetic switching volume was larger for the sample with stronger dipole interaction, and it showed maximum value in the H_{AM} region and then decreased in higher field region above the H_{AM} . Therefore, it is considered that the intensity of the dipole interaction is closely related to the magnetic switching volume.

Keywords : DC magnetron sputtering, Cr underlayer and capping layer, CoSm magnetic film, magnetic dipole interaction, irreversible susceptibility, magnetic moment decay, magnetic viscosity coefficient, magnetic switching volume

하지층 Cr의 스퍼터링 압력을 달리하여 제작한 Cr/CoSm/Cr 자성막의 자기상호작용이 자기역전부피에 끼치는 영향

권해웅

부경대학교 재료공학과, 부산시 남구 신선로 365, 48547

정순영* · 김현수*

경상대학교 자연과학대학 물리학과 및 기초과학 연구소, 경남 진주시 진주대로 501, 52828

(2018년 11월 5일 받음, 2018년 11월 26일 최종수정본 받음, 2018년 11월 26일 게재확정)

하지층 Cr의 스퍼터링 압력을 달리하여(7~10 mTorr) 제작한 Cr/CoSm/Cr 자성막의 자기상호작용이 자기역전부피에 끼치는 영향을 조사하였다. 연구에 사용된 모든 Cr/CoSm/Cr 자성막의 자기상호작용 기구는 쌍극자 상호작용이었으며, 낮은 스퍼터링 압력에서 제작한 시료일수록 쌍극자 상호작용이 더 강했다. 또한 각 시료의 최대 쌍극자 상호작용이 일어난 자기장(H_{AM})은 보자력(H_c)보다 컸다. 자기역전부피는 쌍극자 상호작용이 강한 시료일수록 더 컸으며, 각 시료의 자기역전부피는 H_{AM} 영역에서 최대를 보이다가 더 큰 자기장 영역에서는 감소하는 경향을 보였다. 따라서 쌍극자 상호작용의 세기가 역전부피의 증감에 크게 관련되는 것으로 판단된다.

주제어 : 직류 마그네트론 스퍼터링, Cr 하지층과 보호층, CoSm 자성막, 쌍극자 상호작용, 비가역자화율, 자기모멘트 감쇠, 점성 계수, 자기역전부피

I. 서 론

각종 미세 전자기 소자(Microelectromagnetic Devices)나 고밀도 자기기록(High Density Magnetic Recording: HDMR) 매체로 활용 가능성이 매우 큰 자성재료로 천이금속-희토류 금속 합금이 있다[1-3].

이들 합금 중 CoSm 합금 자성막은 하지층으로 Cr를 주로 사용하는 데, 그 이유는 Cr이 육방밀집구조를 갖는 자성막과 거의 같은 커쌍기를 하여 자성막의 c축이 면내로의 배향을 향상시키기 때문이다[4,5]. 한편 하지층의 제작조건인 스퍼터링 압력이나 두께 변화 그리고 하지층의 종류에 따라 자성막의 자기적 성질이 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, Kim 등은 하지층 Cr의 스퍼터링 압력을 달리하여 제작한 Cr/CoSm 자성막의 연구를 수행한 결과 보자력이나 각형비는 물론 자기상호작용의 세기와 기구 그리고 역전현상이 하지층의 제작조건에 따라 크게 변한다는 것을 밝혔다[6]. 또한 Singleton 등은 하지층이 없이 커버 글라스 위에 성장시킨 CoSm 자성막의 경우 쌍극자 상호작용은 물론 자기역전부피 또한 증가하고, 하지층의 두께가 두꺼워지거나 측정온도가 높을수록 역전부피가 증가하는 현상은 자기화 역전기구가 바뀌기 때문인 것으로 설명하였다[7]. 이들 연구결과는 하지층의 스퍼터링 압력이나 두께 변화 그리고 하지층의 종류 등이 하지층 성장을 결정짓고, 이 하지층의 형상이 자성층 형상과 채우기 비율 등에 영향을 끼쳐 자성이 바뀌는 것으로 설명할 수 있다.

하지층과 자성층의 형상은 주사 전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM) 등을 이용하여 직접 관찰하는 방법이 있고, 자성층이 하지층의 형상을 그대로 이어받는 것으로 간주할 경우 자성층의 구조나 형상에 크게 의존하는 보자력, 자기화 역전기구 그리고 자기상호작용 기구나 세기 등을 분석하여 규명하는 간접적인 방법이 있다. 앞에서 언급한 Kim의 연구에서는 스퍼터링 압력을 달리하여 성장시킨 하지층 Cr 위에 동일한 압력과 두께로 자성층 CoSm과 보호층 Cr을 성장시켜 제작한 4 종류 Cr/CoSm/Cr 시료 모두 쌍극자 상호작용을 일으키고 하지층의 스퍼터링 압력이 낮은 시료일수록 쌍극자 상호작용이 일정하게 증가함을 밝혔으므로, 스퍼터링 압력에 따라 형성되는 하지층 형상을 자성층이 그대로 이어받는 것으로 판단된다.

한편 자기기록매체에 대한 연구에서 종종 언급되는 자기역전부피는 그 시료의 보자력에서 역전을 일으키는 부피로 정의되며, 이 역전부피의 크기가 기록밀도는 물론 저장된 정보의 열적 안정성 그리고 잡음의 정도 등을 평가하는 중요한 물리량으로 사용된다. 그러나 일반적으로 자기역전부피는 인가 자기장에 따라 크기가 다르지만 그 크기에 영향을 미치는

현상에 대해서는 연구가 많이 이뤄지지 않은 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 하지층 제작조건에 의해 쌍극자 상호작용의 세기가 다른 4 종류 Cr/CoSm/Cr 시료의 자기역전부피를 구하고, 이들 자기역전부피의 크기와 쌍극자 상호작용 세기와의 관련성을 규명하도록 한다.

II. 실험 방법

자성층으로 사용될 CoSm target은 Ar 가스 분위기에서 Co와 Sm 일정 비율의 분말을 ball mixing하여 직경 2 inch 크기로 고압으로 압축시켜 진공도 10^{-6} Torr, 온도 $1,100^{\circ}\text{C}$ 에서 30분간 열처리하여 제작하였으며, 하지층과 보호층으로 사용한 Cr은 순도 99.9% 제품을 사용하였다[8].

연구에 사용된 Cr/CoSm/Cr 시료는 chamber의 진공도를 3×10^{-7} Torr까지 배기시킨 후 dc 마그네트론 스퍼터링법으로 제작하였다. 하지층 Cr은 Ar 스퍼터링 압력을 각각 7, 8, 9, 10 mTorr으로 달리하여 cover glass 위에 80 nm 두께로 성장시켰다. 자성층 CoSm은 스퍼터링 압력을 20 mTorr로 일정하게 유지시킨 상태에서 30 nm 두께로 각각의 하지층 위에 성장시킨 다음 보호층 Cr은 7 mTorr 하에서 30 nm 두께로 성장시켜 4 종류의 시료를 제작하였다. 하지층 및 보호층 Cr의 스퍼터링 전력은 53 W이었고 자성층 CoSm은 15 W이었다.

시료의 자기적 성질은 시료진동형자력계(VSM: MicroMag™ 3900)로 상온에서 측정하였다. 각 시료의 자기상호작용 세기와 자기역전부피와의 관계를 규명하기 위해 상온에서 수평 자기이력곡선, 등은 잔류자기(Isothermal Remanence: IRM) 곡선, 직류 자기소거 잔류자기(DC Demagnetization Remanence: DCD) 곡선 그리고 자기모멘트 감쇠의 시간의존성을 측정하였다. 수평 자기이력곡선, DCD 곡선 그리고 자기모멘트 감쇠는 양(+)의 방향으로 시료를 먼저 포화시킨 후 측정하였다. DCD 곡선은 먼저 양의 방향으로 자기장을 인가하여 시료를 완전히 포화시킨 다음 포화시킨 자기장과 반대인 음(-)의 방향으로 일정 자기장을 인가한 다음 자기장을 0으로 줄인 상태에서 자기모멘트를 측정하되, 음의 방향으로 포화될 때까지 자기장을 일정하게 감소시키면서 단계적으로 측정하였다. 한편 교류 자기장을 인가하여 시료를 완전히 자기소거시킨 후 측정하는 IRM 곡선은 자기소거된 시료를 양의 방향으로 일정한 자기장을 인가한 다음 자기장을 0으로 줄인 상태에서 자기모멘트를 측정하되 양의 방향으로 포화될 때까지 자기장을 일정하게 증가시키면서 단계적으로 측정하였다.

자기역전부피를 구하는 방법으로는 인가 자기장 주사속도(field sweep rate)에 따른 보자력 변화로부터 구하는 방법[9] 그리고 자기모멘트 감쇠곡선과 DCD 곡선을 측정하여 구하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 자기모멘트 감쇠로부터 얻

은 자기점성계수(magnetic viscosity coefficient: S)와 DCD 곡선으로부터 구한 비가역자화율(irreversible magnetic susceptibility: χ_{irr}^{dcd})을 이용하여 구하였다.

한편 자기모멘트 감쇠는 양의 방향으로 시료를 완전히 포화시킨 다음 포화시킨 자기장과 반대 방향인 음의 방향으로 자기장을 1,200 sec 동안 인가한 상태에서 각 자기장 별로 관측하였다. 대부분의 자성체의 자기모멘트는 보자력에 해당되는 자기장 영역에서 가장 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 상온에서 측정된 자기이력곡선에서 얻은 보자력을 기준으로 ± 500 Oe 범위에서는 인가 자기장의 크기를 20 Oe, 그 외 영역에서는 60 Oe-500 Oe씩 단계별로 변화시키면서 자기모멘트 변화를 관측하였다.

III. 결과 및 논의

자기상호작용은 쌍극자 상호작용(dipolar interaction)과 교환 상호작용(exchange interaction)으로 대별된다. 연구에 사용된 4 종류의 자기상호작용 기구와 세기를 DCD 곡선과 IRM 곡선을 이용하여 구한 상호작용장 인자(interaction field factor: IFF)[10], Henkel plot[11] 그리고 Kelly 등[12]이 수정한 Wohlfarth 방정식 $\Delta M = M_d/M_\infty - [1 - 2M_r/M_\infty]$ [13]에 적용시켜 규명한 결과, 모든 시료의 자기상호작용 기구는 쌍극자 상호작용임이 밝혀졌다[6]. 여기서 M_d 와 M_r 각각은 DCD 곡선과 IRM 곡선의 자기모멘트이고 M_∞ 은 IRM 곡선의 포화 자기모멘트이다. Fig. 1은 4 종류의 시료에 대한 $\Delta M(H)$ 를 나타낸 것으로[6] 모든 시료가 자기장 전체에 걸쳐 $\Delta M < 0$ 이므로 쌍극자 상호작용이 지배적인 상호작용 기구이고, ΔM 의 극값이 수평 자기이력곡선에서 구한 각 시료의 보자력(H_c)보다 다소 큰 자기장에 위치함을 알 수 있었다. 여기

서 7 mTorr, 8 mTorr, 9 mTorr 및 10 mTorr 시료의 보자력은 각각 1.42 kOe, 2.19 kOe, 2.52 kOe 그리고 2.90 kOe이었다.

한편 ΔM 의 극값과 면적 $|\Delta M_{area}| = \int_0^{H_a} \Delta M dH$ 으로 평가되는 상호작용 세기의 척도[14]를 적용한 결과, 낮은 압력에서 제작한 시료가 더 강한 쌍극자 상호작용을 일으킴을 알 수 있었다. 이와 같이 하지층이 낮은 압력에서 제작된 시료일수록 쌍극자 상호작용이 증가하는 현상은 스퍼터링 압력이 낮은 시료일수록 채우기 비율(volume fraction)이 증가하여 자성난알을 자기적으로 고립시키는 다공성과 결합이 감소하고 자성상을 분리시킬 비자성 Cr의 영향이 줄어들기 때문인 것으로 설명하고 있다[6,15].

각 시료의 자기역전부피를 구하기 위하여 DCD 측정곡선과 이 곡선으로부터 얻은 비가역자화율 $\chi_{irr}^{dcd} = dM_d/dH$ 를 나타낸 Fig. 2는 스퍼터링 압력이 7 mTorr인 시료에 대한 것

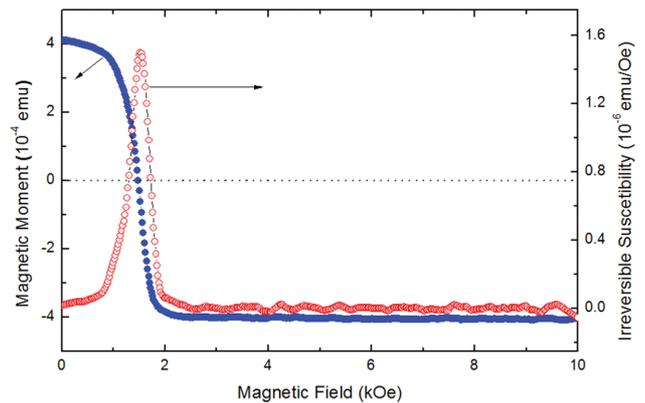


Fig. 2. (Color online) DCD remanence curve and its differential curve of the sample fabricated with 7 mTorr pressure.

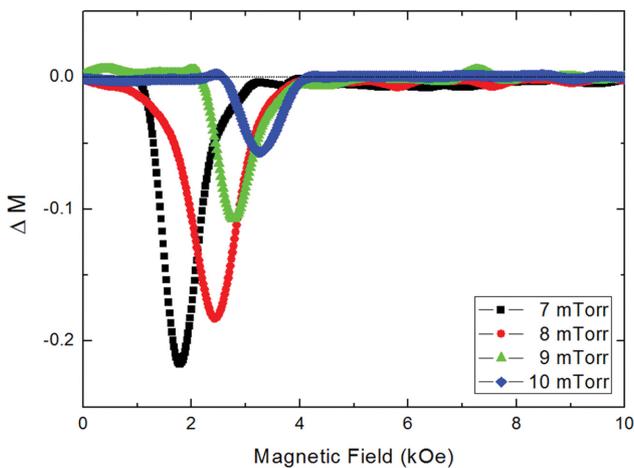


Fig. 1. (Color online) Applied field dependence of the ΔM for all samples [6].

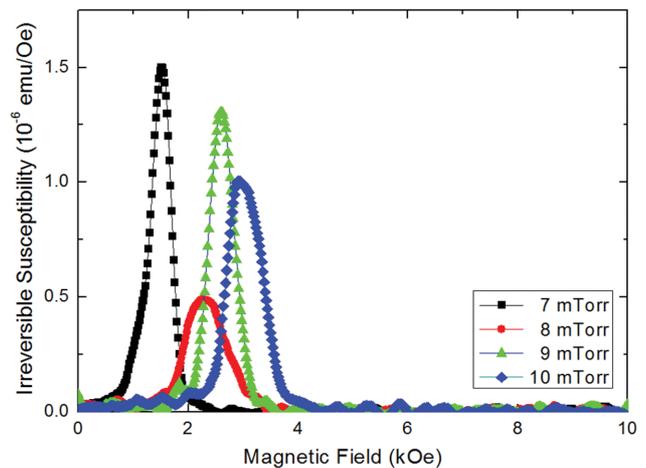


Fig. 3. (Color online) Irreversible susceptibility curves obtained from the DCD remanence curves for all samples.

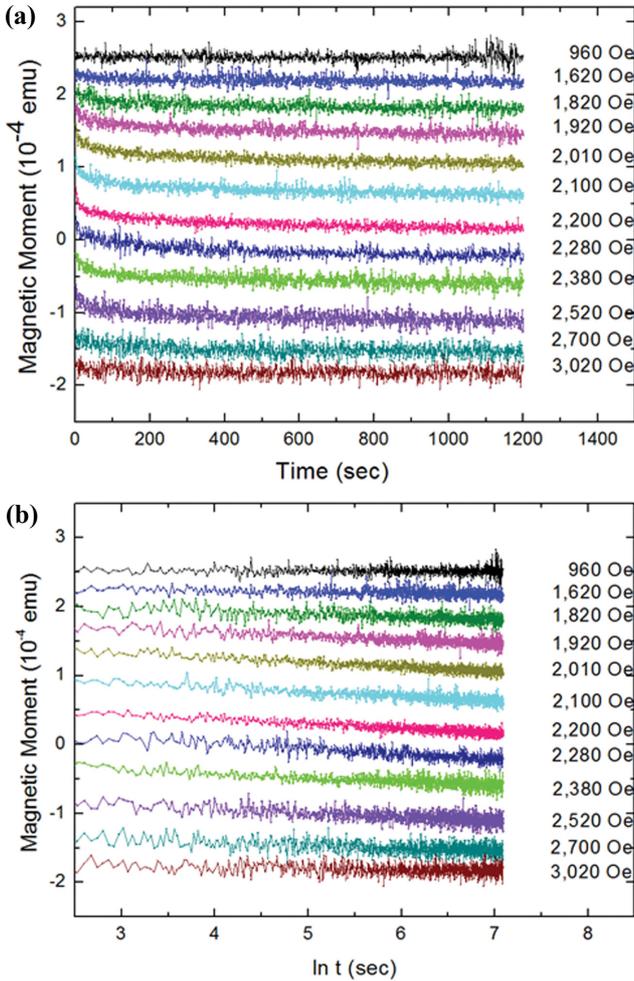


Fig. 4. (Color online) (a) Magnetic moment decay curves as a function of time for the sample fabricated with 8 mTorr pressure. (b) Magnetic moment decay curves as a function of $\ln t$ for the sample fabricated with 8 mTorr pressure.

이다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 DCD 곡선으로부터 구한 최대 비가역자화율은 잔류 자기모멘트가 0일 때의 자기장(H_{cd})에서 나타났으며, 이 최대 비가역자화율이 위치한 자기장(H_χ)은 H_c 과 거의 같은 자기장 영역에 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 4종의 시료에 대한 비가역자화율을 나타낸 것으로 각 시료의 H_χ 와 H_c 는 거의 일치하는 경향을 보인다.

Fig. 4a는 스퍼터링 압력이 8 mTorr인 시료를 양의 방향으로 크기 10 kOe 자기장을 인가하여 시료를 완전히 포화시킨 다음 인가 자기장과 반대 방향인 음의 방향으로 크기가 각각 다른 자기장을 1,200 sec 동안 인가한 상태에서 관측한 자기모멘트 감쇠현상이다. 자기모멘트가 시간이 경과함에 따라 감쇠하는 현상은 자기이력을 일으키는 자성체가 갖는 보편적인 현상으로 이 현상은 $M(H, t) = M_0(H, t_0) \pm S(H) \ln t$ 로 표현된다[16]. 여기서 M 과 M_0 는 시각 t 와 t_0 에서 자기모멘트 값이고, S 는 자기점성계수(magnetic viscosity coefficient)이다.

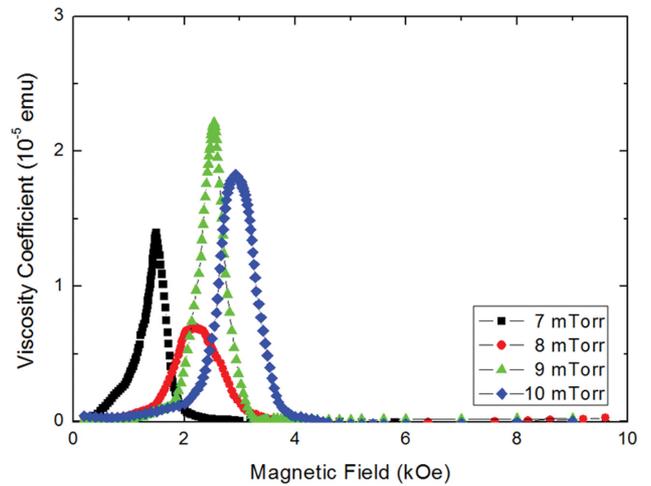


Fig. 5. (Color online) Variations of magnetic viscosity coefficients as a function of reverse magnetic field for all samples.

Fig. 4b는 Fig. 4a를 위의 식에 적용시킨 것으로, 각 직선의 기울기가 인가 자기장 별 S 에 해당한다. 이 그림으로부터 시료의 H_c 와 거의 같은 자기장 2.20 kOe 영역에서 자기모멘트가 가장 크게 감쇠함을 확인할 수 있다. Fig. 4b를 이용하여 구한 각 시료 별 자기점성계수의 자기장 의존성은 Fig. 5와 같다. 이 그림으로부터 각 시료의 최대 자기점성계수가 위치한 자기장(H_S)은 각각의 H_c 와 거의 같음을 확인할 수 있으며, 이 결과는 앞에서 언급한 것과 같이 H_χ 와도 거의 일치하였다. 이와 같이 H_S 와 H_χ 가 거의 같은 원인은 두 물리량이 각 시료의 에너지 장벽의 크기를 반영하기 때문이다.

자기점성계수와 비가역자화율과의 관계는 $H_f = S/\chi_{irr}^{dcd} = k_B T / V_{sw} M_s$ 로 표현된다[17]. 이 식에서 H_f 를 섭동장(fluctuation field)이라 하며, 이 섭동장은 처음의 자기화 방향과 반대 방향으로 작용하는 가상의 장이다. 섭동장 에너지에 의해 자성체 내 자기화의 일부분 또는 전체가 섭동장 방향으로 역전을 일으키며, 이렇게 역전되는 부피를 자기역전부피(magnetic switching volume: V_{sw})라 한다. 자기역전부피는 $V_{sw} = k_B T \chi_{irr}^{dcd} / M_s S$ 로 표현되며, 여기서 k_B 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도 그리고 M_s 는 포화 자기화이다.

Fig. 6은 각 시료의 H_c , H_χ , H_S 그리고 최대 쌍극자 상호작용이 일어난 자기장 (H_{AM})을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 낮은 스퍼터링 압력에서 제작한 시료에 비해 높은 스퍼터링 압력에서 제작한 시료일수록 H_c , H_χ , H_S 그리고 H_{AM} 모두 크게 증가하였고, 각 시료 별 증가 경향이 거의 같음을 알 수 있다. 또한 각 시료의 H_χ , H_S 은 H_c 와 거의 같았으나 H_{AM} 은 이들에 비해 더 크므로 최대 쌍극자 상호작용은 보자력, 최대 비가역자화를 그리고 최대 점성계수 각각이 나타나는 자기장에 비해 상당히 높은 자기장에서 일어남을 알 수 있다.

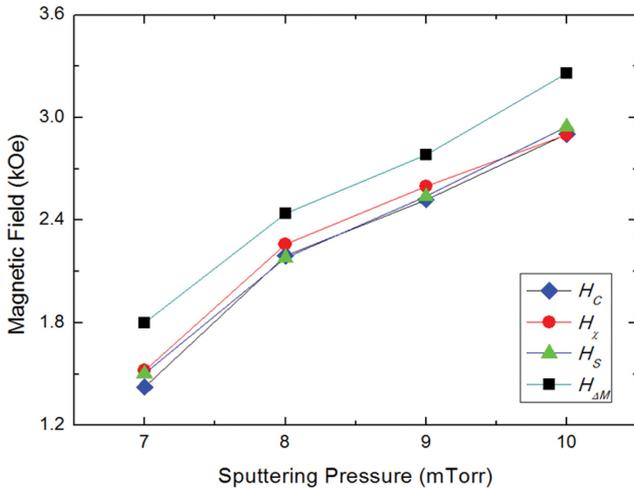


Fig. 6. (Color online) Dependence of coercivity, magnetic field with maximum irreversible susceptibility, magnetic field with maximum viscosity coefficient and magnetic field with maximum dipole interaction on the sputtering pressure.

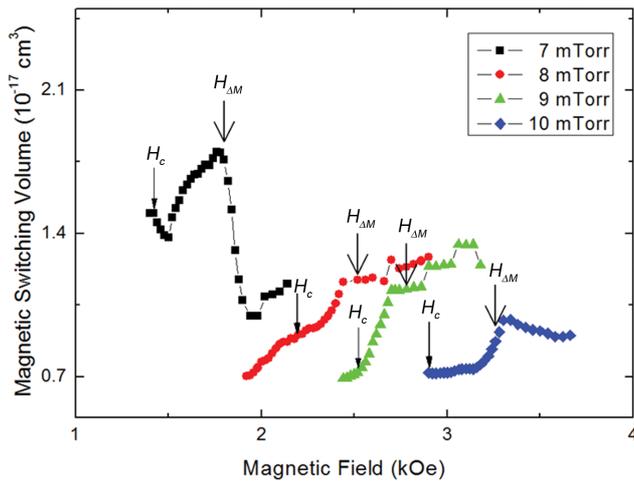


Fig. 7. (Color online) Variation of switching volumes with applied magnetic field. The arrows indicate the coercivity of each sample and the magnetic field at which the ΔM peak occurred.

자기모멘트 감쇠와 DCD 곡선으로부터 얻은 비가역자화율과 자기점성계수를 위 식에 적용하여 구한 각 시료의 인가 자기장 별 자기역전부피는 Fig. 7과 같다. 자기기록매체에서 자기역전부피는 물리적 부피와는 달리 에너지장벽을 극복하는 과정에서 자기적으로 역전을 일으키는 부피로 정의하며 자기구역(magnetic domain)의 배위, 보자력, 자기화 역전기구, 자기상호작용의 종류와 세기 등에 관련된다.

Fig. 7에서 자기역전부피를 표시한 자기장의 범위는 각 시료의 최대 쌍극자 상호작용의 반치폭(full width at half maximum: FWHM)에 해당되며, 화살표에 표시된 H_c 와 $H_{\Delta M}$ 은 각 시료의 보자력과 최대 쌍극자 상호작용이 일어난 자기

장을 나타낸 것이다. 이 그림에서 각 시료의 자기역전부피는 H_c 뿐만 아니라 $H_{\Delta M}$ 영역에서도 낮은 스퍼터링 압력에서 제작한 시료일수록 더 큼을 알 수 있다. 또한 각 시료의 자기역전부피는 자기장이 증가할수록 증가하며 $H_{\Delta M}$ 영역에서 최대를 보이다가 서서히 감소하는 경향을 나타낸다. 앞에서 설명한 것처럼 낮은 스퍼터링 압력에서 제작한 시료일수록 쌍극자 상호작용이 더 컸고, $H_{\Delta M}$ 영역에서 더 큰 자기역전부피를 보였다.

따라서 본 연구에 사용된 시료는 하지층의 스퍼터링 압력이 낮을수록 쌍극자 상호작용이 증가하고 쌍극자 상호작용이 강할수록 더 큰 자기역전부피를 보였으며, 자기역전부피는 최대 쌍극자 상호작용이 일어나는 자기장 영역에서 최대를 보이다가 감소하는 현상을 나타내므로 쌍극자 상호작용이 자기역전부피 증감에 밀접하게 관련됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

하지층 Cr의 스퍼터링 압력을 7 mTorr에서 10 mTorr까지 달리하여 제작한 Cr/CoSm/Cr 자성막의 자기상호작용이 자기역전부피에 미치는 현상을 규명하였다. 시료의 자기적 성질은 시료진동형자력계로 상온에서 측정하였으며, 각 시료의 자기상호작용세기와 자기역전부피와의 관계를 규명하기 위해 상온에서 수평 자기이력곡선, 등온 잔류자기곡선, 직류 자기소거 잔류자기곡선 그리고 자기모멘트 감쇠의 시간의존성 등을 측정하였다.

연구에 사용된 모든 시료의 자기상호작용 기구는 쌍극자 상호작용이었으며, 최대 쌍극자 상호작용이 일어난 자기장 ($H_{\Delta M}$)은 각각의 보자력(H_c)보다 컸다. 또한 하지층을 낮은 스퍼터링 압력에서 제작한 시료일수록 쌍극자 상호작용이 더 강했다.

자기역전부피는 쌍극자 상호작용이 강한 시료일수록 더 컸으며, 각 시료는 $H_{\Delta M}$ 영역에서 최대를 보이다가 더 큰 자기장 영역에서는 감소하는 경향을 보였다. 따라서 쌍극자 상호작용이 자기역전부피의 증감에 중요한 인자로 작용하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 경상대학교 연구년제 연구교수 지원비에 의하여 수행되었음.

References

[1] H. Hegde, S. U. Jen, and F. J. Cadieu, J. Appl. Phys. **37**, 5926

(1993).

[2] J. Zhang, P. Evans, and G. Zangari, *J. Magn. Magn. Mater.* **283**, 89 (2004).

[3] C. Prados and G. C. Hadjipanayis, *J. Appl. Phys.* **83**, 6253 (1998).

[4] D. E. Laughlin and B. Y. Wong, *IEEE Trans. Magn.* **27**, 4713 (1991).

[5] S. Takei, A. Morisako, and M. Matsumoto, *J. Appl. Phys.* **87**, 6968 (2000).

[6] H. W. Kweon, S. Y. Jeong, and H. S. Kim, *J. Korean Magn. Soc.* **28**, 99 (2018).

[7] E. W. Singleton, Z. S. Shan, S. Y. Jeong, and D. J. Sellmyer, *IEEE Trans. Magn.* **31**, 2743 (1995).

[8] S. Y. Jeong, H. S. Kim, S. I. Kim, J. D. Lee, and S. J. Shu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 5000 (2006).

[9] P. Bruno, G. Bayreuther, P. Beauvillan, C. Chappert, G. Lugert, D. Renard, J. Renard, and J. Seiden, *J. Appl. Phys.* **68**, 5759 (1999).

[10] A. R. Corradi and E. P. Wohlfarth, *IEEE Trans. Magn.* **14**, 861 (1978).

[11] O. Henkel, *Phys. Status Solidi* **7**, 919 (1964).

[12] P. E. Kelly, K. O'Grady, P. I. Mayo, and R. W. Chantrell, *IEEE Trans. Magn.* **25**, 3881 (1989).

[13] E. P. Wohlfarth, *J. Appl. Phys.* **29**, 595 (1958).

[14] G. Bottoni, *J. Magn. Magn. Mater.* **110**, 355 (1992).

[15] E. M. T. Velu and D. N. Lambeth, *IEEE Trans. Magn.* **28**, 3249 (1992).

[16] R. Street and J. C. Woolley, *Proc. Phys. Soc. London Sect. A* **62**, 562 (1949).

[17] E. P. Wohlfarth, *J. Phys. F: Met. Phys.* **14**, L155 (1984).