ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(2), 39-42 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.2.039

Analyses of Laser Induced Demagnetization and Remagnetization in Carbon Doped FePt Thin Films

Hyon-Seok Song[1,2], Hyun Seok Ko[2], Jung-Il Hong[1]*, and Sung-Chul Shin[1,2]
[1]Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu 711-873, Korea
[2]Department of Physics and CNSM, KAIST, Daejeon 305-338, Korea

Kyeong-Dong Lee and Byong-Guk Park
Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-338, Korea

(Received 21 January 2015, Received in final form 11 February 2015, Accepted 11 February 2015)

After preparing carbon-doped FePt films by dc magnetron sputtering, we observed ultrafast demagnetization and its recovery by means of a time-resolved magneto-optical Kerr effect technique. We confirm that the degree of $L1_0$ ordering is decreased and coercivity is changed, as the carbon concentration increases. All samples are demagnetized within ~5 ps after the femtosecond laser pulse heated the sample. Interestingly, ultrafast relaxation time, which indicates fast magnetization recovery, increases as the carbon concentration increases due to the low spin-orbit coupling of carbon.

Keywords : C doped FePt, demagnetization, remagnetization, TR-MOKE

탄소가 도핑 된 FePt 박막에서의 펨토 초 펄스 레이저에 의한 자기 소거와 회복 분석

송현석[1,2] · 고현석[2] · 홍정일[1]* · 신성철[1,2]
[1]대구경북과학기술원 신물질과학전공, 대구 달성군 현풍면 테크노중앙대로 333, 711-873
[2]한국과학기술원 물리학과, 대전 유성구 대학로 291, 305-338

이경동 · 박병국
한국과학기술원 신소재공학과, 대전 유성구 대학로 291, 305-338

(2015년 1월 21일 받음, 2015년 2월 11일 최종수정본 받음, 2015년 2월 11일 게재확정)

우리는 탄소가 도핑 된 FePt 박막을 스퍼터링 방법으로 제작한 후 시간 분해능을 가진 모크 장비를 이용해서 매우 빠른 자기 소거 후 그 회복 과정을 관찰하였다. 탄소의 함량이 늘어 날수록 격자 구조가 $L1_0$에서 벗어나는 것을 확인하였으며 보자력의 변화 또한 확인하였다. 모든 시료가 펨토 초 펄스로 열을 받으면 5 피코초 안에 자기 소거되었다. 그 후 흥미롭게도 탄소 함량이 많을수록 매우 빠른 자기 회복 시간이 길어지는 것이 관측되었다.

주제어 : 탄소도핑 FePt, 자기소거, 자화, 시간분해 광자기 Kerr 효과

I. 서 론

지난 몇 년간 하드디스크 드라이버의 용량은 매우 빠르게 증가해 왔다. 이렇게 하드디스크의 용량을 증가시키기 위해서는 한 정보(바이트) 당 차지하는 자구 들의 크기가 줄어 들어야 한다. 하지만 이러한 유효 자구의 부피가 줄어들게 되면 K_uV/k_BT로 표현되는 열 적 안정성이 줄어 들게 된다. k_B는 볼츠만 상수이며 T는 온도이다. 그리고 K_u는 자기이방성, V는 유효 자구의 부피를 나타낸다. 그렇기 때문에 상온에서 열적 안정성을 유지하면서 유효 자구의 크기를 줄이기 위해서는 필연적으로 자기이방성을 높여야 한다. 그런 이유로 최

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-53-785-6511,
Fax: +82-53-785-6509, e-mail: jihong@dgist.ac.kr

근 매우 높은 자기이방성을 가진 FePt 물질에 관심이 주목되고 있다. 특히 FePt 박막에 탄소 등을 첨가해서 낱알의 크기를 줄이면서 자구의 크기를 줄이는 연구는 이미 많이 되어 있다[1, 2]. 하지만 그럼에도 불구하고 FePt 물질은 실제 하드디스크 드라이버에 아직 사용되고 있지 않다. 상용화에 방해가 되는 가장 큰 이유로 매우 높은 자기이방성 때문에 자화 상태가 너무 안정적인 것이 뽑힌다. 이러한 안정적인 상태는 열 적 안정성을 주는 동시에 자화를 역전시켜서 정보를 기록하는데 방해가 된다. 실제로 FePt을 이용해서 정보를 기록하기 위해서는 매우 강한 외부 자기장이 필요하다. 이러한 문제점을 해결한 미래의 하드디스크 드라이버로 열이나 마이크로 파를 이용해서 자화를 역전시키는 방법이 제시되고 있다[3]. 그 중 레이저를 이용해서 열을 주어 자기이방성을 낮추고 자기 소거를 시킨 후에 자화를 역전시킨 후 식히는 열을 이용해서 기록하는 방법(Heat assisted magnetic recording, HAMR)은 방법은[4] 매우 빠른 속도의 자화 역전 가능성 때문에 관심이 집중되고 있다[5, 6]. 하지만 기록 속도를 높이기 위해서는 자화 역전 시간의 단축뿐만 아니라 열이 빠져나가 전체적인 자성이 회복되는 시간의 단축 또한 필요하다. 그래서 순수 FePt 박막에서 자기 소거와 그 회복에 관한 연구는 여러 사람들에 의해서 진행되고 있다[7-9].

본 논문에서는 탄소가 도핑된 FePt 박막에서 펨토 초 펄스 레이저를 이용해서 매우 빠르게 자기 소거를 야기시킨 후 그 회복 과정을 관찰하였다.

II. 실험방법

1. 시료 증착

본 연구에서 사용된 시료들은 MgO(100) 기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터링방식으로 제작되었다. 이 때 확산 진공 펌프를 이용해서 초기 진공도를 대략 5×10^{-6} Torr까지 내린 후 고순도 아르곤 가스를 5×10^{-3} Torr 주입시켰다. 이 상태에서 FePt 2인치 타겟에 15 W를 걸어주어서 10 nm 두께를 가지고 있는 FePt 합금 박막 시료를 증착하였고 동시에 탄소 타겟을 이용해서 탄소를 도핑하였다. $L1_0$ 구조를 형성시키기 위해서 증착 전에 기판 온도를 500 °C로 맞춘 후 증착이 끝난 후 20분 정도 더 유지시켰다[10]. 이렇게 형성된 박막의 결정성을 X-선 회절분석기(X-ray diffraction, XRD)를 통해서 확인하였으며, 자기적 성질은 섭동자화측정기(vibrating sample magnetometer, VSM)를 통해서 확인하였다.

2. 시간 분해능 자기 동역학 측정 방법

위 방식으로 제작된 시료를 이용해서 펨토 초에서 수백 피코 초 사이에서 일어나는 자기 동역학을 측정하였다. 이 측정을 위해서 사용된 시간 분해능을 가진 모크 현미경장치는 Fig. 1과 같다[11]. Nd : YVO_4 레이저를 기반으로 이용해서 타이-사파이어 레이저를 제작하였다. 이 때 커-렌즈 모드락킹(Kerr-lens mode locking) 방법을 이용해서 중심 파장은 800 nm이고, 펄스 폭은 약 10~30 fs에 82 MHz의 반복률을 가진 펨토초 펄스를 생성하였다. 이렇게 생성된 펄스 레이저는 BBO 결정과 빔 분리기를 이용해서 800 nm 파장을 가진 펌프 빔과 반 파장인 400 nm를 가진 프로브 빔으로 나누었다. 이렇게 나뉜 펌프 빔은 delay-stage를 이용해서 광경로차를 생성하여 프로브 빔과 시간 차를 생성시켰다. 그 후 펌프 빔과 프로브 빔은 50배율의 대물 렌즈(NA 0.5)에서 다시 만나 시료의 표면의 같은 장소에 입사되었다. 그 후 펌프 빔이 가지고 있는 열로 인해서 자기가 소거되고 회복되는 과정을 관측하였다. 이 때 프로브 빔은 펌프 빔에 비해 50배 이상 세기가 작기 때문에 자화에 영향을 미치지 않으며 자화의 초기화를 위해서 외부 자기장을 시료 면에서 40도 기울어진 상태로 2.5 kG를 인가해 주었다[12, 13].

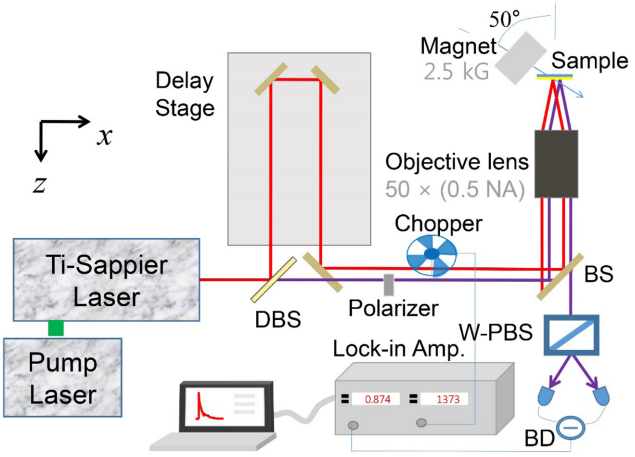

Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of the time resolved MOKE set-up (BS: Beam splitter; DBS: Dichroic beam splitter; W-PBS: Wollaston polarizing beam splitter; BD: Balanced detector) [11].

III. 실험결과

탄소가 도핑 된 FePt 박막의 결정성은 증착 후 XRD를 통해서 분석되었다. Fig. 2(a)에 도식된 그래프를 보면 49.3도 근처에 자리잡은 $L1_0$(002) 봉우리를 볼 수가 있다. 그리고 이 봉우리는 탄소의 함량이 커지면 커질수록 $L1_0$ 결정성이 어수선해 져서 (200) ($2\theta = 47.6°$) 쪽으로 이동하는 것을 관측할 수 있다[10].

그 후 면에 수직 방향의 자기장에 대해서 자기 이력 곡선을 VSM으로 측정한 후 Fig. 2(b)에 도식하였다. 보다시피 860 emu/cm^3 정도의 포화자기 값을 가짐을 알 수가 있다. 이

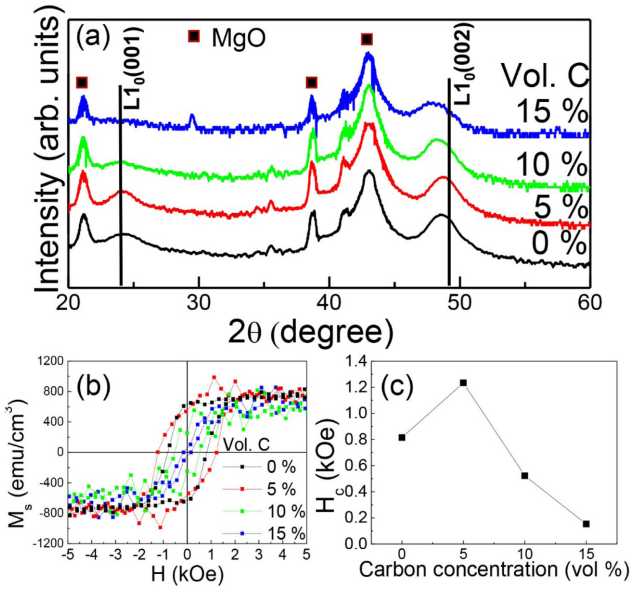

Fig. 2. (Color online) (a) Change of XRD patterns as a function of carbon content, (b) Perpendicular hysteresis loops measured with VSM, and (c) change of coercivity with carbon content.

그래프에서 보자력을 구한 후 Fig. 2(c)에 정리해 보았다. 탄소 함량에 따라서 보자력이 커졌다가 작아지는 것을 보여준다. 탄소가 조금 도핑된 경우에는 자벽 고착 점이 많아져서

Table I. Grain size, ultrafast relaxation time, and slow relaxation time.

C concentration (Vol%)	0	5	10	15
Grain size (nm)	22.18	18.8	15.6	12.18
τ_1 (ps)	12.1 ± 0.4	7.2 ± 0.3	6.8 ± 0.3	5.8 ± 0.4
τ_2 (ps)	96.6 ± 4.2	77.5 ± 2.6	72.1 ± 1.9	106.4 ± 5.0

보자력을 증가시킨다. 하지만 탄소가 더 많이 첨가되는 경우 결정 구조가 제대로 형성되지 않아서 자기 결정 이방성이 줄어 들게 된다[1]. 이런 구조의 형성은 Fig. 2(a)에 있는 탄소가 부피로 15 % 도핑된 경우를 보면 (002)에 위치할 봉우리가 (200)로 이동한 것과 (001) 봉우리의 크기가 매우 작아지는 것으로 확인 할 수 있다. 또한 (002) 봉우리의 폭을 이용해서 평균 자구의 크기를 구한 결과 탄소의 함량 많아 질 수록 반비례해서 자구가 점점 작아지는 것을 확인하였다(Table I). 이러한 탄소가 첨가된 FePt 시료의 경향은 기존에 보고된 시료의 성향과 잘 들어 맞는다[1, 2, 10].

위 과정을 통해서 물질의 특성이 확인된 탄소가 부피비(Vol. C)로 0 %(순수 FePt), 5 %, 10 %, 15 % 들어간 10 nm 두께의 FePt 박막 시료를 이용해서 피코 초 시간 영역에서 일어나는 자기동역학을 시간분해능을 가진 모크 현미경으로 관측하였다. Fig. 3은 4 mJ/cm^{2}의 세기를 가지고 있는 펌프 빔이 시료에 입사되었을 때 자성의 변화를 측정한 것이다. 모

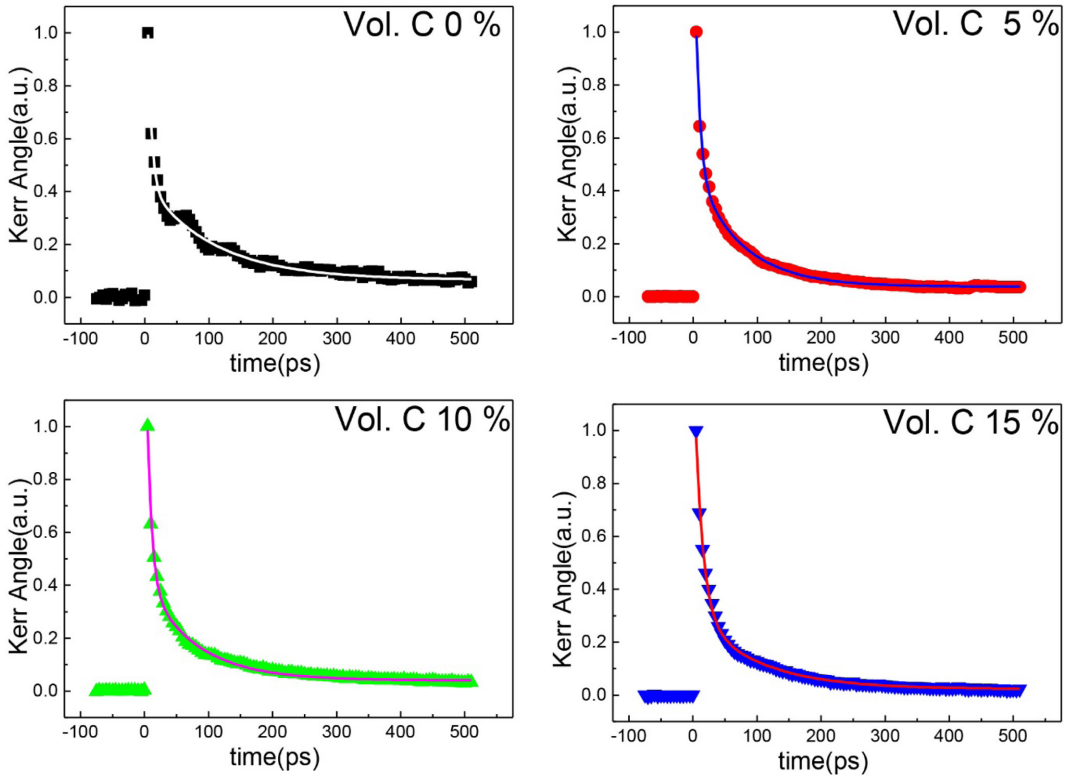

Fig. 3. (Color online) Dynamics in picosecond range measured with time-resolved MOKE.

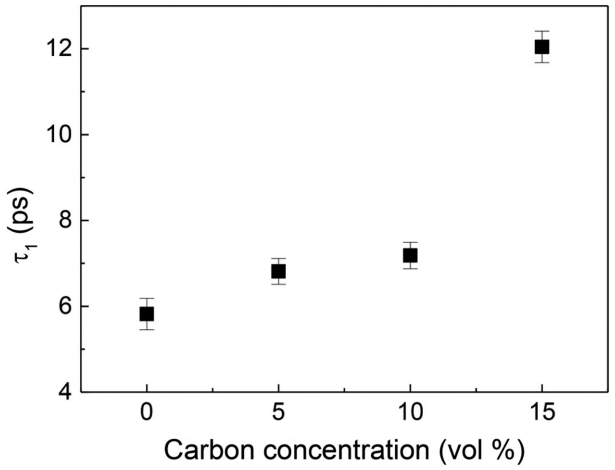

Fig. 4. Ultrafast relaxation as a function of carbon concentration.

두 펌프 빔이 입사된 후 5 피코 초 안에 열로 인해서 자성이 매우 빠르게 소거되는 것을 확인할 수가 있다. 그 후 수백 피코 초에 걸쳐서 천천히 되돌아 오게 된다. 이러한 재자화 현상을 두 개의 지수함수형 붕괴 식, $M/M_o = Ae^{-t/\tau_1} + Be^{-t/\tau_2}$을 이용해서 분석하였다[14]. 이 때 A, B는 단순한 변수이고, τ_1, τ_2는 매우 빠른 풀림(ultrafast relaxation) 시간과 느린 풀림(slower relaxation) 시간을 의미한다. 이렇게 구한 τ_1과 τ_2를 Table I에 나타냈다. 그 중 매우 빠른 시간을 Fig. 4에 표시해 보았다. 그 결과 탄소의 함량이 많아짐에 따라서 매우 빠른 풀림 시간이 점점 길어지는 현상을 보여주고 있다. 이 현상은 스핀궤도결합으로 설명할 수 있다.

처음 레이저 펄스가 시료에 입사되면 전자의 에너지를 높이게 된다. 이렇게 들뜬 상태가 된 전자는 스핀궤도결합을 통해서 스핀과 격자로 에너지를 나누어 준다. 이 과정을 통해서 스핀과 격자의 온도가 올라가게 된다. 그 후 스핀은 다시 스핀궤도결합을 통해서 일부분은 전자로 대부분은 격자로 에너지를 나누어 주면서 온도를 낮추게 된다. 즉 스핀궤도결합이 크면 클수록 위 과정은 더 빠르게 일어나게 된다. 탄소의 스핀궤도결합 상수보다 FePt의 스핀궤도결합 상수가 비교할 바 없을 정도로 크다. 그렇기 때문에 탄소가 적으면 적을수록 스핀궤도결합 상수가 크고 이로 인해서 스핀 온도가 더 빨리 떨어지게 된다.

IV. 결 론

우리는 시간 분해능을 가진 모크 장비를 이용해서 탄소가 도핑 된 FePt 박막에서 매우 빠른 자기 소거 후 그 회복 과정을 관찰하였다. 전 시료에서 5 피코 초 안에 자기 소거가 끝나는 것을 볼 수가 있다. 그 후 흥미롭게도 탄소 함량이 많을수록 매우 빠른 자기 회복 시간이 길어지는 것이 관측되었다. 이것은 탄소 함량이 많을수록 스핀궤도결합이 작아지기 때문이다. 탄소가 포함된 FePt 물질을 이용해서 HAMR을 상용화를 위해서는 이러한 상향을 고려해서 적정한 탄소 함량을 찾아야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의(과제번호 2014R1A2A2A01003709, 2013R1A1A2011103, 2013R1A1A2011936, 2012K1A4A3053565 그리고 2012R1A1A1041590)의 지원과 미래창조과학부에서 지원하는 대구경북과학기술원 기관고유사업에 의해 수행됨.

References

[1] A. Perumal, H.-S. Ko, and S.-C. Shin, IEEE Trans. Magn. **39**, 2320 (2003).
[2] A. Perumal, H.-S. Ko, and S.-C. Shin, Appl. Phys. Lett. **83**, 3326 (2003).
[3] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, H. Tanaka, H. Mutoh, and N. Yoshikawa, IEEE Trans. Magn. **45**, 3816 (2009).
[4] R. E. Rottmayer, S. Batra, D. Buechel, W. A. Challener, J. Hohlfeld, Y. Kubota, L. Li, B. Lu, C. Mihalcea, K. Mountfield, K. Pelhos, C. Peng, T. Rausch, M. A. Seigler, D. Weller, and X. M. Yang, IEEE Trans. Magn. **42**, 2417 (2006).
[5] C. Stanciu, F. Hansteen, A. Kimel, A. Kirilyuk, A. Tsukamoto, A. Itoh, and Th Rasing, Phys. Rev. Lett. **99**, 047601 (2007).
[6] Richard F. L. Evans, Thomas A. Ostler, Roy W. Chantrell, Ilie Radu, and Theo Rasing, Appl. Phys. Lett. **104**, 082410 (2014).
[7] K.-D. Lee, H.-S. Song, J.-W. Kim, H. S. Ko, J.-W. Sohn, B.-G. Park, and S.-C. Shin, Appl. Phys. Express **7**, 113004 (2014).
[8] Jiaqi Zhao, Boyin Cui, Zongzhi Zhang, B. Ma, and Q. Y. Jin, Thin Solid Films **518**, 2830 (2010).
[9] Zhao Jiaqi, Cui Boyin, Zhang Zongzhi, Ma Bin, and Jin Qingyuan, J. Korean Phys. Soc. **56**, 1269 (2010).
[10] H. S. Ko, A. Perumal, and S.-C. Shin, Appl. Phys. Lett. **82**, 2311 (2003).
[11] H.-S. Song, Ph.D. Thesis, KAIST, 2014.
[12] K. D. Lee, J. W. Kim, J. W. Jeong, D. H. Kim, S. C. Shin, K. H. Hong, Y. S. Lee, C. H. Nam, M. H. Son, and S. W. Hwang, J. Korean Phys. Soc. **49**, 2402 (2006).
[13] H.-S. Song, K.-D. Lee, J.-W. Sohn, S.-H. Yang, Stuart S. P. Parkin, C.-Y. You, and S.-C. Shin, Appl. Phys. Lett. **102**, 102401 (2013).
[14] Marija Djordjevic and Markus Münzenberg, Phys. Rev. B **75**, 012404 (2007).