

## Observation of Domain Wall Creep Motions in Co/Ni Multilayers Interfacing with IrMn Layer

Jong-In Kim and Kwang-Su Ryu\*

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Cheongju 28173, Korea

See-Hun Yang

IBM Almaden Research Center, 650 Harry Road, San Jose, California 95120, USA

(Received 13 December 2020, Received in final form 18 December 2020, Accepted 18 December 2020)

We report the experimental observation of the domain wall creep motion in the ferromagnetic Co/Ni multilayers interfacing with antiferromagnetic IrMn layer, using a magento-optical Kerr microscope system capable of direct observation of domain change. From the magnetic domain images observed in real time, it can be seen that as the IrMn thickness increases from 0 Å to 25 Å, the strength of the magnetic field required to move the magnetic domain wall gradually increases, due to an increase in coercivity due to the exchange bias effect at the interface. In addition, it was found that the magnetic domain wall velocity characteristics according to the magnetic field in all samples were well explained by the thermal activated model assuming the domain wall creep motion.

**Keywords** : domain dynamics, domain wall creep motion, thermally activated motion, exchange bias effect

## IrMn 층과 인접한 Co/Ni 다층박막에서 자구벽 Creep 운동의 관찰

김종인 · 류광수\*

한국교육대 물리교육과, 충북 청주시 흥덕구 태성탑연로 250, 28173

양시훈

IBM Almaden Research Center, 650 Harry Road, San Jose, California 95120, USA

(2020년 12월 13일 받음, 2020년 12월 18일 최종수정본 받음, 2020년 12월 18일 게재확정)

본 연구에서는 반강자성 IrMn 층과 인접한 강자성 Co/Ni 다층박막에서 실시간 자구 관찰이 가능한 광자기 현미경 시스템을 이용하여 자구벽 Creep 운동을 관찰하였다. 실시간 관찰된 자구 이미지로부터, IrMn 두께가 0 Å에서 25 Å로 증가함에 따라 자구벽을 움직이는데 필요한 자기장의 세기가 점점 커짐을 알 수 있었고, 이는 반강자성 IrMn 층과 강자성 Co/Ni 계면에 나타나는 교환 바이어스에 의한 보자력의 증가 때문이다. 또한, 모든 샘플에서 자기장의 크기에 따른 자구벽 속력 특성이 자구벽 Creep 운동을 가정한 열적활성화 모델로 잘 설명됨을 알 수 있었다.

**주제어** : 자구동역학, 자구벽 creep 운동, 열적활성화 운동, 교환 상호 작용

### I. 서 론

나노자성체에서의 자구동역학에 대한 연구는 신기능 스핀 소자 개발의 응용 가능성으로 인해 학문적 및 기술적으로 계속해서 큰 관심을 받고 있다[1]. 최근, 수직 자기 이방성을

가진 수직 나노자성체에서 전류에 의한 매우 빠른 자구벽 속도가 관찰된 이후[2,3], 수직 나노자성체의 자구동역학 메커니즘에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[4]. 일반적으로, 자구형성이 아닌 기존의 자구벽 운동을 보이는 수직 나노자성체에서 온도  $T=0\text{K}$ 일 때, 임계 자기장  $H_{cr}$ 보다 큰 자기장을 걸어주지 않으면 자구벽은 움직이지 않는다[5]. 그러나 유한한 크기의 온도  $T>0\text{K}$ 에서는 열적활성화 에너지의 도움으로 임계 자기장  $H_{cr}$ 보다 작은 자기장에서도 자구벽

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

\*Corresponding author: Tel: +82-43-230-3612,

Fax: +82-43-230-5273, e-mail: ksryu@knue.ac.kr

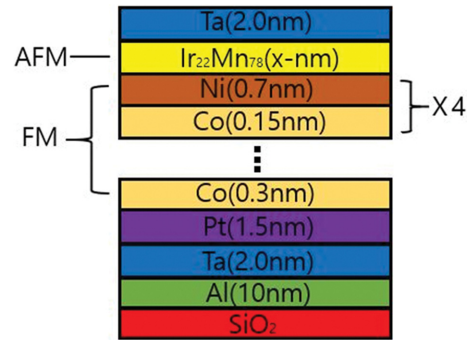
이 움직임을 알 수 있다. 이러한 운동을 열적활성화에 의한 자구벽 Creep 운동이라고 한다. 이러한 자구벽 Creep 운동은 자기장 인가 뿐 아니라 전류 인가에 따른 자구동역학에서도 관측되고 있다[4].

반강자성/강자성 구조로 이루어진 나노자성체에서 계면사이에서의 교환 상호작용에 의해 강자성 박막의 자기이력곡선이 반강자성 층의 영향을 받아 한쪽 방향으로 이동된 비대칭 행태를 띠를 알려져 있다[6]. 이와 함께 자기 이력곡선의 보자력도 증가함을 알 수 있다. 자기이력곡선이 한쪽 자기장방향으로 치우친 정도를 교환 바이어스 자기장  $H_E$  이라 하고 교환 바이어스 효과의 정도를 측정하는데 사용한다. 그러나  $H_E = 0$  임에도 불구하고 증가된 보자력의 증가는 유지됨을 알 수 있다. 특히, 수직 교환 바이어스 된 반강자성/강자성 구조 시스템에서의 비대칭 자구역전현상이 관측되어[7], 많은 연구가 이루어지고 있지만 이에 대한 물리적 이해는 여전히 부족하다. 지금까지 수직 교환 바이어스에 대한 대부분의 연구는 강자성 물질은 주로 강한 수직 자기 이방성을 가지는 Co/Pd, Co/Pt 다층박막 등이 사용되어 왔고, 반강자성 물질은 FeMn[8,9], IrMn[10] 등이 사용되었다. 최근에는 강자성 Co/Ni 다층박막과 반강자성 IrMn 층을 결합한 구조에서 수직 교환 바이어스 효과를 실험적으로 관측되어 관심이 고조되고 있다[11]. 그 이유는 Co/Ni 다층박막이 다른 Co/Pd, Co/Pt 다층박막들과 비교하여 다소 작은 보자력을 가지고 있고 자구벽 이동성향이 강한 물질로 전류 유도 스핀동역학에 많이 사용되고 있기 때문이다[12].

본 연구에서는 반강자성 IrMn 층이 인접한 강자성 Co/Ni 다층박막 구조에서의 자구동역학을 연구하고자 한다. 반강자성 IrMn 층이 강자성 Co/Ni 다층박막의 자구벽 운동에 미치는 영향을 조사하기위해서 IrMn 두께가 0 Å에서 25 Å까지 변하는 샘플을 준비하였고, 자기장의 크기에 따른 자구벽 속력을 측정하기 위해서 실시간 자구관찰이 가능한 광자기 Kerr 현미경 시스템을 사용하였다. 그리고 자기장에 따른 자구벽의 속력 결과를 분석하여 이론적인 모델에 적용하였다.

## II. 실험 방법

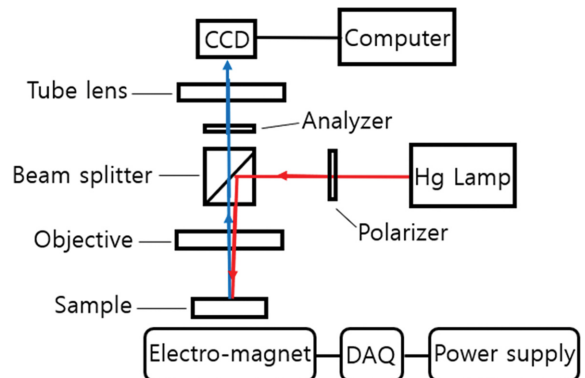
연구에 사용된 샘플은 기본적으로 반강자성 IrMn 층을 인접한 강자성 Co/Ni 다층박막으로 이루어진 것으로 수직 자기 이방성을 가진다. 모든 샘플은 dc magnetron sputtering 방법을 이용하여 비정질 SiO<sub>2</sub>이 입혀진 Si(100) 기판위에 증착되었고, 세부적인 샘플 구조는 20 ÅTaN/15 ÅPt/3 ÅCo/[7 ÅNi/1.5 ÅCo]<sub>x</sub>/x ÅIrMn/20 ÅTaN(x=0, 5, 10, 15, 17.5, 20, 22.5, 25 Å)이다(Fig. 1). 즉, Ta 버퍼층 위에 강자성 Co/Ni 다층 박막의 수직 이방성을 돕는 Pt 층을 증착하였다. Co/Ni



**Fig. 1.** (Color online) Schematic diagram of the detailed sample structure basically consisting of the antiferromagnetic (AFM) IrMn layer and the ferromagnetic (FM) Co/Ni multilayers, where the IrMn thickness is changed from 0 Å to 25 Å.

다층 박막 위에 각각 두께가 다른 반강자성 Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub>를 증착하였고, 그 위에 샘플의 산화를 막기 위해 Ta 층을 입혔다. 제작된 샘플은 제작 후 270 °C에서 자기장이 0인 상태에서 진행되는 제로 자기장 cooling 과정을 거쳤다. 그 결과 샘플들의 자기이력곡선은 교환 바이어스 자기장  $H_E$ 가 거의 없는 대칭적인 형태를 보임을 확인할 수 있었다. 자기이력곡선의 결과로부터, 샘플의 IrMn의 두께가 0 Å에서 25 Å까지 변할 때, 보자력  $H_C$ 은 71.5 Oe에서 523.4 Oe까지 변하며 증가하는 특성을 보임을 알 수 있었다. 이는 반강자성/강자성 구조에서 나타나는 일반적인 교환 바이어스 시스템의 특징으로 계면에서 나타나는 보자력의 증가 현상이다. 본 연구에서 반강자성 IrMn의 두께 변화에 따른 강자성 박막의 자구동역학의 변화를 살펴보고자 한다.

샘플의 자기이력곡선과 자구벽 속도를 측정하기 위해서 광자기 Kerr 현미경 시스템을 사용하였다. 기본적으로 광자기 Kerr 현미경 시스템은 샘플에 반사되어 나온 빛의 편광 변화 때문에 나타나는 빛의 세기의 변화를 이용하여 자구의 변화



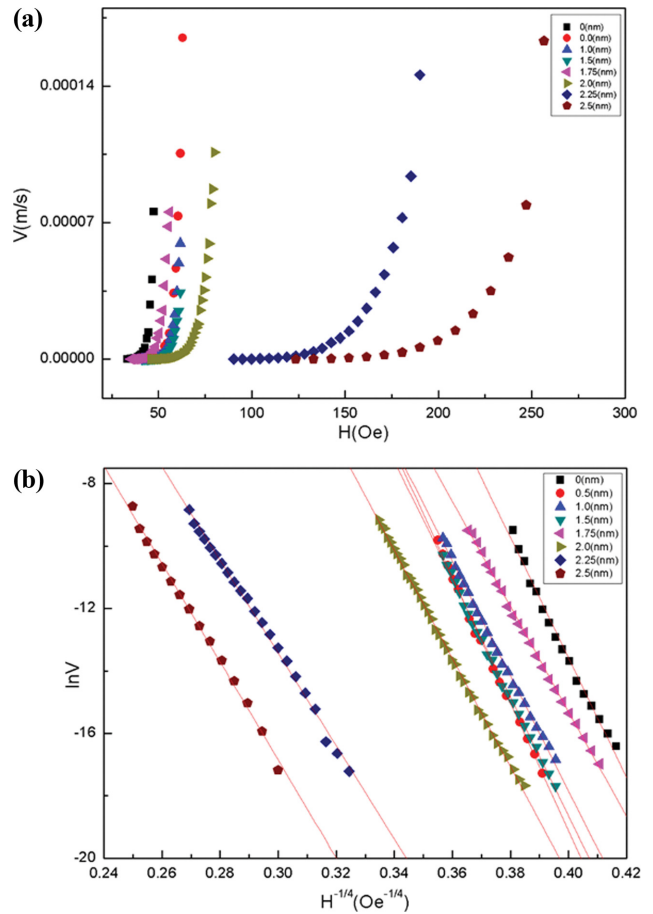
**Fig. 2.** (Color online) Schematic diagram of the magneto-optical Kerr microscope system capable of the real-time observation of the domain change.

를 관찰한다. 즉, 샘플의 자화 상태에 따라 반사된 빛의 편광이 달라지는 광자기 Kerr 현상을 이용한 것이다. 광자기 Kerr 현미경 시스템의 대략적인 개요는 Fig. 2와 같다. 광원은 100 W 출력의 고압 수은증기 아크 방전 백열램프(HBO 100)가 사용되며, 출력의 45%가 350~700 nm에 해당하는 파장을 방출한다. 광원에서 방출된 빛은 Polarizer를 지나며 선형 편광 상태가 된 후, 투과율 및 반사율이 50%인 Beam splitter을 통해서 대물렌즈를 지나고 자화된 자성체에서 입사하여 반사하게 된다. 반사된 빛은 Analyzer를 통과하면서 편광 차이에 의한 세기 차이를 발생시킨다. 이러한 빛의 세기 차이는 CCD 카메라를 통해 이미지로 컴퓨터에 저장된다. 저장된 실시간 이미지들은 컴퓨터에 탑재된 Labview 프로그램을 통해 분석되어 자기이력곡선 및 자구벽 속도를 얻을 수 있다. 제작된 전자석은 Power Supply에 연결되어 최대 약 500 Oe 정도의 자기장을 인가할 수 있다.

모든 샘플의 자화역전현상은 새로운 자구 생성률이 높지 않은 심플한 자구벽 운동을 보였다. 나노자성체의 자구벽 속도를 측정하기 위해 광자기 Kerr 현미경 시스템을 이용하여 실시간 자구 이미지들을 측정한다. 일정한 자기장의 세기에 따른 자구벽의 속도를 측정하기 위해 다음과 같은 과정을 거친다. 첫째, 샘플을 반대 방향으로 최대 자기장을 인가하여 자화를 포화 시킨다. 둘째, 짧은 시간(수~수십 ms)의 펄스 형태 자기장을 인가하여 원형 형태의 작은 자구를 생성한다. 셋째, 원형으로 형성된 자구에 일정한 자기장을 인가함으로써 시간에 따른 자구 영역의 변화를 측정하여 자구벽 속도를 측정한다.

### III. 결과 및 고찰

Fig. 3은 자구벽 속도를 측정할 수 있는 광자기 Kerr 현미경 시스템을 이용하여 여러 두께의 반강자성 IrMn 층( $x = 0, 5, 10, 15, 17.5, 20, 22.5, 25 \text{ \AA}$ )을 가진 Co/Ni 다층 박막들의 자기장의 세기에 따른 자구벽 속도 그래프들을 나타낸 것이다. 먼저 IrMn의 두께가 두꺼워짐에 따라 자기장에 따른 자구벽 속도 그래프가 더 큰 자기장 값에 해당하는 오른쪽으로 이동함을 알 수 있다. 이는 IrMn의 두께가 증가함에 따라 반강자성 IrMn 층과 강자성 Co 층 사이의 계면에서 나타나는 특징인 보자력의 증가 때문이다. 흥미롭게도, IrMn의 두께가 22.5 Å일 때부터 오른쪽으로의 이동이 크게 일어남을 알 수 있다. 이는 교환 바이어스된 IrMn 인접한 Co/Ni 다층박막 샘플의 IrMn의 두께에 따른 보자력  $H_c$ 의 변화와 정확하게 일치함을 알 수 있다[11]. 즉, 보자력의 증가는 뚜렷한 교환 바이어스 자기장이 없어도 반강자성 IrMn 층과 강자성 Co층 사이의 계면에 의해 나타날 수 있음을 알



**Fig. 3.** (Color online) (a) The values of the domain wall velocity  $V$  according to the magnetic field  $H$  and (b) the values of the  $\ln V$  as functions of the  $H^{-1/4}$ , observed in the FM CoNi multilayers interfacing with AFM IrMn layer, where the IrMn thickness is increased from 0 Å to 25 Å.

수 있고 이는 다른 반강자성/강자성 시스템의 결과와 아주 잘 일치한다[6].

모든 샘플에서 자구벽 속도  $V$ 가 자기장  $H$ 의 세기에 따라 마치 지수 함수와 같이 크게 증가함을 알 수 있다. 이렇게, 자구벽 속력이 자기장 세기의 지수 함수 형태를 띠는 것은 모든 샘플들의 자구벽 운동이 열적활성화에 의한 자구벽 운동 메커니즘을 따른다는 것을 뜻한다. 특히, 새로운 자구가 생성되지 않고 기존의 자구벽이 이동하는 형태의 자화 역전 현상은 열적 활성화에 의한 자구벽 Creep 운동으로 설명될 수 있다[5]. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 실험 결과를  $\ln V$ 와  $H^{-1/4}$ 의 그래프와 이를 각각 선형 fitting 한 것을 나타낸 것이다. 열적활성화에 의한 자구벽 Creep 운동 모델에 의하면, 온도  $T = 0 \text{ K}$ 이고 자기장  $H$ 가 샘플의 임계 자기장  $H_{cr}$ 보다 작으면 자구벽이 움직이지 않는다. 반면, 유한한 온도  $T > 0 \text{ K}$ 에서는 자기장  $H$ 가 샘플의 임계 자기장  $H_{cr}$ 보다 작아도 불구하고 열에너지의 열적 활성화에 의해 자구벽 Creep 운동이

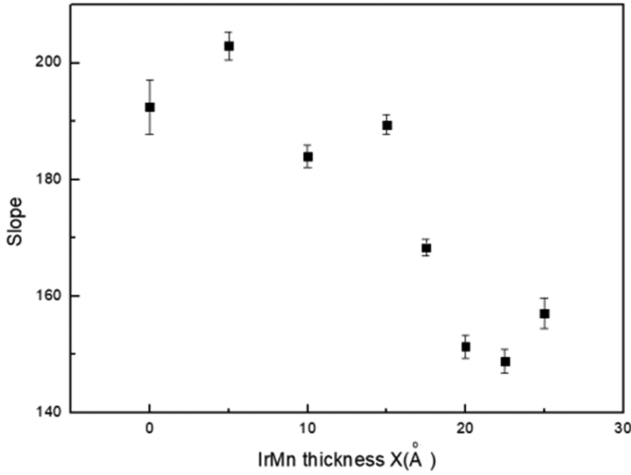


Fig. 4. Change of the slope  $\alpha$  according to the IrMn thickness, obtained from the experimental data of the Fig. 3.

일어나 자기벽이 움직이게 된다. 이때,  $H_{cr}$ 보다 훨씬 큰 자기장 영역에서는 자기벽의 속도가  $H$ 에 비례하는 선형 영역이 존재하고 이를 자기벽의 점성적인 운동이라고 한다. 즉, 유한한 온도  $T > 0$  K이고  $H_{cr}$ 을 포함한 작은 자기장 영역에서 자기벽 속도  $V$ 는 다음과 같은 식을 만족하게 된다[5].

$$V = V_0 \exp \left[ - \frac{U_C}{k_B T} \left( \frac{H_{cr}}{H} \right)^{-1/4} \right]$$

여기서,  $U_C$ 는 자기벽의 pinning 에너지와 관련된 상수이고,  $k_B$ 는 볼츠만 상수이다. 즉, 열적활성화에 의한 자기벽의 Creep 운동을 하는 자기벽의  $\ln V$ 는  $H^{-1/4}$ 에 비례하는 형태를 가진다. Fig. 3(b)와 같이 모든 샘플의 자기벽 이동에서  $\ln V$ 는  $H^{-1/4}$ 이 비례함을 알 수 있었고, 이는 모든 자화 역전 현상이 열적활성화에 의한 자기벽 Creep 운동으로 설명될 수 있음을 말한다. 결론적으로, 반강자성 IrMn 인접한 모든 강자성 Co/Ni 다층 박막에서 IrMn의 두께와 관계없이 자기벽 이동은 열적활성화에 의한 자기벽 Creeping 운동으로 설명될 수 있음을 알 수 있었다.

정량적인 비교를 위해서  $\ln V$ 의  $H^{-1/4}$ 에 대한 기울기  $\alpha$ 를 구하였고, 이는 앞의 이론식에 의해서  $\alpha = - \frac{U_C H_{cr}^{-1/4}}{k_B T}$ 에 해당한다. Fig. 4는 IrMn 두께에 따른 기울기  $\alpha$ 의 변화를 나타낸 것이다. 흥미롭게도, 기울기  $\alpha$ 는 IrMn 두께에 따라 다소 약간 감소하는 경향을 띄지만 아주 큰 변화를 보이지는 않는다. 이는 IrMn 두께에 따른 강자성 Co/Ni 다층박막의 보자력의 큰 증가와 아주 대비된다. 즉, 기울기  $\alpha$ 가  $H_{cr}$ 와 관련이 있다는 것을 고려할 때, 오히려 IrMn 두께에 따라  $\alpha$ 가

큰 변화가 없다는 것은 매우 흥미롭다. 그러나, 장비의 시간 분해능의 한계로 인해 좁은 자기장 영역의 자기벽 속력의 값을 fitting 하였으므로 정확한 분석을 위해서는 넓은 자기장 영역의 자기벽 속력을 측정할 필요가 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 반강자성 IrMn 층과 인접한 수직 자기이방성을 가진 강자성 Co/Ni 다층박막에서의 자기벽 운동을 자기변화를 실시간으로 측정할 수 있는 광자기 현미경 시스템을 이용하여 관찰하였다. 자기장의 크기에 따른 자기벽 운동을 측정한 결과, 반강자성 IrMn 두께가 0 Å에서 25 Å로 커짐에 따라 자기벽을 움직이는데 필요한 자기장의 세기도 점점 커짐을 알 수 있었다. 이는 반강자성 IrMn 층과 강자성 Co/Ni 계면에서 나타나는 보자력의 증가 때문이다. 또한, 자기장의 크기에 따른 자기벽 속력 변화를 분석한 결과, 모든 샘플에서의 자기벽 운동은 자기벽 Creep 운동을 가정한 열적활성화 모델로 잘 설명됨을 알 수 있었다.

#### References

- [1] G. A. Prinz, *Science* **282**, 1660 (1998).
- [2] I. M. Miron, T. Moore, H. Szabolcs, L. D. Buda-Prejbeanu, S. Auffret, B. Rodmacq, S. Pizzini, J. Vogel, M. Bonfim, A. Schuhl, and G. Gaudin, *Nat. Mater.* **10**, 419 (2011).
- [3] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. Parkin, *Nat. Nano* **8**, 527 (2013).
- [4] S. DuttaGupta, S. Fukami, B. Kuerbanjiang, H. Sato, F. Matsukura, V. K. Lazarov, and H. Ohno, *AIP Advances* **7**, 055918 (2017).
- [5] S. Lemerle, J. Ferré, C. Chappert, V. Mathet, T. Giamarchi, and P. Le Doussal, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 849 (1998).
- [6] J. Nogués and I. K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **192**, 203 (1999).
- [7] Ch. Binek, P. Borisov, Xi Chen, A. Hochstrat, S. Sahoo, and W. Kleemann, *Eur. Phys. J. B* **45**, 197 (2005).
- [8] F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3537 (2003).
- [9] C. H. Marrows, *Phys. Rev. B* **68**, 012405 (2003).
- [10] J. Sort, B. Dieny, and J. Nogués, *Phys. Rev. B* **72**, 104412 (2005).
- [11] K.-S. Ryu and S.-H. Yang, *J. Korean Magn. Soc.* **27**, 210 (2017).
- [12] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. S. P. Parkin, *Appl. Phys. Express* **5**, 093006 (2012).
- [13] S.-B. Choe, D.-H. Kim, Y.-C. Cho, H.-J. Jang, K.-S. Ryu, H.-S. Lee, and S.-C. Shin, *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 2910 (2002).