

Perpendicular Exchange Bias of CoNi Multilayers Interfacing with Antiferromagnetic IrMn Layer

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 2 December 2017, Received in final form 12 December 2017, Accepted 12 December 2017)

We report the experimental observation of the perpendicular exchange bias effect in the ferromagnetic CoNi multilayers interfacing with antiferromagnetic IrMn layer. From a hysteresis loop measurement, it was found that as the antiferromagnetic IrMn thickness increases from 5 Å to 40 Å, the hysteresis loop is gradually changed from the symmetric shape to the asymmetric shape shifted by some amount corresponding to the exchange-biased field at the thickness of 20 Å. Also, the domain observation experiment shows that the domain reversals in the increasing and decreasing field regions at the sample with the thickness of 40 Å exhibit the same single domain wall motion even though they have the different coercivities.

Keywords : exchange bias effect, perpendicular exchange bias, hysteresis loop

반강자성 IrMn 층과 인접한 Co/Ni 다층박막의 수직 교환 바이어스

류광수*

한국교육대학교 물리교육과, 충북 청주시 흥덕구 태성탑연로 250, 28173

양시훈

IBM Almaden 연구센터, 미국 캘리포니아 산호세 Harry Road 650, 95120

(2017년 12월 2일 받음, 2017년 12월 12일 최종수정본 받음, 2017년 12월 12일 게재확정)

본 연구에서는 반강자성 IrMn 층과 인접한 강자성 Co/Ni 다층박막에서의 수직 방향 교환 바이어스 효과를 실험적으로 관찰하였다. 자기이력곡선의 측정 결과로부터 반강자성 IrMn 두께가 5 Å에서 40 Å로 증가함에 따라 자기이력곡선이 대칭 모양에서 교환 바이어스 자기장에 해당하는 특정한 양만큼 이동한 비대칭 모양으로 20 Å 두께에서 서서히 나타남을 알 수 있었다. 또한, 자기 관찰 실험으로부터 40 Å 두께를 가진 샘플에서의 증가하는 자기장과 감소하는 자기장 영역에서 자화 역전 현상은 다른 보자력을 가짐에도 불구하고 같은 단일 자구벽 운동을 함을 알 수 있었다.

주제어 : 교환 바이어스 효과, 수직 교환 바이어스, 자기이력곡선

I. 서 론

일반적으로 강자성 박막이 반강자성 박막과 인접해 있을 때, 박막사이 계면에서의 상호작용에 의해 강자성 박막의 자기이력곡선은 일반적인 형태의 대칭 모양이 아니라 한쪽 자기장

방향으로 이동된 비대칭 형태를 띄게 됨이 알려졌다[1]. 이러한 계면에서의 상호작용과 그 현상을 교환 바이어스 효과(exchange bias effect)라고 한다. 또한, 자기이력곡선이 한쪽 자기장방향으로 지우친 정도를 교환 바이어스 자기장 H_E (exchange bias field)이라고 정의하고 이 양을 교환 바이어스 효과의 정도를 측정하는데 사용한다. 교환 바이어스 효과는 강자성의 자기이방성 방향에 따라 크게 수평 교환 바이어스와 수직 교환 바이어스로 분류된다. 교환 바이어스에 대

한 대부분의 연구들은 수평 교환 바이어스에서 이루어 졌는데, 최근 수직 교환 바이어스의 발견 이후 교환 바이어스 현상에 새로운 현상이해과 스핀 소자로의 응용가능성으로 인해 새로운 관심을 받고 있다[2].

지금까지 수직 교환 바이어스 효과를 보이는 대부분의 강자성/반강자성 구조에서 강자성 물질은 주로 강한 수직 자기 이방성을 가지는 Co/Pd 다층박막과 Co/Pt 다층박막 등이 사용되었고, 반강자성 물질로는 CoO[2-4], FeMn[5-8], IrMn[9-11], 혹은 FeF₂와 FeCl₂[12, 13] 같은 반강자성 화합물이 사용되었다. 그리고 수평 교환 바이어스 구조에서 관측된 비대칭 자화역전현상이 수직 교환 바이어스 구조에서도 관측되어 자화역전현상에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있고[14], 이를 통해 교환 바이어스 현상에 대한 이해의 폭을 점점 넓혀가고 있다. 특히, 교환 바이어스 현상의 결과 값으로 알려진 교환 바이어스 자기장 H_E 과 보자력 H_C 의 변화 특성은 강자성/반강자성 계면으로부터 나오는 단방향의 비등방성뿐 아니라 강자성/반강자성 자구벽의 복잡한 상호작용에 기인하는 것으로 알려져 있다. 한편, Co/Ni 다층박막은 다른 Co/Pd, Co/Pt 다층박막들과 비교하여 다소 작은 보자력을 가지고 있고 자구벽 이동성향이 강한 물질로 전류 유도 스핀동역학에 많이 사용되고 있다[15, 16]. 그럼에도 불구하고, Co-Ni 합금 박막[17]을 제외하고 Co와 Ni을 기초로 한 박막구조에서 수직 교환 바이어스를 보고한 실험 결과가 없다. 본 논문에서는 강자성 Co/Ni 다층박막과 반강자성 IrMn 층을 결합한 구조에서 수직 교환 바이어스 효과를 실험적 결과로부터 최초로 확인하였다. 이 새로운 교환바이어스 시스템의 특성을 조사하기 위해서 반강자성 IrMn의 두께를 5 Å에서 40 Å까지 변화시킨 샘플을 제작하였고, 광자기 자력계를 이용하여 각각의 자기이력곡선을 측정하였다. 또한, 광자기 현미경을 이용하여 교환 바이어스된 샘플에서 증가하는 자기장 영역과 감소하는 자기장 영역에서의 자화역전패턴을 측정하여 자화역전현상을 조사하였다.

II. 실험 방법

실험에 사용된 샘플들은 dc magnetron sputtering 방법을 이용하여 비정질 SiO₂이 입혀진 Si(100) 기판위에 증착되었다. 샘플들의 세부적인 구조는 20 Å TaN/15 Å Pt/3 Å Co/[7 Å Ni/1.5 Å Co]_x/x Å IrMn/20 Å TaN이다(Fig. 1(a)). 교환 바이어스 구조에서 Pt를 포함한 Co/Ni 다층박막은 강한 수직 자기 이방성을 가지는 강자성 물질 역할을 하고, 그 위에 증착된 IrMn은 반강자성 물질 역할을 한다. 위아래 층에 증착된 TaN은 Capping 층의 역할을 한다. 이제 막 제작된 Co/Ni 다층박막/IrMn 샘플과 제작 후 270 °C에서 자기장

cooling 과정을 거친 샘플의 자기이력곡선을 비교한 결과 보자력 H_C 과 교환 바이어스 자기장 H_E 에서 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 sputtering 증착 과정 동안에 chamber 내 샘플 주위에 존재하는 자기장이 자기장 cooling 과정과 같은 영향을 주는 것으로 예상된다. 이러한 이유로 증착 후 샘플에 교환 바이어스를 주기위한 자기장 cooling 과정을 따로 수행하지 않았다. 자기장 cooling 과정을 수행하지 않아도 특정한 반강자성 IrMn 두께에서 교환 바이어스 효과를 확인 할 수 있었다.

샘플의 자기이력곡선을 측정하기 위해서 polar 광자기 자력계를 사용하였다. 또한, 자기이력곡선에서 증가하는 자기장과 감소하는 자기장 영역에서 자기장이 변함에 따른 실시간 자구역전이미지를 측정하기 위해 광자기 현미경을 사용하였다[15, 18]. 기본적으로 광자기 자력계와 광자기 현미경은 샘플의 자화상태에 따라 다르게 발생하는 광자기 Kerr 현상을 이용한 것이다. 기본적인 차이로는 광자기 자력계는 조사된 샘플 영역에서 나오는 총 광자기 세기를 측정하는 반면, 광자기 현미경은 광자기 세기의 공간적인 분포를 이미지로 측정하는 것이다. 관찰된 이미지는 실시간 영상처리 시스템을 통해 컴퓨터에 contrast가 좋은 다른 이미지로 저장된다.

III. 결과 및 고찰

수직 광자기 Kerr 자력계를 이용하여 여러 두께의 반강자성 IrMn 층을 가진 Co/Ni 다층 박막들의 자기이력곡선을 측정하였다. Fig. 1(b)는 IrMn 두께 $x = 40$ Å를 가진 샘플의 자기이력곡선을 나타낸 것이다. 광자기 세기에 해당하는 Kerr 각은 자성체의 자화값 M 에 거의 비례한다. 그러므로 Kerr θ 도 포화된 자화(saturated magnetization) M_S 에 해당하는 θ_s 가 존재하기 때문에 편의상 규격화한(normalized Kerr angle) θ/θ_s 를 계산하여 표시하였다. 일반적인 강자성 박막에서 나오는 대칭적인 자기이력곡선을 보이는 것이 아니라, 자기이력곡선의 중심이 원점으로부터 이동한 비대칭 자기이력곡선을 보임을 알 수 있다. 이는 강자성에 해당하는 Co/Ni 층과 반강자성에 해당하는 IrMn 층이 계면사이에서 교환 상호작용이 발생하여 샘플에 수직의 단방향으로 비등방성(unidirectional anisotropy)을 만들기 때문이다[1]. 이렇게 생성된 단방향의 비등방성은 자기이력곡선에서 자기장 인가 방향에 따라 Fig. 1(b)에서처럼 서로 다른 보자력을 나타내게 된다. 교환상호작용을 나타내는 반강자성/자성 박막의 특성을 조사하기 위해서는 보자력 H_C 과 교환 바이어스 자기장 H_E 를 측정해야한다. 특히, 교환 바이어스 자기장 H_E 은 강자성과 반강자성사이의 교환상호작용의 정도를 나타내는 중요한 양이다. $x = 40$ Å의 두께를 가진 샘플의 보자력 H_C 과 교환 바이어스 자기장 H_E

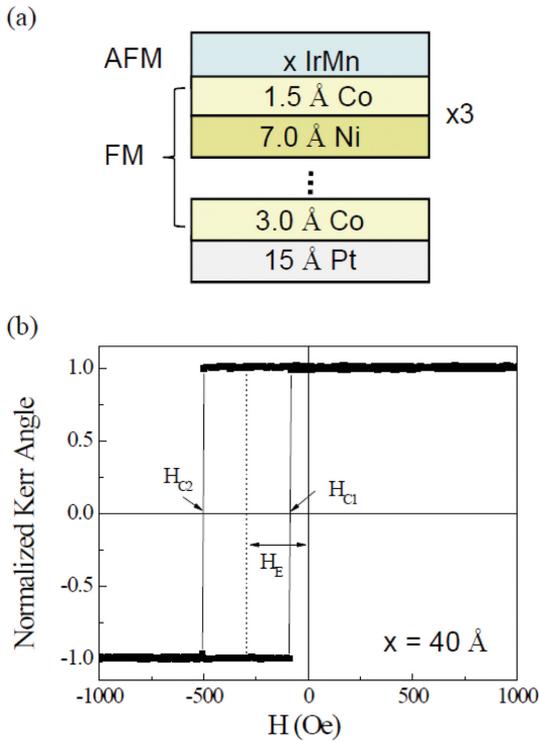


Fig. 1. (Color online) (a) Schematic diagram of the detailed sample structure basically consisting of the antiferromagnetic (AFM) IrMn layer and the ferromagnetic (FM) Co/Ni multilayers which causes the perpendicular bias effect. (b) Typical Kerr hysteresis loop of the sample with the IrMn thickness of 40 Å exhibiting the exchange bias effect. Here, H_{C1} and H_{C2} correspond to the coercivities in the increasing and the decreasing field parts, respectively. Also, H_E is the exchange-biased field.

의 값은 각각 $H_C = 210 \pm 5$ Oe, $H_E = 290 \pm 5$ Oe이었다. 이 값들은 $H_C = (H_{C1} - H_{C2})/2$ 과 $H_E = -(H_{C1} + H_{C2})/2$ 의 관계식으로부터 구해졌다. 여기서 H_{C1} 과 H_{C2} 는 Fig. 1(b)와 같이 각각 증가하는 자기장 부분과 감소하는 자기장 부분에서 측정된 값이다. 즉, $x = 40$ Å 두께의 반강자성 IrMn 층과 Co/Ni 다층박막으로 이루어진 구조는 H_E 값이 H_C 값보다 큰 것으로 보아, 상당히 강한 교환상호작용을 보임을 알 수 있다. 또한, $x = 40$ Å 두께에서의 H_E 의 값은 IrMn을 반강자성 층으로 이용한 Co/Pt 다층박막의 H_E 의 최대값 ~ 100 Oe와 비교하여도 상당히 큰 값을 알 수 있다[10, 11].

반강자성 IrMn 층과 Co/Ni 다층 박막으로 이루어진 교환 바이어스 시스템의 특징을 자세히 조사하기 위해서 추가적으로 5 Å에서부터 40 Å까지 반강자성 IrMn 두께를 변화시킨 여러 샘플들을 제작하고 각각의 자기이력곡선을 측정하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 반강자성 IrMn 두께가 변환에 따라서 다른 자기이력곡선을 나타냄을 알 수 있다. 먼저 샘플들의 자기이력곡선은 모두 완벽한 직사각형 모양을 나타냄을 알 수 있다. 이는 강자성 Co/Ni 다층박막에 반강자성 IrMn 층을 결합하여도 수직 자기 이방성 특징을 잘 유지 한다는 것을 말한다. 그리고 흥미롭게도 반강자성 IrMn의 두께가 증가함에 따라 자기이력곡선의 중심 위치가 원점에 가까워 있다가 20 Å 두께부터 왼쪽으로 점점 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 교환 바이어스 효과가 20 Å 두께부터 점점 나타나는 것을 말한다.

정량적인 분석을 위해서 정확한 보자력 H_C 과 교환 바이어

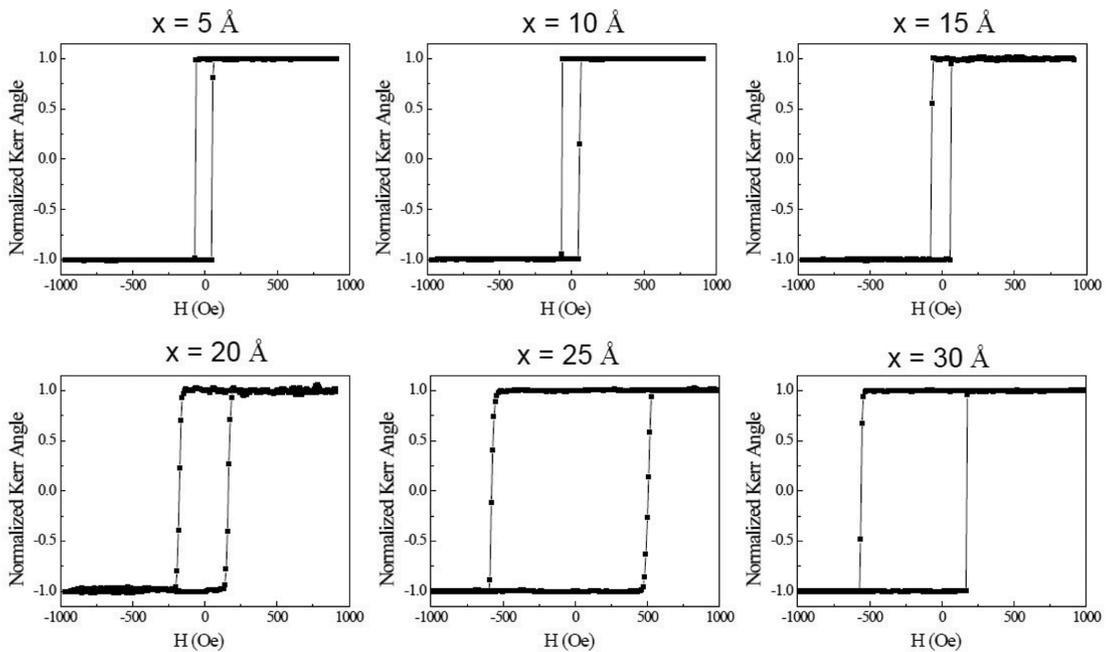


Fig. 2. Various Kerr hysteresis loops of the samples with the IrMn thicknesses varying from 5 to 35 Å.

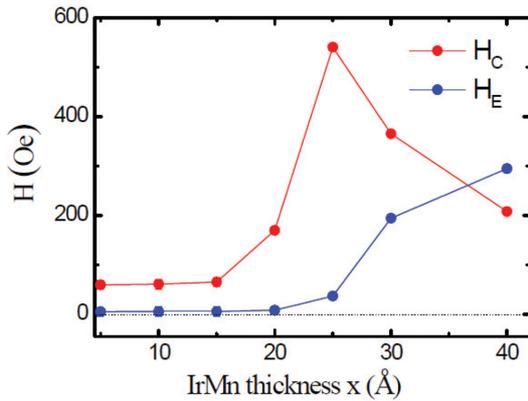


Fig. 3. (Color online) Dependence of the coercivity H_C and the exchange-biased field H_E as a function of the AFM IrMn thickness, respectively. Here, the values of H_C and H_E were obtained using relations of $H_C = (H_{C1} - H_{C2})/2$ and $H_E = -(H_{C1} + H_{C2})/2$, respectively.

스 자기장 H_E 의 값을 앞부분에서 사용한 관계식을 이용하여 계산하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 IrMn 두께가 증가함에 따라 교환 바이어스 자기장 H_E 의 값이 5~15 Å의 두께에서는 거의 제로에 가까운 값으로 변함이 없다가 20 Å 두께부터 점점 증가하기 시작한다. 그리고 40 Å 이상인 어느 특정한 두께부터는 일정한 값으로 유지될 것이라 예측하는데, 이는 교환 바이어스 된 강자성/반강자성 구조에서 나타나는 반강자성 두께에 따른 교환 바이어스 자기장의 일반적인 변화 특성으로써 유효 두께에 해당하는 반강자성체만 교환 바이어스 효과에 영향을 주는 것을 말한다[1]. 실제로, 보다 두꺼운 $[Co/Ni]_{x5}$ 다층박막에서 살펴본 결과 대략 ~50 Å부터 교환 바이어스 자기장 H_E 가 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 한편, 보자력 H_C 은 15 Å에서부터 25 Å 두께까지 크게 증가하다가 25 Å 두께부터는 점점 감소하기 시작한다. 교환 바이어스의 증가와 함께 나타나는 보자력의 특이한 변화 특성은 교환 바이어스된 시스템의 일반적인 특징으로써 반강자성/강자성 계면에서의 나타나는 반강자성 자구와 강자성 자구와의 복잡한 상호작용에 기인한다고 알려져 있다[1].

그러나, 다른 수직 교환 바이어스를 보이는 Co/Pt 다층박막/IrMn 층에서는 반강자성 두께에 대한 보자력 H_C 의 변화특성이 Co/Ni 다층박막의 경우와는 달리 교환 바이어스 자기장 H_E 의 변화특성과 같이 동일하게 증가하다가 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다[10]. 즉, Co/Pt 다층박막/IrMn 층 구조에서의 강자성/반강자성 자구벽 상호작용은 교환 바이어스 효과와 동일한 두께에서 일어나는데 반해 Co/Ni 다층박막/IrMn 층 구조에서는 교환 바이어스 효과가 최대가 되는 두께보다 작은 두께에서 강자성/반강자성 자구벽 상호작용이 최대가 됨을 말한다. 이러한 차이는 Co/Ni 다층박막의 자화역전현상의 보자력 H_C 이 Co/Pt 다층박막의 자화역전현상 보다 강자성/반

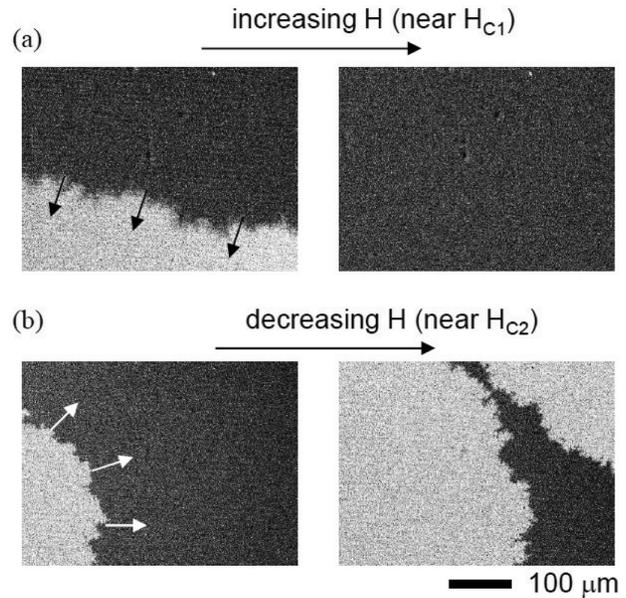


Fig. 4. Domain revolution patterns with increasing H near the strength of H_{C1} (a) and with increasing H near the strength of H_{C1} (b), respectively. Here, the black and white colors represent the different magnetization directions, respectively.

강자성 계면에 훨씬 더 민감하게 반응하기 때문이라 생각한다. 그러한 이유로, Co/Ni 다층박막의 자화역전현상을 Co/Pt 다층박막과 비교하기 위해서 비대칭 자기이력곡선을 보이는 교환 바이어스된 샘플에서의 자구 역전 패턴을 측정하였다. IrMn 두께 $x = 40$ Å를 가진 샘플의 자기이력곡선에서 각각 서로 다른 보자력 H_{C1} 과 H_{C2} 를 가진 증가하는 자기장 영역과 감소하는 자기장 영역에서 자기장 증가에 따른 실시간 자구역전영상을 측정하였다. Fig. 4에서와 같이 비대칭 자기이력곡선의 서로 다른 자기장 H_{C1} 과 H_{C2} 영역에서 자화역전현상은 둘 다 자구벽 운동 경향이 보임을 알 수 있었고, 보자력의 차이 말고는 자구 역전 현상에서의 뚜렷한 차이를 볼 수는 없었다. 모든 두께의 샘플에서도 마찬가지로 양쪽 자기장 영역에서 단일 자구벽 이동이 보임을 확인하였다. 반면, Co/Pt 다층박막의 경우 양쪽 자기장영역에서 완전히 다른 자구벽 핵생성 성향과 자구벽 이동성 성향을 보임을 알 수 있다[12]. 다시 말해서, Co/Ni 다층박막의 경우 자구역전현상은 양쪽 다 자구벽 이동성향으로써 교환 바이어스에 의한 비대칭 등방성 특성보다는 계면에서의 복잡한 강자성/반강자성 자구벽의 상호작용이 중요하다고 추측된다. 양쪽 다 자구벽 이동성향을 보이는 교환 바이어스 시스템의 보다 자세한 연구를 위해서는 일정한 자기장에서의 실시간 자구 역전 패턴을 조사하는 것이 필요하다고 생각한다. 즉 양쪽 자기장 영역에서의 단일 자구벽의 pinning 메커니즘에 대한 세밀한 차이를 조사해야 한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 수직 자기이방성을 가진 강자성 Co/Ni 다층 박막에 반강자성 IrMn 층을 증착한 새로운 교환 바이어스 구조를 제작하였고, 자기이력곡선을 측정하여 교환 바이어스 구조에서만 나타나는 교환 바이어스 자기장 H_E 와 보자력 H_C 의 변화 특성들을 확인하였다. 특히, 반강자성 IrMn 두께가 5 Å 에서 40 Å로 증가함에 따라 20 Å 두께에서부터 교환 바이어스 효과가 나타나기 시작하였고, 40 Å 두께까지 그 효과가 계속해서 증가하였다. 추가적으로, 교환 바이어스 샘플에서 증가하는 자기장과 감소하는 자기장 영역에서 눈에 띄는 자구 역전 패턴의 차이는 보이지 않았다.

References

- [1] J. Nogués and I. K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **192**, 203 (1999).
- [2] S. Maat, K. Takano, S. S. P. Parkin, and E. E. Fullerton, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 087202 (2001).
- [3] T. L. Kirk, O. Hellwig, and E. E. Fullerton, *Phys. Rev. B* **65**, 224426 (2002).
- [4] P. Kappenberger, S. Martin, Y. Pellmont, H. J. Hug, J. B. Kortright, O. Hellwig, and E. E. Fullerton, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 267202 (2003).
- [5] F. Garcia, G. Casali, S. Auffret, B. Rodmacq, and B. Dieny, *J. Appl. Phys.* **91**, 6905 (2002).
- [6] J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1800 (2003).
- [7] F. Garcia, J. Sort, B. Rodmacq, S. Auffret, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3537 (2003).
- [8] C. H. Marrows, *Phys. Rev. B* **68**, 012405 (2003).
- [9] S. van Dijken, J. Moritz, and J. M. D. Coey, *J. Appl. Phys.* **97**, 063907 (2005).
- [10] J. Sort, B. Dieny, and J. Nogués, *Phys. Rev. B* **72**, 104412 (2005).
- [11] F. Romanens, S. Pizzini, F. Yokaichiya, M. Bonfim, Y. Penneec, J. Camarero, J. Vogel, J. Sort, F. Garcia, B. Rodmaq, and B. Dieny, *Phys. Rev. B* **72**, 134410 (2005).
- [12] M. Czapkiewicz, T. Stobiecki, and S. van Dijken, *Phys. Rev. B* **77**, 024416 (2008).
- [13] B. Kagerer, Ch. Binek, and W. Kleemann, *J. Magn. Magn. Mater.* **217**, 139 (2000).
- [14] Ch. Binek, P. Borisov, Xi Chen, A. Hochstrat, S. Sahoo, and W. Kleemann, *Eur. Phys. J. B* **45**, 197 (2005).
- [15] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. S. P. Parkin, *Appl. Phys. Express* **5**, 093006 (2012).
- [16] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. S. P. Parkin, *Nat. Nanotech.* **8**, 527 (2013).
- [17] S. M. Zhou and C. L. Chien, *Phys. Rev. B* **63**, 104406 (2001).
- [18] 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).