

NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr 다층박막의 자기변형과 응력에 관한 연구

조순철*

송실대학교 정보통신전자공학부, 서울시 동작구 상도동 511번지, 156-743

(2010년 1월 13일 받음, 2010년 2월 12일 최종수정본 받음, 2010년 2월 16일 게재확정)

NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr 다층박막의 자기변형과 응력에 관하여 연구하였다. Cu 15 Å/CoFe 15 Å 이중층의 수가 증가할수록 포화자기변형상수가 2층에서 -5.6×10^{-6} 로부터 20층에서 -8.5×10^{-6} 으로 감소하였다. CoFe층의 두께가 10에서 20 Å으로 증가되었을 때 포화자기변형상수의 크기가 약 1×10^{-6} 만큼 감소하였다. Cu 15 Å/CoFe 15 Å 이중층의 층수가 2에서 20으로 증가 되었을때 다층박막의 인장응력의 크기가 980 MPa에서 590 MPa로 감소하였다. 자기변형과 박막의 응력으로부터 형성될 수 있는 최대 자기변형이방성자장은 Cu 15 Å/CoFe 15 Å 이중층의 수가 10일 때 135.7 Oe 이었다.

주제어 : 자기변형, 응력, Cu/CoFe 다층박막, 자기변형이방성

I. 서 론

Cu/Co₉₀Fe₁₀ 다층박막은 수직자기기록장치용 재생헤드에서의 응용[1]을 위해 연구되어 왔으며 자기센서로서의 응용이 기대되고 있다. 현재까지 여러 종류의 자기다층박막의 기본적인 물성 연구는 많이 진행되어 왔으나 Cu/Co₉₀Fe₁₀ 다층박막의 자기변형과 응력에 관한 연구는 그다지 많이 연구되어 오지 않았다. Fe₅₀Co₅₀/Ag 다층박막의 미세구조와 자기탄성에 관한 연구[2], Co/Pd 다층박막의 자기변형과 응력에 관한 연구[3], 여러 가지 종류의 상하층 사이에 낀 NiFe 와 CoFe 박막에 관한 연구, Ta을 하지층(underlayer)과 보호층(capping layer)으로 사용한 Ta/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/Ta 다층박막의 자기변형과 응력에 관한 연구 등이 진행되어 왔다[4-8]. 이로부터 박막의 두께가 200 Å 이하이면 박막 경계면의 자기변형이 NiFe와 CoFe 박막의 자기변형에 큰 영향을 미치며 박막 경계면에서 비자성층(magnetic dead layer)이 상당히 많이 형성됨을 알게 되었다. 따라서 하지층과 상부 보호층에 따른 다층박막의 포화자기변형상수의 변화를 예상할 수 있다. 스핀밸브의 자유층(free layer)으로 사용된 CoFe층의 연구로부터 CoFe 박막이 아주 얇을 때 박막의 기계적인 변형이 포화자기변형상수에 주로 영향을 미침이 보고 되었고[9], 나노산화막을 갖는 CoFe 자유층의 연구로부터 박막의 표면 거칠기 보다는 박막의 구조가 포화자기변형상수 변화에 직접적인 영향을 미친다는 결과가 보고되었다[10].

본 연구에서는 NiFeCr을 하지층과 보호층으로 사용한 NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr 다층박막의 자기변형과 응

력을 Cu/CoFe 이중층의 개수와 CoFe 층의 두께를 변화시키면서 연구하였다.

II. 실험방법

NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr 다층박막을 DC 스퍼터링 방법으로 증착 하였다. 초기 진공도는 2×10^{-9} Torr 이었으며 증착 중 아르곤 압력은 1×10^{-3} Torr 이었다. 박막제조에 사용된 기판은 3,000 Å의 SiO₂ 층을 가진 Si(001) 이었다. 박막증착 중 자기이방성을 형성하기 위해 영구자석을 사용하여 80 Oe의 dc 자기장을 인가하였다. CoFe 박막의 두께는 10에서 20 Å까지 변화시켰으며 Cu/Co₉₀Fe₁₀ 층수는 2에서 20까지 변화시켰다. 모든 시편은 열처리 공정을 거치지 않았다.

모든 박막은 광자기 커(Kerr) 자력계와 B-H 루프 트레이서(loop tracer)를 사용하여 자기적 특성이 측정되었다. 박막의 응력은 응력측정기로 측정했으며, 자기변형은 캔티레버(cantilever) 자기변형측정기로 측정하였다. 본 실험에 사용된 자기변형측정기는 이미 알려진 포화자기변형상수를 갖는 표준시편(Ni)의 변위와 측정시편의 변위를 비교하여 포화자기변형상수를 측정하며, 자세한 측정원리는 참고문헌에 기술되어 있다[11]. 사용된 시편은 0.5 mm 두께의 Si 기판에 박막을 증착한 후 38 mm × 6 mm 크기로 절단하여 사용하였다.

Cu/Co₉₀Fe₁₀ 다층박막은 CoFe 층과 Cu층 간의 강한 반자성결합 때문에 Cu 두께에 따라 수백 Oe의 포화자기장을 갖는다. 그러나 실험에 사용된 자기변형측정기의 최대인가자장은 50 Oe 이었으므로, 주로 박막의 포화자기장이 50 Oe 이하가 되는 약한 층간자기결합(interlayer magnetic coupling)을 갖는 Cu 두께를 선정하여 박막을 제조하였다.

*Tel: (02) 820-0636, E-mail: jschul@ssu.ac.kr

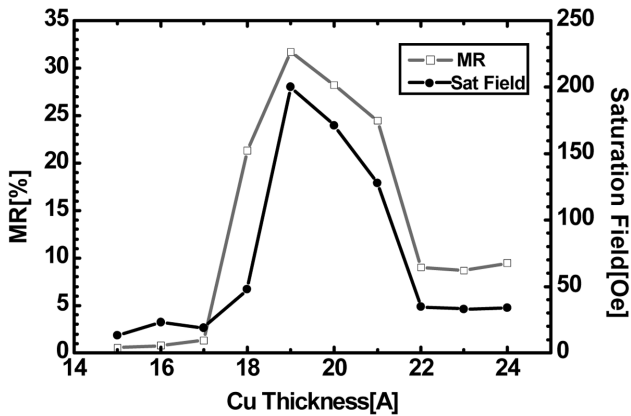


Fig. 1. GMR and saturation magnetic field of NiFeCr 55 Å/(Cu/CoFe 15 Å) × 10/NiFeCr 55 Å multilayer films.

III. 실험결과 및 고찰

Cu/Co₉₀Fe₁₀ 다층박막은 Cu 사이층(spacer)의 두께에 따라 CoFe 층들 사이의 반강자성 결합이 크게 변화한다. 따라서 포화자기장이 이에 따라 크게 변화한다. Fig. 1은 NiFeCr 55 Å/(Cu/Co₉₀Fe₁₀ 15 Å) × 10/NiFeCr 55 Å 다층박막의 GMR(Giant Magnetoresistance Ratio)과 포화자기장을 Cu 사이층 두께의 함수로 측정한 결과이다.

포화자기장과 GMR이 비슷한 변화를 보임을 알 수 있다. 최대 GMR을 나타내는 Cu층 두께 19 Å에서는 높은 포화자기장(200 Oe) 때문에 포화자기변형상수를 직접 측정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 포화자기장이 작은(10 Oe) Cu층 두께 15 Å인 박막을 사용하여 실험하였다. 이렇게 측정된 값은 Ta을 하지층과 보호층으로 사용한 Cu/CoFe 다층박막의 경우와 비슷한 결과를 나타낸다고 가정하면, Cu층 두께 19 Å인 다층박막에 비해 포화자기변형상수는 약 5%, 응력은 약 10% 정도 증감이 있으리라 예상된다[8].

NiFeCr/Cu/CoFe, CoFe/Cu, Cu/CoFe, CoFe/NiFeCr 다층박막의 층간 계면에 형성되는 비자성층(magnetic dead layer)은 유효 CoFe층 두께를 감소시키며 실제 자기변형상수는 측정된 값보다 크게 된다. 이것은 측정된 자기변형상수는 자기층의 총 두께에 반비례하기 때문이다[11]. NiFeCr/Cu/CoFe과 CoFe/NiFeCr 계면에서의 비자성층의 두께는 Fig. 2와 같이 Cu 15 Å/Co₉₀Fe₁₀ 이중층의 층수의 함수로 그려진 NiFeCr 55 Å/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × 10/NiFeCr 55 Å 다층박막의 포화자속(B_s)으로부터 구해진다.

CoFe층의 두께는 10, 15, 20 Å으로 변화시켰다. B_s는 Cu/CoFe 이중층의 층수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며 이로부터 각 층의 비자성층의 두께는 이중층의 층수와는 무관하게 동일함을 알 수 있다. Fig. 2의 직선들의 외삽선을 그

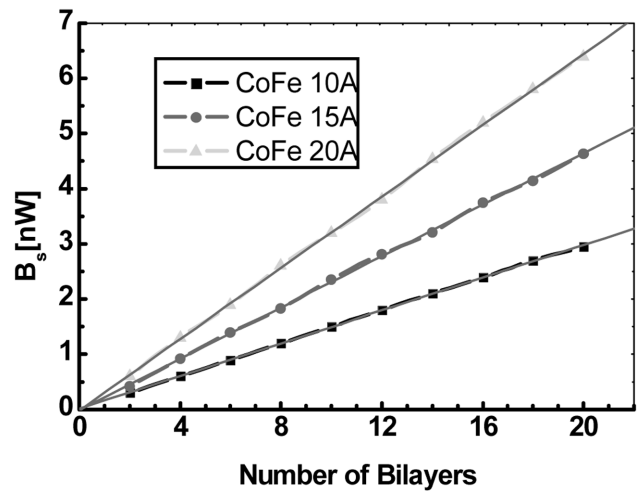


Fig. 2. Saturation magnetic flux B_s vs the number of Cu 15 Å/CoFe bilayers for NiFeCr 55 Å/(Cu 15 Å/CoFe) × N/NiFeCr 55 Å films. The thickness of CoFe is varied: 10, 15, 20 Å.

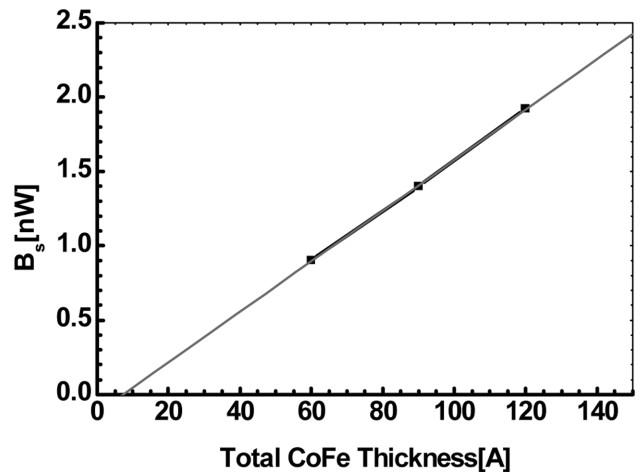


Fig. 3. Saturation magnetic flux B_s vs total CoFe thickness for NiFeCo 55 Å/(Cu 15 Å/CoFe) × 6/NiFeCo 55 Å multilayer films. The thickness of CoFe is varied: 10, 15, 20 Å.

리면 이들 직선들은 모두 원점을 지나며 이것은 하지층인 NiFeCr/Cu/CoFe층과 보호층인 CoFe/NiFeCr층의 계면에서의 비자성층 두께는 Cu/CoFe/Cu 계면에서의 비자성층 두께와 동일함을 나타낸다. 이는 Ta를 하지층과 보호층으로 사용했을 때 훨씬 두꺼운 비자성층을 생성한 것과 대비된다[8].

CoFe/Cu/CoFe층의 계면에서의 비자성층의 두께는 CoFe 층의 B_s와 CoFe 두께와의 그래프로 부터 구해진다[7]. Fig. 3은 Fig. 2로부터 구해지며 6개의 Cu/CoFe 이중층을 갖는 3개의 다층박막의 포화자속밀도를 CoFe층 두께의 함수로 나타낸 것이다.

여기서 6개의 Cu/CoFe 이중층을 갖는 3개의 다층박막의 각층 CoFe 두께는 10, 15, 20 Å이며, 총 CoFe 두께는 각

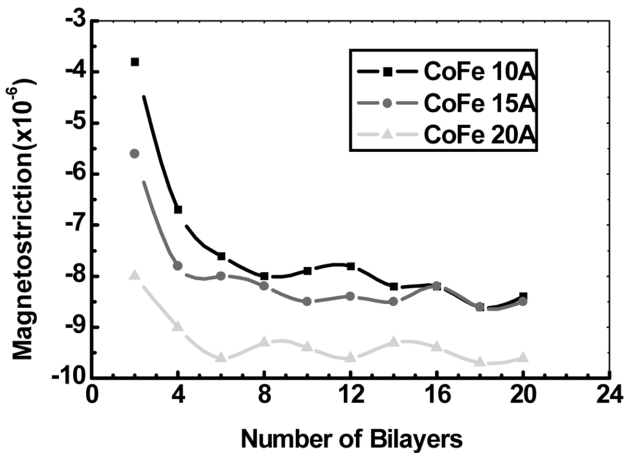
각 60, 90, 120 Å이다. 포화자속밀도와 CoFe 두께는 선형적인 관계를 가지며, 외삽선을 그려 수평축과의 교점(8 Å)을 구하면 그것이 총 비자성층의 두께가 된다. 하지층 NiFeCr/Cu/CoFe와 보호층 CoFe/NiFeCr 계면에서의 비자성층 두께는 Fig. 2에서 거의 Cu/CoFe/Cu 계면에서의 비자성층 두께와 동일함으로, 단일 CoFe/Cu/CoFe 계면에서의 비자성층의 두께는 8 Å/6 = 1.33 Å이다.

NiFeCr 55 Å/(Cu 15 Å/Co₉₀Fe₁₀) × 10/NiFeCr 55 Å 다층박막의 Cu/CoFe 이중층의 층수에 따른 포화자기변형상수가 Fig. 4(a)에 그려져 있다.

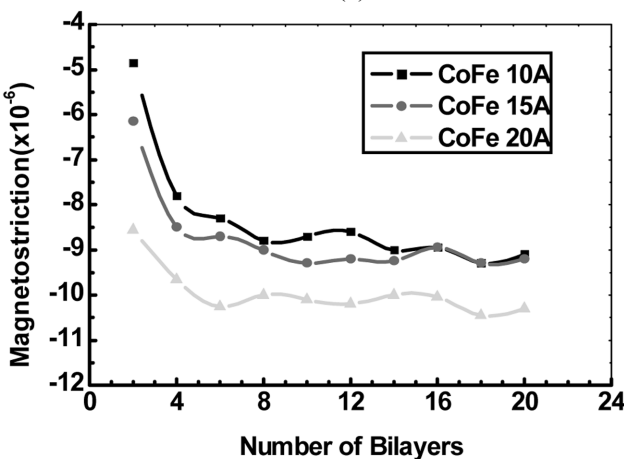
이중층 층수는 2에서 20까지 2층씩 증가시켰다. CoFe층의 두께는 10, 15, 20 Å이었다. CoFe 두께와 포화자기변형상수와의 관계는 CoFe층의 두께가 증가함에 따라 포화자기변형

상수의 크기가 증가함을 보여준다. 이중층의 층수가 10일 때를 살펴보면 CoFe 두께 10 Å에서 -7.9×10^{-6} , 15 Å에서 -8.5×10^{-6} , 20 Å에서 -9.4×10^{-6} 이다. 이러한 변화는 Néel의 모델 [5, 7, 9]을 따르지 않는다. CoFe의 포화자기변형상수는 CoFe의 두께가 50 Å 이하일 때는 Néel의 모델을 따르지 않으며, 하지층의 종류에 따라 그 값이 달라짐이 보고되고 있다[7, 9]. 그 이유는 이정도 두께의 CoFe는 계면과 벌크 층의 구분이 존재하지 않으며, 모두 계면층으로 구성되어 있다고 생각되어 진다. 따라서 계면층과 박막 내부 벌크층의 구분이 전제되는 Néel의 모델은 CoFe층이 두꺼운 경우에는 성립되나 매우 얇은 박막의 경우는 성립하지 않는다. H. Fukuzawa 등은 CoFe 박막 전체가 하지층에 의해 변형되어 있다는 가정을 하여 수십 Å 두께의 CoFe 박막의 포화자기변형상수를 설명하였다[9]. 본 실험에서 연구한 박막도 이러한 두께에 해당하며, CoFe 박막이 NiFeCr과 Cu층에 의해 변형되어 있으며 그 정도에 따라 포화자기변형상수가 변화한다고 사료된다. 이러한 이유는 200 Å 두께의 CoFe 박막 포화자기변형상수 (-5×10^{-6} 정도)보다 상당히 큰 포화자기변형상수를 갖고 있는 현상을 설명한다.

포화자기변형상수는 CoFe층의 두께가 15 Å 일때 이중층 2층에서 -5.6×10^{-6} 로부터 이중층 20층에서 -8.5×10^{-6} 으로 감소하였으며, 이중층 10층 에서 포화값에 도달하였다. 변화의 추세는 다른 CoFe 두께를 갖는 박막에서도 마찬가지로였다. 이중층의 층수 증가에 따른 포화자기변형상수의 변화는 다음과 같이 설명 되어질 수 있다. 적은 층수(6 이하)의 Cu/CoFe 층을 갖는 경우에는 하지층NiFeCr/Cu/(CoFe) 과 보호층 (CoFe)/NiFeCr의 영향이 커서 다층박막 전체의 포화자기 변형상수를 증가(크기는 감소)시킨다. 그러나 이중층의 개수가 증가함에 따라 하지층과 보호층의 영향은 감소하며 포화



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Saturation magnetostriction as a function of the number of bilayers for NiFeCr 55 Å/(Cu 15 Å/CoFe) × N/NiFeCr 55 Å films and (b) saturation magnetostriction compensated for magnetic dead layers for films in (a). The thickness of the CoFe layer is varied from 10 to 20 Å.

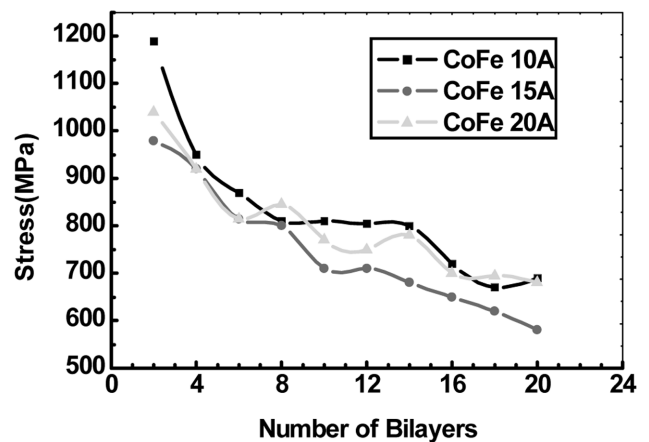


Fig. 5. Film stress vs. the number of bilayers for NiFeCr 55 Å/(Cu 15 Å/CoFe) × N/NiFeCr 55 Å films. The thickness of CoFe layer is varied from 10 to 20 Å.

자기변형상수의 크기는 Cu/CoFe 층의 값으로 증가한다.

비자성층을 고려한 자기변형상수 값이 Fig. 4(b)에 나타내져 있으며 비자성층을 고려하지 않은 경우와 비교해 0.7~1.2 × 10⁻⁶ 만큼 감소됨을 보여 준다.

포화자기변형상수는, 20층의 20 Å CoFe 두께를 갖는 박막의 경우 -10.5 × 10⁻⁶이었다. 이 값은 200 Å 두께의 CoFe 포화자기변형상수 값인 -5.6 × 10⁻⁶ 보다 상당히 작은 값이다.

NiFeCr 55 Å/(Cu 15 Å/Co₉₀Fe₁₀) × 10/NiFeCr 55 Å 다층박막의 Cu/CoFe 이중층의 개수의 함수로의 응력 변화가 Fig. 5에 나타내어져 있다.

CoFe층의 두께는 10, 15, 20 Å이었다. 이 그래프 들로부터 CoFe 층의 두께가 15 Å인 경우 인장응력이 이중층의 개수가 2에 20으로 증가함에 따라 980 MPa로 부터 590 MPa로 감소함을 알 수 있다. CoFe층의 두께가 10, 20 Å인 경우에도 이중층이 개수가 증가함에 따라 인장인력이 감소하였다. 이러한 박막 인장응력의 변화는 하지층 NiFeCr/Cu/CoFe과 보호층 CoFe/NiFeCr 계면에서의 응력이 상당히 큰 인장응력 임을 나타낸다. 이중층의 개수가 증가함에 따라 NiFeCr층 계면의 영향은 감소하며 인장응력의 크기는 Cu/CoFe/Cu층의 인장응력에 가까운 값으로 감소한다.

소자제조 과정에서 특정방향의 응력제거(stress relief)가 일어 날 수 있으며 그 결과 이방성 응력과 이방성자기변형이 초래될 수 있다. 그 결과 형성 될 수 있는 최대 자기변형 이방성자장은 다음 식과 같이 계산된다.

$$\Delta H_k = 3\lambda_s \Delta\sigma / M_s, \quad (1)$$

여기서 ΔH_k 는 자기변형에 의한 이방성자장이며 λ_s 는 포화자기변형상수, $\Delta\sigma$ 는 이방성응력의 차이이고, M_s 는 Co₉₀Fe₁₀의 포화자화 값이다. NiFeCr 55 Å/(Cu 15 Å/Co₉₀Fe₁₀ 15 Å) × 10/NiFeCr 55 Å 다층박막의 경우, $\lambda_s = -9.25 \times 10^{-6}$, $\Delta\sigma = 7.1 \times 10^9$ dyne/cm²(= 710 MPa), $M_s = 1,452$ emu/cm³이며, 이들을 식 (1)에 대입하면 $\Delta H_k = 135.7$ Oe이다. 이 자기변형이방성자장 값은 소형소자 설계시 박막계면결합자장, 반자화자장과 더불어 고려 되어야 한다.

IV. 결 론

NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr 다층박막의 자기변형과

응력에 관하여 연구하였다. 박막은 DC 스퍼터링 방법으로 증착 하였으며, 초기 진공도는 2 × 10⁻⁹ Torr, 증착 중 아르곤 압력은 1 × 10⁻³ Torr 이었다. Cu 15 Å/CoFe 15 Å 이중층의 수가 증가할수록 포화자기변형상수가 2층에서 -5.6 × 10⁻⁶로부터 20층에서 -8.5 × 10⁻⁶으로 감소하였다. Cu 15 Å/CoFe 15 Å 이중층의 수가 2에서 20으로 증가 되었을때 다층박막의 인장응력의 크기가 980 MPa에서 590 MPa로 감소 하였다. 자기변형과 박막의 응력으로부터 형성 될 수 있는 최대 자기변형이방성자장은 Cu 15 Å/CoFe 15 Å 이중층의 수가 10일 때 135.7 Oe이었다. 이 자기변형이방성은 소형소자 설계시 박막계면결합자장, 반자화자장과 더불어 고려되어야 한다.

참고문헌

- [1] R. Rottmayer and J.-G. Zhu, IEEE Tran. Magn., **31**, 2597 (1995).
- [2] L.-C. Wang, H. J. Hatton, M. D. Cooke, W. M. Rainforth, and C. J. D. Hetherington, Abstracts of the Joint MMM-Intermag (2001).
- [3] H. Awano, Y. Suzuki, T. Yamazaki, T. Katayama, and A. Itoh, IEEE Tran. Magn., **26**, 2742 (1990).
- [4] O. Song, C. A. Ballentine, and R. C. O'andley, Appl. Phys. Lett., **64**, 2593 (1994).
- [5] B. A. Gurney, J.-P. Nozieres, V. S. Sperious, H. Lefakis, D. R. Wilhoit, and P. Baumgart, Digests of INTERMAG (1997).
- [6] G. Choe, IEEE Tran. Magn., **35**, 3838 (1999).
- [7] C.-Y. Hung, M. Mao, S. Funad, T. Schneider, L. Miloslavsky, M. Miller, C. Qian, and H. C. Tong, J. Appl. Phys., **87**(9), 6618 (2000).
- [8] S. Jo and M. Seigler, Appl. Phys. Lett., **80**(1), 82 (2002).
- [9] H. Fukuzawa, Y. Kamiguchi, K. Koi, H. Iwasaki, and M. Sahashi, J. Appl. Phys., **91**(5), 3120 (2002).
- [10] J. J. Qiu, G. C. Han, K. B. Li, Z. Y. Liu, and B. Y. Zong, J. Appl. Phys., **99**, 094304 (2006).
- [11] A. C. Tam and H. Schroeder, IEEE Tran. Magn., **25**, 2692 (1989).

Magnetostriction and Stress of NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr Multilayer Films

Soonchul Jo*

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 13 January 2010, Received in final form 12 February 2010, Accepted February 16 2010)

The magnetostriction and stress of multilayer NiFeCr/(Cu/Co₉₀Fe₁₀) × N/NiFeCr films were investigated. As the number of Cu 15 Å/CoFe 15 Å bilayers was increased, the saturation magnetostriction decreased from -5.6×10^{-6} at 2 bilayers to -8.5×10^{-6} at 20 bilayers. A change of CoFe thickness from 10 to 20 Å caused a decrease in the magnitude of tensile stress from 980 MPa to 590 MPa as the number of Cu 15 Å/CoFe 15 Å bilayers increased from 2 to 20. The maximum magnetostrictive anisotropy field that could be developed due to nonzero magnetostriction and stress is calculated to be 135.7 Oe when the number of Cu 15 Å/CoFe 15 Å bilayers is 10.

Keywords : magnetostriction, stress, Cu/CoFe multilayer films, magnetostrictive anisotropy