

## CoFe/Cu/NiFe Pseudo 스핀밸브의 자기저항 특성

최원준<sup>1,2</sup> · 홍진표<sup>2</sup> · 김태송<sup>1</sup> · 김광윤<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

<sup>2</sup>한양대학교 물리학과, 서울특별시 성동구 행당동 17

(2002년 8월 9일 받음, 2002년 12월 10일 최종수정본 받음)

비자성층을 사이에 둔 두 강자성층의 보자력 차이를 이용하여 거대자기저항특성을 나타내는 Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta 구조의 pseudo 스핀밸브를 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제조하였다. Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta 구조에서 CoFe층의 두께 변화에 따른 자화 특성 및 자기저항 특성을 조사하였으며, 이 구조에서 CoFe층의 두께가 60 Å일 때 자기저항비는 3.82 %이고 CoFe층과 NiFe층 사이의 보자력 차이는 27.4 Oe이다. Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta 구조를 갖는 pseudo 스핀밸브에서 CoFe층과 NiFe층의 보자력 차이는 CoFe층의 두께가 20 Å에서 40 Å까지 증가함에 따라 증가하였으며 40 Å 이상에서는 감소하였다. 이와 같은 결과는 박막의 결정성 및 포화 자기변형( $\lambda_s$ )의 변화에 의한 것으로 판단된다. Cu층과 NiFe층 사이에 CoFe층을 삽입한 Ta/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta 구조에서 삽입층인 CoFe층의 두께 변화에 따른 자화특성 및 자기저항 특성을 조사한 결과 CoFe 두께가 10 Å시 자기저항비가 6.7 %이며, 삼층막 구조 보다 자기저항비가 약 1.5배 이상 증가함을 알 수 있었다.

**주제어** : pseudo, spin valve, 자기저항 특성, 연자성층의 보자력제어

### I. 서 론

자성층/비자성층/자성층의 삼층막 구조에서 두 강자성층의 보자력 차이를 이용하여 거대자기저항 효과를 나타내는 pseudo 스핀밸브 연구는 구조의 단순성, 반강자성 층의 불필요 등에 의하여 1990 년대 후반에 많은 결과들이 보고되었다 [1-3]. 특히 Honeywell은 이 재료를 이용하여 저밀도 MRAM 을 제조하여 그 결과를 보고한[4] 이래로 이 재료를 이용하여 고밀도 비휘발성 메모리의 가능성을 조사하는 전산 모사 등의 결과가 보고되었다[5, 6]. 그러나, 40 % 이상의 높은 자기저항비 및 반강자성에 의한 교환이방성 특성을 나타내는 TMR 구조가 오히려 고밀도 자기메모리에 유리함이 보고된 [7] 이후로 현재는 pseudo 스핀밸브에 관한 연구가 많이 축소된 상태이다.

최근 pseudo 스핀밸브 연구는 메모리소자 응용의 관점에서 보다는 3층막 구조의 단순함과 제작의 용이성으로 인하여 나노 크기의 magnetic dot 형성용 재료 및 magnetic dot에 transport 특성을 부여하기 위한 방향으로 이동하고 있는 실정이다[8, 9]. 또한 TMR구조를 이용하는 것이 고밀도 메모리 소자에 응용되기에 유리하다면, pseudo 스핀밸브는 간단한 비트 구조와 큰 출력신호의 장점을 이용하여 저밀도용 메모리 소자로 사용하기 위한 개발 연구가 진행되고 있다.

Pseudo 스핀밸브 구조는 두 자성층의 보자력 차이에 의하여 자기저항 효과를 발생한다고 하지만 실제 제작에서 연자

성 특성을 갖는 두 강자성의 보자력 차이를 주는 것이 매우 어려운 일이다. 일반적으로는 한 층의 강자성은 보자력이 큰 경자성 재료를 사용하고, 다른 한 층은 보자력이 작은 연자성 층을 증착하는 것으로 알려져 있지만 이 경우 보자력이 큰 층의 누설 자계에 의하여 연자성층의 스위칭 특성이 영향을 받게 되어 소자 제조시 매우 불리하다. 그러므로 본 연구에서는 연자성층 만을 사용하여 CoFe/Cu/NiFe 구조의 pseudo 스핀밸브를 제조하였고, 이 구조에서 CoFe 두께 변화에 따른 자기저항비 및 보자력의 변화에 관하여 조사하였으며, 또한 삼층막 구조의 단점인 낮은 자기저항비를 개선하고자 하였다.

### II. 실험방법

Base pressure가  $2.0 \times 10^{-8}$  Torr 이하인 DC 마그네트론 스퍼터를 사용하여 10 mm×10 mm 크기의 Si/SiO<sub>2</sub>(100) 기판 및 Si기판 위에 Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta와 Ta/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta 구조를 가지는 pseudo 스핀밸브를 제조하였다. CoFe와 NiFe의 증착속도는( $\text{Å/s}$ ) 스퍼터링 전력의 변화 및 포화 자화 밀도( $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ : 1450 emu/cm<sup>3</sup>, NiFe: 800 emu/cm<sup>3</sup>)를 이용하여 조사하였다. CoFe은 10 mTorr, 30 W, NiFe는 1 mTorr, 30 W의 스퍼터링 조건으로 증착 하였다. 또한 Ta/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta 구조에서 Cu층과 NiFe층 사이의 CoFe층은 2 mTorr 20 W의 스퍼터링 조건으로 증착 하였다 [5]. 다층박막 증착시 자장이 100 Oe인 영구자석을 사용하여 CoFe와 NiFe의 일축 자기이방성을 제어하였다. 시료의 거대

\*Tel: (02) 958-5414, E-mail: kykim@kist.re.kr

자기저항 특성을 조사하기 위하여 인가자장의 감도가 0.5 Oe 이고 최대 2 kOe까지 자장을 가할 수 있는 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)과 CIP(Current In Plane)방식의 4-탐침법 자기저항 측정 장비를 사용하여 상온에서 M-H loop 및 R-H loop를 측정하여 시료의 자화 특성 및 자기저항비를 조사하였다. 또한 XRD, AFM을 이용하여 결정성, 표면 거칠기 및 결정립 크기를 조사하여 CoFe층의 두께 변화에 따른 pseudo 스핀밸브의 자기저항 및 자화 특성을 분석하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

그림 1은 Ta(50Å)/CoFe(60Å)/Cu(30Å)/NiFe(50Å)/Ta(50Å)의 삼층막 구조를 가지는 pseudo 스핀밸브의 자기저항 곡선을 나타낸 것이다. 외부 인가자장에 대해 0 Oe를 기준으로 자기저항 곡선이 대칭적이며, 이것은 반강자성층을 사용하지 않고 CoFe층(hard 층)과 NiFe층(soft 층)의 보자력 차이에 의해 스핀을 제어하였기 때문이다. 그림 1에 삽입한 자화 곡선은 보자력이 작은 NiFe층의 스핀이 외부 인가자장 방향으로 반전된 후 더 높은 외부 인가자장에서 NiFe층 보다 보자력이 큰 CoFe층의 스핀이 외부 인가자장 방향으로 반전되는 것을 알 수 있다. 또한 그림 1에서 보는 바와 같이 CoFe층의 두께가 60 Å일 때 CoFe층과 NiFe층의 스핀이 반평행을 유지할 시 자기저항비는 3.82%이고 hard 층인 CoFe층의 보자력은 약 50 Oe이며 soft 층의 보자력은 연속적으로 변화하므로 자기저항비의 반에 해당되는 값을 조사하여 NiFe 보자력으로 사용하였다.

그림 2는 Ta(50Å)/CoFe(60Å)/Cu(30Å)/NiFe(50Å)/Ta(50Å) 구조에서 Si 기판과 Si/SiO<sub>2</sub> 기판에 대한 자기저항 곡선을

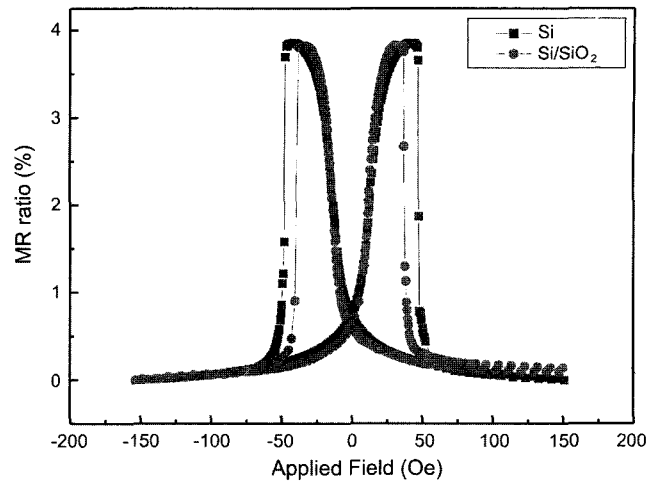


Fig. 2. The changes of MR ratio with different substrate in pseudo spin valve Ta(50 Å)/CoFe(60 Å)/Cu(30 Å)/NiFe(50 Å)/Ta(50 Å).

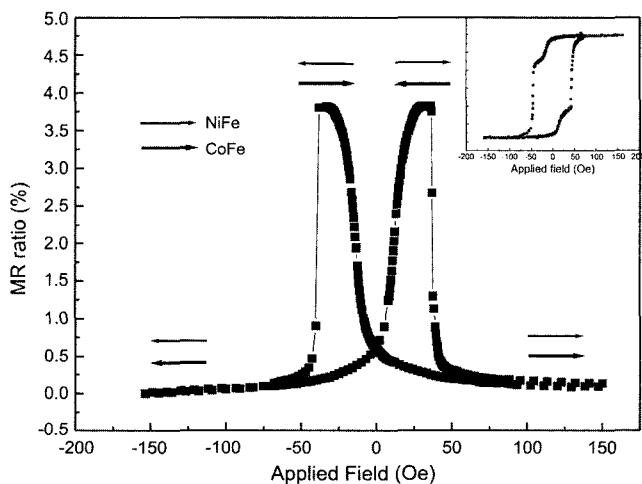
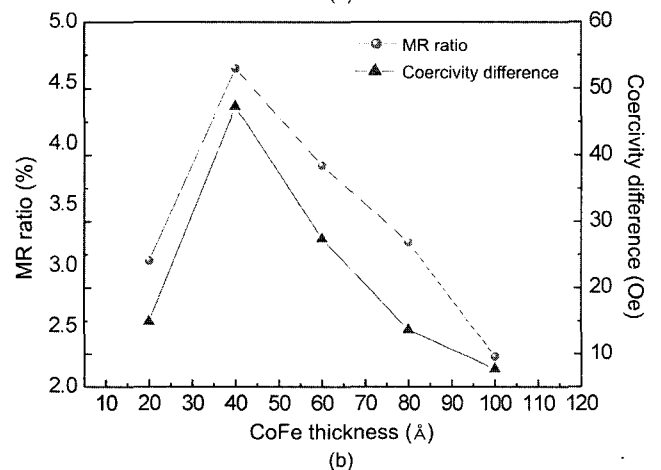
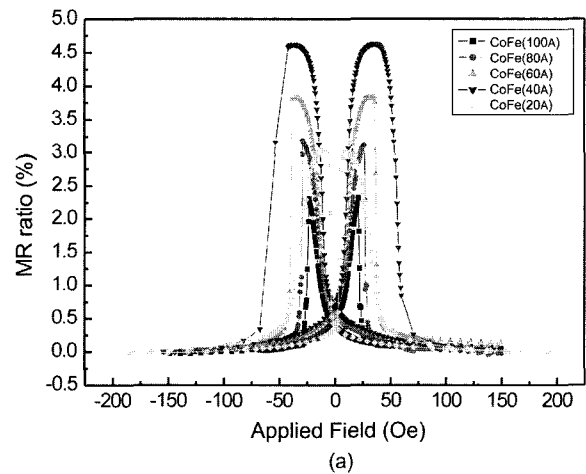


Fig. 1. Magnetoresistance curve in pseudo spin valve Ta(50 Å)/CoFe(60 Å)/Cu(30 Å)/NiFe(50 Å)/Ta(50 Å).

Fig. 3. R-H curves (a) and coercivity difference (b) as a function of CoFe layer thickness in pseudo spin valve Ta(50 Å)/CoFe(t Å)/Cu(30 Å)/NiFe(50 Å)/Ta(50 Å).

나타낸 것이다. Si에 자연산화막만 있는 기판과 Si에 SiO<sub>2</sub>을 1500 Å 산화시킨 기판위에 pseudo 스핀밸브를 증착할시 자기저항비의 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 반면에 CoFe층과 NiFe층 사이의 보자력 차이는 Si 기판 위에 증착 하였을 때 Si/SiO<sub>2</sub> 기판 위에 증착한 구조보다 약 7.8 Oe 정도 증가하였다. 이와 같은 결과는 기판의 거칠기에 대한 영향으로 생각된다[10]. 그러나 기판에 의해 CoFe층과 NiFe층 사이의 보자력 차이에는 약간의 영향을 미치고 있으나 CoFe층과 NiFe층의 스핀 제어와 자기저항비에는 크게 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었다.

Co/Cu/NiFe 구조에서 이방성인 큰 재료인 Co와 이방성이 작은 NiFe를 사용하여 pseudo 스핀 밸브를 제작하는 것은 어려운 일은 아니지만, CoFe/Cu/NiFe와 같은 구조에서 연자성 특성을 나타내는 CoFe을 hard 층으로 증착하여 보자력을 증가시키는 것은 쉬운 일은 아니다. 본 연구에서는 제조조건을 적절히 제어하여 보자력이 큰 CoFe을 증착하여 그림 1에서 처럼 거대자기저항 효과를 나타내는 pseudo 스핀 밸브를 제작하는데 성공 할 수 있었다. 이 때 CoFe 층의 보자력을 증가시키기 위하여 CoFe 조직을 제어하였기에 CoFe층의 두께 변화에 따른 조직 변화가 자기저항비 및 CoFe층의 보자력 변화에 어떤 영향을 미치는지를 조사하였으며 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 자기저항비 및 CoFe층과 NiFe층의 보자력 차이는 CoFe층의 두께가 20 Å에서 40 Å으로 증가함에 따라 증가하였고 40 Å 이상에서는 감소하는 경향을 알 수 있었다. 또한 CoFe층의 두께가 40 Å일 때 자기저항비는 약 4.62%로 최대치가 얻어졌으며, CoFe층과 NiFe층의 보자력 차이도 약 47.3 Oe로 최대치가 얻어졌다. 즉 CoFe 두께를 40 Å을 할 시 가장 높은 보자력을 얻을 수 있으며, 이때 자기저항비도 가장 크게 얻어지고 있다. 이와 같은 결과는 CoFe의 보자력이 두께에 따라 크게 변화하는 것으로 판단되며, 증착 되는 두께에 따라 미세조직의 변화를 예측할 수 있다. 그러므로 두께에 따른 미세조직의 변화를 조사하기 위하여 각 시료의 XRD를 관찰하였으며, 그 결과를 그림 4(a)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 CoFe의 두께가 20 Å을 갖는 시료의 회절 곡선의 경우 CoFe의 결정성이 매우 미약하며, 반가폭이 매우 큰 것으로 보아 결정립이 미세함을 알 수 있다. 즉 CoFe의 이방성 제어가 결정립의 크기가 작을 경우 스파터링 조건을 변화시켜도 보자력을 증가 할 수 없음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 나노 결정립을 갖는 연자성재료의 보자력 감소 이론과 잘 일치하고 있다[11]. 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 CoFe의 두께가 40 Å일 때 회절강도가 가장 크며, 그 이상 CoFe 두께를 증가시키면 오히려 회절 강도가 감소하는 것으로 얻어졌다. 즉 CoFe의 두께를 증가시키면 오히려 (111)

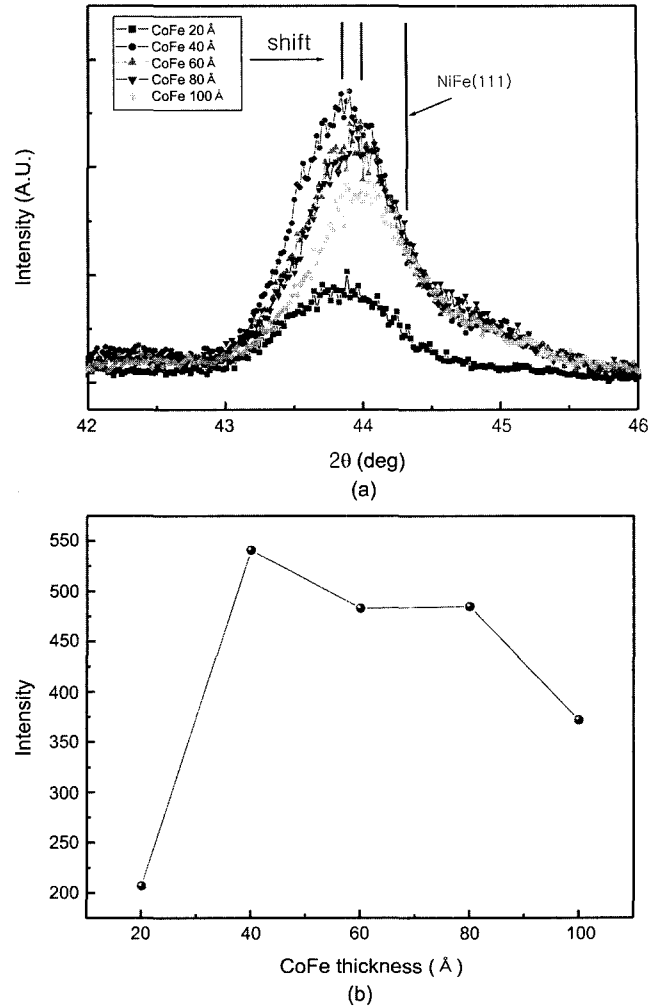


Fig. 4. (a) XRD patterns as a function of CoFe layer thickness in pseudo spin valve Ta(50 Å)/CoFe(t Å)/Cu(30 Å)/NiFe(50 Å)/Ta(50 Å) (b) XRD intensity versus CoFe layer thickness.

texture 조직이 저하됨을 알 수 있다. 이와 같은 특성은 일반적인 조건에서(낮은 Ar 분압) 제조한 결과와는 반대의 특성을 나타내는 것이며, CoFe의 제조할 시 보자력을 증가시키기 위하여 높은 Ar 분압에서 실시한 것에 기인하는 것이라고 판단된다. 반면에 CoFe의 두께를 증가시키면 NiFe (111)면의 강도가 증가하는 방향으로 피크의 이동이 있음을 알 수 있다.

그림 5는 CoFe 두께에 따른 AFM 사진에서 구한 RMS 및 결정립 크기의 변화를 나타낸 것이다. RMS 거칠기는 CoFe 두께가 증가함에 따라 증가 한후 100 Å에서 급격히 감소함을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 CoFe 두께에 따른 보자력의 변화와는 큰 관계가 없음을 알 수 있다. 한편 AFM 관찰에서 CoFe 두께가 60 Å일 때 240 Å 정도의 결정립 크기를 보이며 그 후 두께가 증가할 시 오히려 결정립

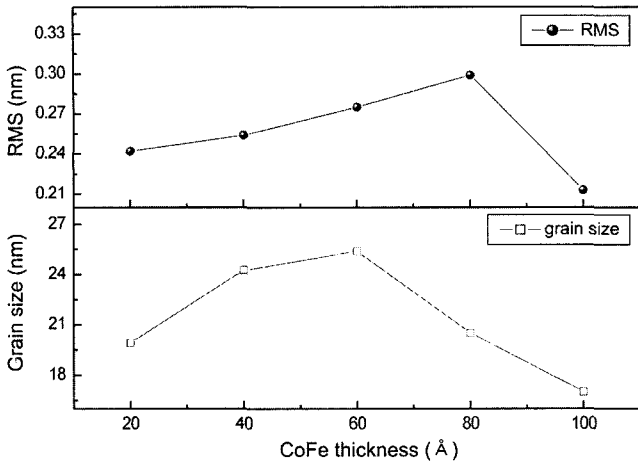


Fig. 5. RMS value and grain size as a function of CoFe layer thickness in pseudo spin valve Ta(50 Å)/CoFe(t Å)/Cu(30 Å)/NiFe(50 Å)/Ta(50 Å).

크기가 감소하고 있다. 본 실험에서 얻은 결정립의 크기와 보자력의 변화는 기존 벌크 재료에서 적용되는 기구보다는 결정립의 크기가 나노 크기를 가질때 일시 비정질 모델에 적용되는 random anisotropy model에 따르며 보자력은 결정립의  $D^6$ 에 비례하는 거동을 따른다. 이점을 고려할시 현재의 CoFe의 보자력 변화와 AFM에서 조사된 보자력 변화가 정확하게 일치하는 하지 않지만 비슷한 경향을 보인다고 판단된다. 한편 본 연구에서는 조사되지 않았지만 CoFe의 두께에 따라 자기 변형이 변화하며, 40 Å 근처에서 자기 변형이 최대가 됨을 보고하고 있다[12]. 그러므로 연자성 박막 CoFe의 보자력을 증가시키기 위해서는 주어진 스파터링 조건하에서 결정립 제어 및 표면 거칠기보다는 결정성 및 자기 변형 값의 제어가 중요한 변수임을 확인 할 수 있었다.

그림 6은 pseudo 스핀밸브 구조에서 자기저항비를 증가시키기 위해 Cu층과 NiFe층 사이에 CoFe층을 10 Å 삽입한 구조에서 자기저항비의 변화를 나타낸 것이다. 이때 사용한 CoFe의 증착 조건은 보자력을 증가시키기 위해서 사용한 조건이 아니라 스파터링 분압을 2 mTorr에서 증착 하였다. 그 결과 자기저항비가 4.6%에서 6.8%로 증가하였으며, 이와 같은 자기저항비의 증가는 자성층의 삽입에 의한 스핀 의존성 산란효율의 증가에 기인한다. 또한 6.8%의 자기저항비 값은 Cu 두께가 30 Å을 고려할 때 지금까지 보고된 값과 비교하여 매우 우수한 특성을 나타내고 있다. 한편 CoFe의 삽입 두께에 따른 자기저항비의 변화를 조사하였고 그 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 10 Å 정도에서 최대의 자기저항비 증가 효과를 보이며, 20 Å까지 삽입 층의 두께를 증가시켜도 자기저항비에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

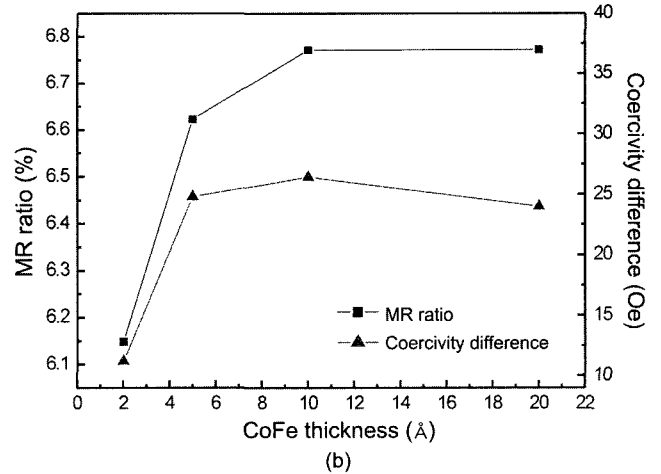
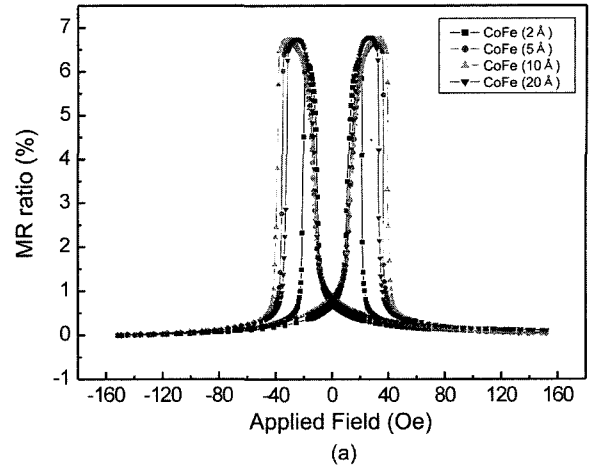


Fig. 6. (a) The change of MR ratio in pseudo spin valves Ta(50 Å)/CoFe(60 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(t Å)/NiFe(50 Å)/Ta(50 Å) (b) The changes of MR ratio and coercivity difference as a function of inserting layer CoFe thickness.

#### IV. 결 론

Si/SiO<sub>2</sub> 기판 위에 Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta 구조와 Ta/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta 구조를 가지는 pseudo 스핀밸브의 자기저항비 및 자기특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CoFe층의 두께가 60 Å 일 때 자기저항비는 3.82% 이고 CoFe층과 NiFe층 사이의 보자력 차이는 27 Oe이며, 이때 스핀이 반평행을 유지하는 구간이 7 Oe로 CoFe층과 NiFe층의 스핀이 가장 제어가 잘 되었다.
2. Si 기판과 Si/SiO<sub>2</sub> 기판 위에 삼층막 구조의 pseudo 스핀밸브를 증착시 CoFe층과 NiFe층의 보자력 차이는 약간 있으나 자기저항비 및 강자성층의 스핀 제어 측면에서는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보아, 삼층막 구조의 pseudo 스핀밸브를 이용하여 소자화시 기판에 의한 영향력은 없을 것

으로 판단된다.

3. Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta 구조를 갖는 pseudo 스핀밸브에서 자기저항비 및 CoFe층과 NiFe층의 보자력 차이는 CoFe층의 두께가 20 Å에서 40 Å까지 증가함에 따라 증가하였으며, 40 Å 이상에서는 감소하였다. 이와 같은 결과는 박막의 결정성 및 포화 자기변형( $\lambda_s$ )의 변화에 의한 것으로 판단된다.

4. Ta/CoFe/Cu/CoFe/NiFe/Ta 구조에서 Cu층과 NiFe층 사이에 삽입한 CoFe층의 두께가 10 Å일 때 자기저항비는 6.7%로 얻어졌으며, Cu층을 사이에 둔 CoFe층과 CoFe/NiFe층의 보자력 차이는 26.4 Oe로 얻어졌다. 이것은 CoFe층을 삽입함으로써 Cu층과 NiFe층의 확산을 방지하며, 계면에서의 스핀의존성 산란을 증가 시켜 자기저항비가 삼층막 구조 보다 약 1.5배 이상 증가하였다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 사업중 테라급 나노소자개발 사업단 및 정보통신부 IMT2000 나노감지소자 과제의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. Dieny, V. Speriosu, S. Metin, S. Parkin, B. Guernsey, P. baumgart, D. wilhoit, *J. Appl. Phys.*, **69**, 4774(1991)
- [2] J. M. Daughton, *J. Magn. Magn. Mat.*, **192**, 334(1999).
- [3] S. Tehrani, E. Chan, M. Duriam, T. Zhu and H. Goronkin, *IEDM Tech, Dig.* 193(1996).
- [4] B. A. Everitt, A.V. Pohm, and J. M. Daughton, *J. Appl. Phys.*, **81**, 4020(1997).
- [5] J. Gadbois, J.-G. Zhu, W. Vavra, and A. Hurst, *IEEE Trans. Magn.*, **34**, No 4, 1066(1998).
- [6] S. Tehrani, E. Chan, M. Durlam, M. Deherrera, J.M, slaughter, J. Shi, and E. Kerszykowski, *J. Appl. Phys.*, **85**, 5822(1999).
- [7] S. S Parkin, K. P. Roche, M. G. Samant, P.M. Rice, and R. B. Beyers, *J. Appl. Phys.*, **85**, 5828(1999).
- [8] J. Q. Wang, L. M. Malkinski, Y. Hao, C. A. Ross, J. A. Wiemann, and C. J. O'Conner, *Materials Science and Engineering B*, **76**, 1(2000).
- [9] F. J. Castano, Y. Hao, S. Haratani, C.A. Ross, B. Vogeli, M. Walsh, and H. I. Smith, *IEEE, Trans. Magn.*, **37**, 2073(2001)
- [10] S. bae, J. Li, J. H. Judy, and S. Zurn, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3435 (2000).
- [11] G. Herzer, *IEEE Trans. Mag.*, **25**, 3327(1989).
- [12] C.-Y. Hung, M. Mao, S. Funada, T. Schneider, L. Miloslavsky, M. Miller, C. Qian, and H.C.Tong, *J. Appl. Phys.*, **87**, 6618 (2000).

## The Giant Magnetoresistance Properties of CoFe/Cu/NiFe Pseudo Spin Valve

W.J. Choi<sup>1,2</sup>, J. P. Hong<sup>2</sup>, T. S. Kim and K. Y. Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology 39-1 Hawolgok-dong Seungbuk-gu, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Department of Physics, Hanyang University 17 Handang-dong Seungdong-gu, Seoul, Korea

(Received 9 August 2002, in final form 10 December 2002)

The pseudo spin valve with a structure of Ta/CoFe( $t$  Å)/Cu(30 Å)/NiFe(50 Å)/Ta, showing giant magnetoresistance properties by utilizing coercivity difference between only two soft ferromagnetic layers were produced by d.c UHV magnetron sputtering system. In pseudo spin valve Ta/CoFe/Cu/NiFe/Ta, the magnetic and magnetoresistance properties with change of CoFe thickness were investigated. When the thickness of CoFe was 60 Å, a typical MR curve of pseudo spin valve structure was obtained, showing MR ratio of 3.8 % and the coercivity difference of 27.4 Oe with a sharp change of hard layer switching. When the CoFe thickness was varied from 20 to 100 Å, coercivity difference between two layers was increased to 40 Å and decreased to 100 Å gradually. It is thought the change in coercivity of hard layer was due to the crystallinity and magnetostriction of thin CoFe layer. In order to improve the MR property in CoFe/Cu/NiFe trier layer structure, CoFe layer with change of 2-20 Å thick was inserted between Cu and NiFe. When the thickness of CoFe was 10 Å, MR ratio was 6.7 %, showing excellent MR property. This indicates 50 % higher than that of CoFe/Cu/NiFe pseudo spin valve.

**Key words :** pseudo spin valve, magnetoresistance, coercivity control of soft layer