

NiO 스핀밸브 박막의 Specular Effect에 의한 자기저항비의 향상에 대한 연구

최상대* · 주호완 · 이기암

단국대학교 물리학과, 충남 천안시 안서동 산 29번지, 330-714

(2002년 11월 15일 받음, 2002년 12월 1일 수정본 받음)

Si/SiO₂/NiO(60 nm)/Co(2.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Co(4.5 nm)/NOL(t nm) 구조와 Si/SiO₂/NOL(t nm)/Co(4.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Co(2.5 nm)/NiO(60 nm)의 구조를 갖는 바닥층 스핀밸브와 꼭대기층 스핀밸브를 제작하고, NOL의 두께변화에 따른 비저항(ρ) 값과 비저항의 변화량($\Delta\rho$), 교환결합력(H_{ex}), 보자력(H_c)의 자기적 특성을 연구하였다. NOL로 NiO 03 nm의 두께로 삽입한 결과, 최대 자기저항비(magnetoresistance ratio)는 바닥층 스핀밸브에서 12.51%의 얻었으며, 자기저항비의 향상률은 꼭대기층 스핀밸브에서 더 높은 결과를 얻었다. 또한, 두 형태 모두 비저항의 변화량($\Delta\rho$)은 거의 일정하였고, 비저항(ρ) 값은 감소하였다. 이러한 결과는 NOL의 삽입하였을 때 NOL/강자성층(free ferromagnetic layer) 계면에서 유도 전자의 specular 산란 효과를 가져왔고, 이로 인하여 전자의 평균 자유이동경로(mean free path; MFP)가 확장되어 전류의 전도도를 증가시켰다. 이러한 specular 효과에 의해 비저항의 변화량은 일정하게 유지되는 동안에 비저항 값은 감소하게 되어 결과적으로 자기저항비의 향상을 가져왔다.

주제어 : specular effect, 스핀밸브

I. 서 론

거대자기저항(Giant magnetoresistance; GMR) 헤드의 면적당 기록밀도에 있어 read sensor로부터 더 높은 readback 감도의 요구는 급속히 증가하고 있다. NiO를 이용한 기록밀도가 100 Gbyte/in²에 다다랐으며[3], 이러한 적용이 안정적 수준에 이르러 포화 자장(magnetic saturation field) 또는 스위칭 필드(switching field)가 한계(~5 mT, 즉 50 Oe 이하)에 도달했다. 또한 실온에서 보고되어진 GMR 값에 있어 가장 높은 값은 Co/Cu 초격자에 대해 얻어진 것으로 110%이나 스위칭 필드가 3 T(30 kOe)로 너무 커서 실용성에 문제점을 가지고 있다[4].

1990년 Barnas와 연구자들은 Fe/Cr의 다층박막과 Co/Au/Co 삼층박막으로 강자성층 내부와 계면에서 스핀의존 산란을 연구하여 이론적인 모델을 거론하여 Specular 표면 반사로 인한 것으로 생각했으나 실험적으로 증명하지는 못하였다[5]. 그 후 Swagten과 연구자들이 스핀밸브 표면에 NiO층을 삽입하여 스핀밸브와 NiO 삽입층 사이의 계면에서 specular 반사에 의해 실험적으로 자기저항비의 향상을 얻었으며[3], Sakakima와 연구자들에 의해 자기저항비와 specular 반사율 사이의 관계가 Barnas 모델을 통해 수식으로 정리하였다[6]. 특히 Egelhoff와 연구자들은 산소를 이용하여 스핀밸브 박막의 표면을 산화시켜 전도 전자들의 specular 산란 효과를 보고하였으며, 강자성층과 산화층 사이의 계면에서 specular 반사가 이루어져 GMR의 향상을 가져온 것으로 보고 있다[1, 2].

본 논문에서는 산소 플라즈마 방법과 자연산화 방법을 이용하여 NOL을 형성하는 기존의 방법들과는 달리[1, 2, 6, 7], NiO를 이용한 꼭대기층 스핀밸브와 바닥층 스핀밸브에서 NOL에 NiO를 직접 증착하여 specular 효과를 연구하였으며, 그에 따른 GMR의 향상을 연구하는 데 목적을 두고 있다.

II. 실험 방법

NiO 스핀밸브박막은 4-gun type DC/RF 마그네트론 스퍼터링 시스템(magnetron sputtering system)로 제작하였다. NiO는 분말시료를 이용하여 sintering한 target을 사용하였고, Co와 Cu는 Cerac사의 target을 사용하여 증착하였다. NiO와 NOL은 RF 마그네트론장치로 증착하였고, Co와 Cu는 DC마그네트론장치로 증착하였다. 기판은 Si wafer에 SiO₂층이 1000 nm 산화된 Si/SiO₂ wafer를 사용하였으며 시편의 모양을 일정하게 유지하기 위하여 마스크를 사용하여 증착하였다. 초기 진공도는 1.0×10⁻⁶ Torr였으며, 작업진공도는 1.0×10⁻³ Torr에서 증착하였다. 증착시 시편에 일축이방성을 인가하기 위하여 약 300 Oe의 자장을 가하였다. 자기저항비는 실온에서 4단자법(four-terminal method)으로 측정하였고, NOL/강자성층 사이 계면에서의 거칠기를 관찰하기 위하여 Si/SiO₂ wafer 위에 Co(2.5 nm)와 NiO(2.5 nm)/Co(2.5 nm)의 시편을 제작하여 AFM(Atomic Force Microscopy)으로 표면을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 Si/SiO₂/NOL(t nm)/Co(4.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Co(2.5

*Tel: (041) 550-3426, E-mail: csd100j@hanmail.net

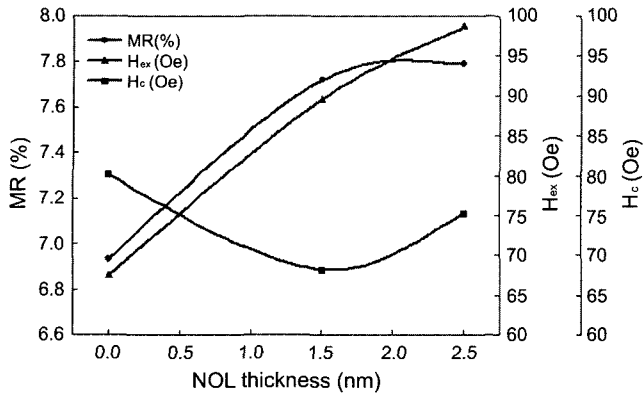


Fig. 1. MR ratio, exchange coupling (H_{ex}) and coercivity (H_c) dependence on NOL thickness of the Si/SiO₂/NOL/Co/Cu/Co/NiO.

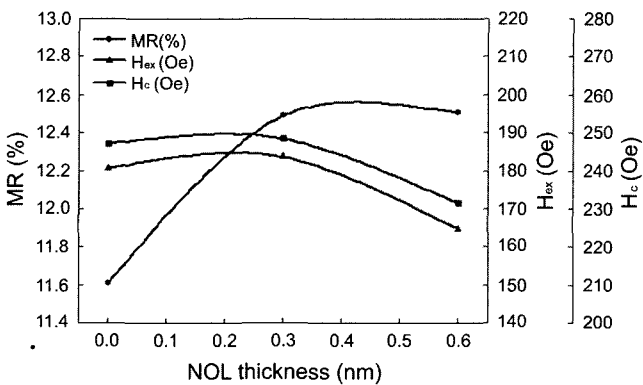


Fig. 2. MR ratio, exchange coupling (H_{ex}) and coercivity (H_c) dependence on NOL thickness of the Si/SiO₂/NiO/Co/Cu/Co/NOL.

nm)/NiO(60 nm) 꼭대기층 스핀 밸브 구조에서 NOL(0.25 nm) 두께 변화에 따른 자기저항비, 교환결합력(H_{ex}), 그리고 보자력(H_c)을 보인 것이다. 여기서 NOL이 삽입되므로 인하여 자기저항비와 교환 결합력은 항상 되었고 반대로 보자력은 감소하는 경향을 보인다. NOL층이 있을 경우의 자기저항비는 6.93%였으며, 삽입되는 NOL의 두께증가에 따라 최대 7.79%까지 증가하였다. 이것은 NOL에 의해서 전도전자들의 specular 효과가 증가하면서 비저항 값이 감소하게 되어 자기저항비가 증가한 것으로 판단된다. 교환결합력의 증가는 Fig. 4의 AFM 측정 결과로 볼 때 NOL이 삽입되는 경우가 기판에 직접 증착했을 때 표면보다 더 편평한 것으로 볼 때 교환결합력이 일어나는 고정층과 반강자성층(NiO) 사이 계면에 영향을 주어 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 2는 Si/SiO₂/NiO(60 nm)/Co(2.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Cu(4.5 nm)/NOL(t nm) 바닥층 스핀 밸브 구조에서 NOL 두께 변화에 따른 자기 저항비, 교환결합력 그리고 보자력을 보인 것이다. 여기에서 Fig. 1과는 달리 교환 결합력이 감소하는 경향을 보이고 있는데 이것은 NOL의 두께가 너무 얇기 때문에

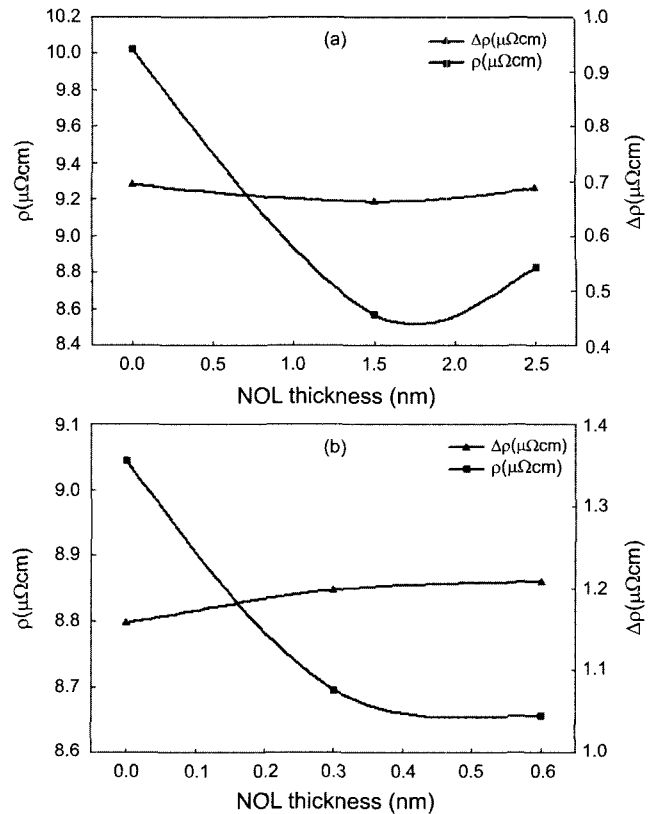


Fig. 3. MR curves and MR ratio, resistivity (ρ), dependence on NOL thickness for (a) top spin valves and (b) bottom spin valve.

크게 영향을 미치지 못한 것으로 간주된다. Fig. 1과 Fig. 2를 비교해 볼 때, 꼭대기층 스핀 밸브 경우 바닥층 스핀 밸브에 비해 큰 교환 결합력의 향상을 나타내지만, 교환 결합력의 크기는 바닥층 스핀 밸브에 경우 180 Oe 정도로 꼭대기층 스핀 밸브보다 두 배 가량 더 높은 결과를 보이고 있다. 또한 자기 저항비도 꼭대기층 스핀밸브의 경우 7.79%인데 반해 바닥층 스핀밸브는 12.51%로 현저히 높게 나타난다. 이러한 결과로 볼 때, 자기저항비의 증가에는 꼭대기층 스핀밸브 보다 바닥층 스핀밸브가 더 효과적인 구조라고 사료되며, 이것은 NiO 형성에 있어 NiO가 꼭대기에 놓일 경우 보다 바닥에 놓일 경우 결정 성장이 더 잘 된 것으로 보여진다.

Fig. 3은 (a) Si/SiO₂/NOL(t nm)/Co(4.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Co(2.5 nm)/NiO(60 nm) 꼭대기층 스핀 밸브 구조와 (b) Si/SiO₂/NiO(60 nm)/Co(2.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Cu(4.5 nm)/NOL(t nm) bottom 스핀 밸브 구조에서 비저항(ρ)와 비저항의 변화량($\Delta\rho$)을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보여지듯이 NOL 두께 증가에 따라 비저항 변화량($\Delta\rho$)은 0.66~0.69 $\mu\Omega\text{cm}$ 그리고 1.16~1.21 $\mu\Omega\text{cm}$ 로 각각 거의 일정하게 나타났으며, 이러한 현상은 NOL 삽입으로 인접한 자유층과의 계면의 특성의 차이로 유도 전자들이 NOL/강자성층 계면에서 specular 반사에

의해 확산 산란된 것으로 사료된다. 비저항(ρ)의 크기는 꼭대기층 스핀 밸브의 경우 $10.02 \mu\Omega\text{cm}$ 에서 $8.83 \mu\Omega\text{cm}$ 그리고 바닥층 스핀 밸브의 경우 $9.97 \mu\Omega\text{cm}$ 에서 $9.59 \mu\Omega\text{cm}$ 로 감소하는 경향을 보이고 있다.

두 형태에서 비저항의 감소량을 비교하여 볼 때 바닥층 형태보다 꼭대기층 형태의 경우는 증착되는 기판의 편평도의 영향으로 NOL/강자성층 계면에 영향을 미쳐 specular 효과가 바닥층 형태보다 더 많이 일어난 것으로 보인다. 바닥층 형태 경우에서 주목할 점은 NOL을 꼭대기층 형태보다 두께를 얇게 0~0.6 nm로 삽입하였을 때 자기저항비의 향상을 가져온 것은 아직 보고된 바가 없으며, 단순히 NOL의 두께가 얇은 경우에 specular 효과가 더 잘 일어난다고 하기에는 비교적 너무나 얇다는 점이다. 이것은 자유층의 직접적인 산화와는 달리 불규칙한 자유층(free layer) 표면에 NiO의 Ni와 O 원자가 낮은 증착율로 인한 증착 과정에서 자유층 표면을 얇게 산화시킨 것으로 보여지며, 이것으로 인하여 표면이 편평해진 것으로 생각된다. 이러한 결과는 최근 보고된 연구 보고에서 바닥층 스핀 밸브의 경우 고정층 중간에 NOL을 삽입하거나 자유층과 고정층 중간에 양쪽 모두 삽입한 실험에서 높은 specular 효과를 얻었던 것에 반하여 본 실험에서는 꼭대기층 스핀 밸브와 바닥층 스핀 밸브에 자유층 위에 NOL을 삽입하여 비교한 것에 주안점을 두었으며, 또한 보고된 논문에서는 NOL층을 자연산화하거나 산소 플라즈마법을 사용하여 specular 효과로 인한 향상을 보인 연구이지만 본 실험의 경우 자유층 위에 직접 산화물을 직접 증착한 경우이기 때문에 다른 연구 논문과는 차이가 있다.

Fig. 4는 Si/SiO₂/NOL(t nm)/Co(2.5 nm) 구조에서 t=0, 2.5 nm일 때 AFM(atomic force microscopy)으로 측정한 그림을 보인 것이다. 꼭대기층 스핀밸브에서 NOL이 삽입되었을 때 전도전자의 specular 산란이 더 잘 일어난 것으로 판단되며, 이것은 NOL/강자성층 사이 계면의 편평도에 기인하는 것으로 앞서 언급한 결과를 간접적으로 확인하고자 AFM으로 분석한 것이다. 결과를 통해서 보여지듯이 기판에 Co를 직접 증착된 표면보다 NOL이 삽입됨으로 인하여 표면이 편평한 것을 알 수 있으며, 이러한 이유로 NOL/강자성층의 계면이 바닥층 형태 보다 꼭대기층 형태의 경우 더 편평하여 유도 전자들이 계면에서 더 많은 specular 산란이 일어나 자기저항비 변화량이 더 크게 나타난 것을 뒷받침 해 준다.

IV. 결 론

Si/SiO₂ wafer 위에 NiO(60 nm)/Co(2.5 nm)/Cu(1.95 nm)/Co(4.5 nm)/NOL(t nm) 구조의 스핀밸브를 꼭대기층과 바닥층으로 하여 비교하였다. 자기저항비는 12.51 %로 바닥층 스

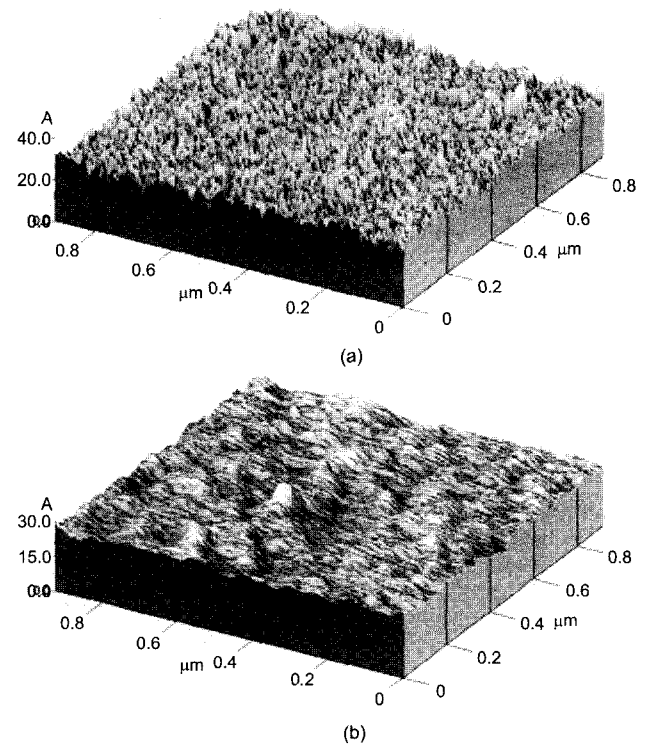


Fig. 4. The AFM image of (a) Si/SiO₂/Co(2.5 nm) and (b) Si/SiO₂/NiO(2.5 nm)/Co(2.5 nm).

핀밸브 구조에서 현저하게 높았으나 NOL 삽입으로 인한 자기저항비의 향상율은 꼭대기층 스핀밸브에서 12.4 %로 바닥층 스핀밸브의 8 %에 비해 현저히 높았다. 결과적으로는 두 형태가 모두 자기저항비의 향상을 가져왔는데, 이것은 비저항의 변화량은 일정한데 비해 비저항 값이 감소하여 나타난 결과로 유도전자의 specular 산란이 증가한 것으로 생각된다. 교환결합력은 바닥층 스핀밸브에서는 오히려 약간 감소하는 현상을 보이며 꼭대기층 스핀밸브에서는 증가하였다. 이것은 스핀밸브 박막의 결정이 무너지면서 오는 현상으로 아직 명확히 밝혀진 바는 없다. 보자력은 두 형태 모두 감소하는 현상을 보이는 데 이로 인하여 자기적 특성은 향상되었으며 자기저항비의 증가와도 관계한 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2000학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] W. F. Egelhoff, Jr., P. J. Chen, C. J. Powell, M. D. Stiles, and R. D. McMichael, J. H. Judy, K. Takano and A. E. Berkowitz, J.

- Appl. Phys. **82**, 6142 (1997).
- [2] Junichi Fujikata, Kazuhiko Hayashi, and Masafumi Nakada, J. Appl. Phys. **85**, 5021 (1999).
- [3] H. J. M. Swagton, G. J. Strijkers, P. J. H. Bleomen, M. M. H. Willekens, and W. J. M. de Jonge, and J. C. S. Kools, Phys. Rev. B **53**, 9108 (1996).
- [4] S. S. Parkin (unpublished).
- [5] J. Barnas, A. Fuss, R. E. Camley, P. Grunberg, W. Zinn, Phys. Rev. B **42**, 8110 (1990).
- [6] H. Sakakima, E. Hirota, Y. Kawawake, J. Magn. Mater. **184**, 49 (1998).
- [7] W. F. Egelhoff, Jr., P. J. Chen, C. J. Powell, D. Parks, G. Serpa, and R. D. McMichael, D. Martien and A. E. Berkowitz, J. Vac. Sci. Technol. B **17**, 1702 (1999).
- [8] E. H. Sondheimer, Adv. Phys. **1**, 1 (1952).
- [9] B. A. Gurney, V. S. Speriosu, Jean-Pierre Nozieres, Harry Lefakis, D. R. Wilhoit, O. U. Need, Phys. Rev. Lett. **71**, 4023 (1993).
- [10] H. Sakakima, Y. Sugita, M. Satomi, Y. Kawawake, J. Magn. Mater. **198-199**, 9 (1999).
- [11] S. Sant, M. Mao, J. Kools, K. koi, H. Iwasaki, M. Sahashi, J. Appl. Phys. **89**, 6931. (2001).
- [12] H. Sakakima, M. Satomi, Y. Sugita, Y. Kawawake, J. Magn. Mater. **210**, 20. (2000).
- [13] A. Veloso, P. P. Freitas, P. Wei, N. P. Barradas, J. C. Soares, B. Almeida, J. B. Sousa, J. Appl. Phys. **77**, 1020. (2000).
- [14] Jongill Hong, Kenji Noma, Hitoshi Kanai, Junichi Kane, J. Appl. Phys. **89**, 6940. (2001).

Study on the Specular Effect in NiO spin-valve Thin Films

Sang-Dae Choi*, Ho-wan Joo, and Ky-Am Lee

Department of Physics, Dankook University, Cheonan, 330-714, Korea

(Received 15 November 2002, in final form 1 December 2002)

Magnetic properties are investigated for top- and bottom-type spin valves of NiO(60 nm)/Co(2.5 nm)/Cu(1.95 nm)/ Co(4.5 nm)/ NOL (t nm; Nano Oxide layer). The MR ratios of the bottom-type spin valves with NOL are larger than those of the top-type spin valves. However, the enhancement of the former is lower than the latter. Both of spin-valves also showed almost constant $\Delta\rho$ and smaller ρ . Enhanced MR ratios of spin valves with NOL result mainly from small values of with constant $\Delta\rho$ which due to specular diffusive electron scattering at NOL (NiO)/metal interfaces.

Key words : specular effect, spin valves.