

NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층이 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 박막의 거대자기저항 특성과 자기이방성에 미치는 영향

김형준 · 조권구 · 주승기

서울대학교 공과대학 재료공학부
서울대학교 신소재공동연구소 전자재료실험실
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

(1999년 9월 15일 받음, 1999년 10월 12일 최종수정본 받음)

4° 기울어진 Si(111) 웨이퍼를 기판으로 사용하여 Cu(50 Å) 바닥층 위에 외부 자장의 인가 없이 NiFe(60 Å)/Co(0 Å ≤ x Å ≤ 15 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) 스핀밸브 박막을 형성하여, NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층에 따른 스핀밸브 박막의 거대자기저항 특성의 변화와 NiFe 층의 자기이방성의 변화를 관찰하였다. NiFe/Cu 계면에 극히 얇은 Co 층이 삽입됨에 따라, 스핀밸브 박막의 자기저항비는 약 1.5 %에서 3.5 %로 약 2배 이상 증가하였고, NiFe 층의 자화용이축이 90° 전이하여 Co(30 Å) 층의 자화용이축과 같은 방향으로 정렬됨이 관찰되었다. 따라서, 극히 얇은 Co 층이 NiFe/Cu 계면에 삽입된 스핀밸브 박막에서 향상된 각형성(squareness)을 나타내는 자기저항곡선을 관찰할 수 있었으며, 이는 MRAM을 비롯한 디지털 자기저항소자 응용에 적합한 것으로 판단되었다. 또한, NiFe 박막을 동일한 기판과 바닥층에 형성하여, NiFe 박막과 Cu 바닥층이 이루는 계면에 Co 층의 삽입 유무에 따른 XRD 측정 결과를, NiFe/Cu 계면에 존재하는 Co 층에 상관없이 NiFe 박막은 (220) 배향을 나타내었으며, 이로부터 극히 얇은 Co 층의 삽입에 따른 NiFe 층의 자기이방성의 변화는 NiFe/Cu 계면에서 NiFe/Co 계면으로 바뀔 때 따른 계면 효과에 의한 것으로 사료되었다.

I. 서 론

인접한 두 자성층의 보자력의 차이를 이용한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 박막이 MRAM(Magneto-resistive RAM)을 비롯한 디지털 자기저항 소자에 응용되기 위해서는 낮은 자장 내에서 높은 자기저항비와 면내 일축자기이방성을 갖는 것이 유리하다[1-2]. 최근 주승기 등은 4° 기울어진 Si(111) 기판 위에 증착한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 박막이 유리 기판 등에 증착한 스핀밸브 박막에 비해 우수한 거대자기저항 특성을 나타냄을 보고하였으나[3], NiFe 층의 자화용이축이 Co 층에 유도된 자화용이축의 방향과 상호 차이를 보임으로써 MRAM 등의 디지털 소자 응용에는 불리한 특성을 제시하였다. 따라서, 4° 기울어진 Si(111) 기판 위에 형성된 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 박막이 MRAM 등에 응용되기 위해서는 자기저항비의 감소 없이, NiFe 층의 자기이방성이 변화되어 자화용이축이 Co 층의 자화용이축과 동일한 방향으로 정렬되는 것이 바람직하다.

일반적으로 스핀밸브 박막과 같이 극히 얇은 자성 박막에서의 자기이방성은 계면(interface) 효과와 부피(volume) 효과로 구성됨이 알려져 있고[4], NiFe/Cu/Co 스핀밸브 박막에서 NiFe 층은 60 Å 정도로 극히 얇은 두께이므로 계면을 이루는 물질과의 계면 상태에 민감할 것으로 예상

되었다. 또한, Co는 거대자기저항 현상을 나타내는 박막에서 계면에서의 전도전자의 스핀의존산란을 증대시키는 물질로 알려져 있으므로[5], 본 연구에서는 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 박막에서 NiFe/Cu 계면에 얇은 Co 층을 삽입함으로써, 스핀밸브 박막에서 자기저항 효과의 증대와 NiFe/Cu 계면에서 NiFe/Co 계면으로의 변화에 따른 NiFe 층의 자기이방성의 변화를 고찰하고자 하였다.

II. 실험 방법

고주파 마그네트론 스퍼터링 방법으로 NiFe(60 Å)/Co(0 Å ≤ x Å ≤ 15 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) 스핀밸브 박막을 4° 기울어진 Si(111) 기판에 50 Å 두께의 Cu 바닥층을 증착하고 그 위에 외부 자장의 인가 없이 증착한 후, 스핀밸브 박막의 거대자기저항 특성과 NiFe 층의 자기이방성을 고찰하였다. 4° 기울어진 Si(111) 웨이퍼는 희석된 불산용액을 사용하여 표면의 자연산화막을 제거한 후 기판으로 사용하였고, 스퍼터링시 초기진공은 1×10^{-6} Torr 이하이었으며, 아르곤 압력은 3 mTorr로 유지하였다. 형성된 박막의 자기저항곡선은 시편진동자력계의 전자석을 사용하여 일반적인 4 탐침법에 의해 상온에서 측정하였고, 자기이력곡선은 시편진동자력계로 측정하였다. 특히, 극

히 얇은 Co 층의 삽입에 따른 NiFe 층의 자기이방성의 변화를 관찰하기 위해, NiFe 박막의 면내의 여러 방향에서 자기이력곡선과 각형성(squareness)을 측정하였다. 각형성은 일정한 방향에서 박막의 잔류자화값을 포화자화값으로 나눈 값으로 정의하였다. NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층이 NiFe 층의 결정성의 미치는 영향을 알아보기 위해, 동일한 기판과 바닥층 위에 NiFe(500 Å)과 NiFe(500 Å)/Co(5-10 Å) 시편을 제작하여 40°에서 90°까지 2θ를 변화시키며 XRD 측정을 행하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

4° 기울어진 Si(111) 기판에 Cu(50 Å) 바닥층을 형성하고 그 위에 증착한 NiFe(60 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) 스핀밸브 박막의 NiFe/Cu 계면에 극히 얇은 Co 층을 삽입함에 따른 자기저항곡선의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 삽입되는 Co 층의 두께가 0 Å 에서 4 Å 까지 증가함에 따라, 스핀밸브 박막의 자기저항비는 약 1.5 % 에서 3 % 로 약 2배 증가하였으며, 특히 수 ~수십 Oe의 작은 자장 영역에서의 자기저항곡선의 형태가 급격히 변화하였다. 이는 이미 보고된 바와 같이[6], 수십 Oe 이하의 작은 자장 영역에서의 자기저항 거동이 NiFe 층의 자기적 특성에 의해 결정됨을 고려할 때, NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층에 의해 NiFe 층의 자기적 특성이 큰 영향을 받은 것으로 사료된다. 반면에 스핀밸브 박막을 구성하는 30 Å 두께의 Co 층의 자화반전에 의한 자기저항의 변화는 NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층에 관계없이 약 160~170 Oe에서 관찰되었으며, 이는 삽입된 Co 층이 스핀밸브 내의 30 Å 두께의 Co 층의 자기적 특성에는 영향을 끼치지 않음을 나타내는 것으로 생각된다.

Fig. 2에는 스핀밸브 박막의 NiFe/Cu 계면에 얇은 Co 층을 삽입함에 따른 -60 Oe에서 60 Oe 자장 범위에서의 자기저항곡선의 변화를 나타내었다. 위의 자장 범위에서는 스핀밸브 박막을 구성하는 Co(30 Å) 층의 자화반전은 일어나지 않으므로, Fig. 2에 제시된 자기저항곡선은 NiFe 층의 자화반전 특성을 나타내며, 삽입된 Co 층의 두께가 증가함에 따라 NiFe 층의 자기이력이 점차 증가하여 4 Å 의 Co 층 두께에서는 각형성(squareness)이 우수한 자기저항곡선이 관찰되었다. 이는 이미 기술한 바와 같이 NiFe/Cu 계면에 삽입된 극히 얇은 Co 층이 NiFe 층의 자기이방성을 변화시키지 않기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, NiFe/Cu 계면에 존재하는 얇은 Co 층이 NiFe 층의

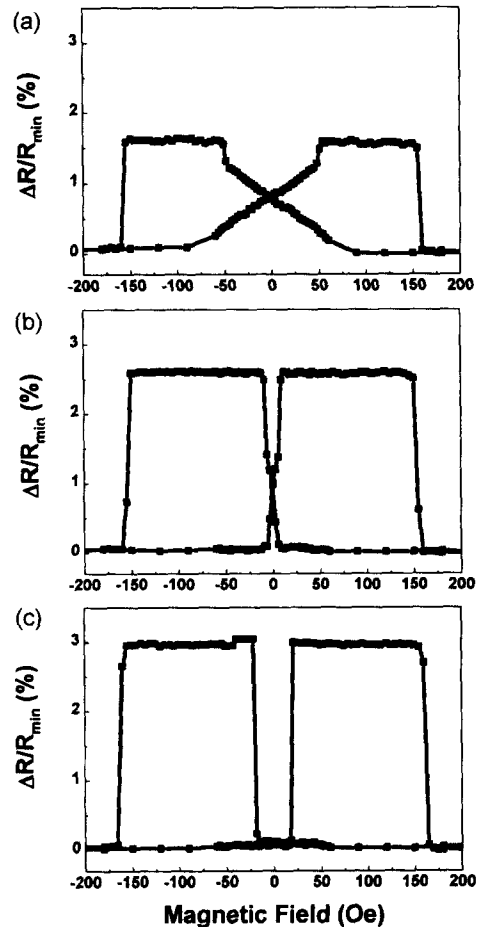


Fig. 1. R-H curves of NiFe(60 Å)/Co(X)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) spin valve thin films on Cu(50 Å)/Si(111, 4 degree tilt-cut). (a) X=0 Å, (b) X=2 Å, (c) X=4 Å.

자기이방성 및 자기적 특성에 미치는 영향을 자세히 알아보기 위해, 60 Å와 500 Å 두께의 NiFe 박막을 스핀밸브 박막과 동일한 기판과 바닥층 위에 형성하여, 삽입된 Co 층의 유무에 따른 자기적 특성을 측정하였다.

Fig. 3은 잔류자화값을 포화자화값으로 나눈 값으로 정의된 각형성을 NiFe 박막의 면내 여러 방향에서 측정하여 나타낸 것으로, θ는 4° 기울어진 Si(111) 기판의 Si<112> 방향과 측정 방향이 면내에서 이루는 각을 나타낸다. NiFe 박막의 두께가 60 Å인 경우, NiFe 박막의 자기이방성은 NiFe/Cu 계면에 존재하는 Co 층에 관계없이 면내 일축자기이방성을 유지하지만, Co 층이 삽입됨에 따라 자화용이축은 민감하게 변화하여 면내에서 90° 전이되는 것으로 관찰되었다. 반면에 NiFe 박막의 두께가 500 Å으로

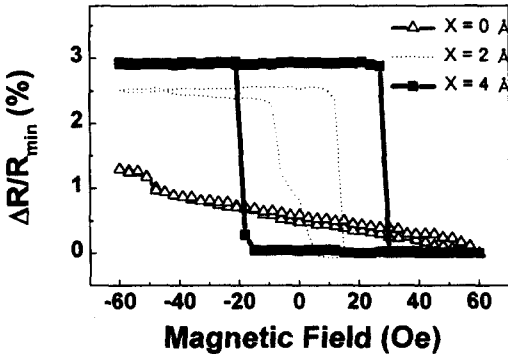


Fig. 2. Minor R-H curves of NiFe(60 Å)/Co(X)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) spin valve thin films on Cu(50 Å)/Si(111, 4 degree tilt-cut).

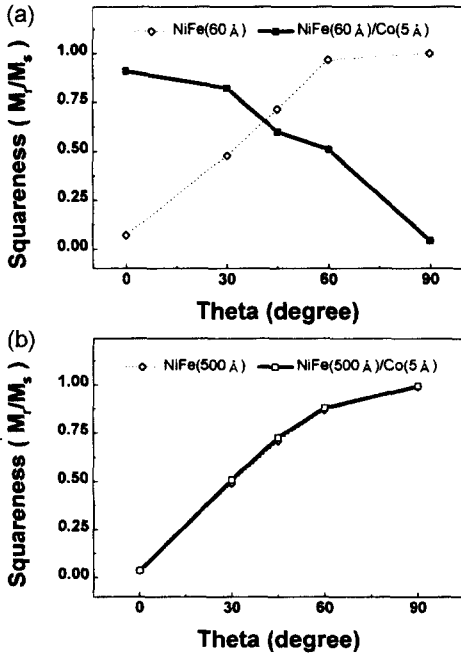


Fig. 3. Squaresness curves of (a) NiFe(60 Å) and (b) NiFe(500 Å) thin films with respect to the inserted Co layer.

두꺼운 경우는 Co 층의 삽입에 관계없이 동일한 자기이방성 특성을 나타내었다.

Fig. 4는 NiFe(60 Å) 박막에 대해 NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층의 유무에 따른 자기이력곡선의 변화를 나타낸다. 이미 기술한 바와 같이, 기판을 기준으로 Si<112> 방향의 자기이력곡선은 Co 층의 삽입에 따라 자화곤란 거동에서 자화용이 거동으로 전이하고 있으며, 4° 기울어진 Si<110> 방향의 자기이력곡선은 자화용이 거동에서 자화

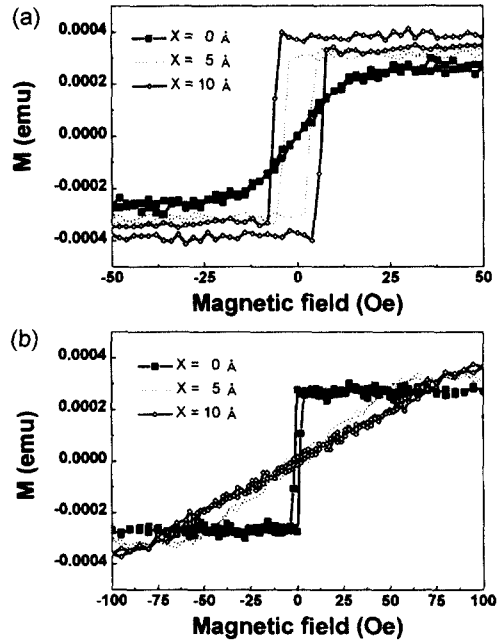


Fig. 4. M-H curves of NiFe(60 Å)/Co(0, 5, 10 Å) thin films measured along (a) Si<112> and (b) 4 degree tilt Si<110> directions.

곤란 거동으로 변화하고 있다. 또한, NiFe/Cu 계면에 삽입되는 Co 층의 두께가 증가함에 따라 박막의 포화자화값은 삽입된 Co 층의 영향으로 다소 증가하는 경향을 나타내며, NiFe 층의 자화용이축과 자화곤란축의 자기이력곡선의 차이는 더욱 분명해지고 있다. 이는 자기이방성 에너지의 크기가 증가하고 있음을 나타낸다.

500 Å 두께의 NiFe 박막에서 10 Å 두께로 삽입된 Co 층의 유무에 대해 XRD 패턴을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 500 Å 두께의 NiFe 박막은 극히 얇은 Co 층의 삽입에 따라(220) 배향을 유지하였으며, 약 1° 정도 (220) peak의 이동이 관찰되었다. 따라서, NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층은 NiFe 박막에 대해 약 1% 정도의 격자상수 감소 효과 이외에 박막의 성장 및 우선 배향에 큰 영향을 끼치지 않은 것으로 사료된다. 또한, Fig. 3에서 보인 바와 같이, 500 Å 두께의 NiFe 박막은 삽입된 Co 층에 관계없이 동일한 자기이방성 특성을 나타내었으므로, 위의 격자 상수의 감소는 자기이방성에 거의 영향을 끼치지 않은 것으로 생각될 수 있다. 일반적으로 수 ~ 수백 Å 두께의 박막에서 자기이방성은 부피(volume) 효과와 계면(interface) 효과로 나뉘어 이해될 수 있으며[4], H. J. G. Draaisma 등에 의해 제안된 식에 의하면 60 Å 두께는

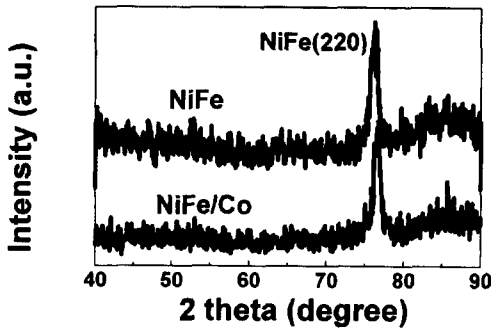


Fig. 5. XRD patterns of NiFe(500 Å) and NiFe(500 Å)/Co(10 Å) thin films on Cu(50 Å)/Si(111, 4 degree tilt-cut).

NiFe 박막에서는 500 Å 두께의 NiFe 박막에서 보다 약 8배 이상의 큰 계면 효과(=2K_s/t_{magnetic layer})를 나타낸다. 따라서, 500 Å 두께의 NiFe 박막은 계면 효과에 비해 상대적으로 큰 부피 효과를 나타내므로, 삽입된 Co 층에 의해 변화된 계면에 무관하게 자기이방성 특성을 유지하는 것으로 이해할 수 있고, 60 Å 두께의 NiFe 박막에서는 상대적으로 큰 계면 효과로 인해 자화용이축이 전이하는 것으로 판단할 수 있다. 기존의 보고에 의하면, Ni₈₀Fe₂₀ bulk 소재의 자화용이축은 <111>, <100>, <110> 순으로 알려져 있으나, 박막으로 형성된 NiFe 소재에서는 조성 및 두께, 형성 방법에 따라 다소 상이한 자화용이축이 보고되고 있다[7-8]. K. Inomata 등은 MgO(110) 기판 위에 형성한 NiFe/Cu 인공초격자 다층박막에서(110) 우선 배향과 면내일축자기 이방성을 보고하였으며, 이때, NiFe 층의 자화용이축은 <100> 방향이고, 자화근란축은 <110> 방향으로 관찰하였다[7]. 본 연구에서 형성된 NiFe 박막 또한(220) 우선 배향과 면내일축자기 이방성을 나타내었으므로 매우 유사한 결과로 판단되며, (110) 면내에서 상호 직각을 이루는 low index 면이 <100>와 <110> 방향임을 고려할 때 NiFe 박막의 자화용이축과 자화근란축은 각각 <100> 및 <110> 방향과 일치할 것으로 사료된다. 이는 NiFe 박막의 계면이 NiFe/Cu 에서 NiFe/Co 로 변화됨에 따라 NiFe 박막의 자화용이축이 <100>에서 <110> 방향

으로 전이함을 나타내며, 이에 대한 연구는 더욱 진행되어야 할 것으로 생각된다.

IV. 결 론

4° tilt-cut Si(111) 기판에 Cu(50 Å) 바닥층을 형성하고 그 위에 증착한 NiFe(60 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) 스핀밸브 박막의 NiFe/Cu 계면에 극히 얇은 Co 층을 삽입함에 따른 스핀밸브 박막의 거대자기저항 특성의 변화와 NiFe 층의 자기이방성에 대해 연구하였다. Co 층이 삽입됨에 따라 스핀밸브 박막의 자기저항비는 약 1.5 %에서 약 3.5 %의 증가를 나타내었고, NiFe 층의 자화용이축은 면내에서 90° 전이하여 MRAM 등의 디지털 자기저항 소자에 적합한 자기저항곡선이 관찰되었다. 또한, NiFe/Cu 계면에 삽입된 Co 층에 의한 NiFe 층의 자화용이축의 변화는 XRD 측정 결과로부터, 결정자기이방성의 변화를 포함한 부피 효과보다 계면 물질 변화에 따른 계면 효과에 의한 것으로 생각되었다.

감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었고, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D. D. Tang, P. K. Wang, V. S. Speriosu, S. Le and K. K. Kung, IEEE. Trans. on Mag., **31**(6), 3206(1995).
- [2] Y. Irie, H. Sakakima, M. Satomi and Y. Kawawake, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, L415(1995).
- [3] 김형준, 이병일, 주승기, 한국자기학회지, **6**(5), 323(1996).
- [4] H. J. G. Draaisma and W. J. M. de Jonge, J. Magn. Magn. Mater., **66**, 351(1987).
- [5] S. S. P. Parkin, Appl. Phys. Lett., **61**(11), 1358(1992).
- [6] 김형준, 이병일, 주승기, 한국자기학회지, **8**(4), 224(1998).
- [7] K. Inomata and H. Hashimoto, J. Appl. Phys., **74**(6), 4096(1993).
- [8] B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Addison-Wesley(1972).

Effects of Ultrathin Co Insertion Layer on Magnetic Anisotropy and GMR Properties of NiFe/Cu/Co Spin Valve Thin Films

Hyeong-Jun Kim, Kwon-Ku Cho, and Seung-Ki Joo

*School of Materials Science and Engineering, Seoul Nat'l University
San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-ku, Seoul 151-742, Korea*

(Received 15 September 1999, in final form 12 October 1999)

NiFe(60 Å)/Co(0 Å ≤ x Å ≤ 15 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) spin valve thin films were prepared on 4° tilt-cut Si(111) substrates with a 50 Å thick Cu underlayer without applying any external magnetic field during the deposition, and the effects of inserted ultrathin Co layer on magnetic anisotropy and GMR properties of the NiFe(60 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) spin valves were investigated. As the ultrathin Co layer was inserted into the NiFe/Cu interface of the spin valves, GMR ratio was increased from about 1.5 % to 3.5 %, and the easy axis of NiFe(60 Å) layer was rotated by 90°. Accordingly, it was aligned along the same direction with the easy axis of Co(30 Å) layer. Therefore, squared R-H curves was obtained in the spin valves, which is favorable properties for the digital GMR devices such as MRAM. In order to investigate the change of magnetic anisotropy of NiFe layer of the spin valves in more details, XRD measurement was performed using NiFe(500 Å) and NiFe(500 Å)/Co(10 Å) thin films on the same templates. Strong (220) NiFe peak was observed in both films regardless of the inserted Co layer, so it was thought that the variation of magnetic anisotropy of NiFe layer is from the interface effect, the change of interface from NiFe/Cu to NiFe/Co, rather than the volume effect such as the change of magnetocrystalline effect.